

Quantum Cascade Laser 기술
유 재 수
경희대학교 전자전파공학과

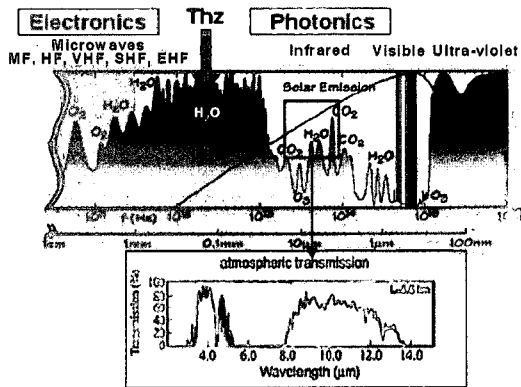
I. 양자 계단 레이저의 응용 분야 및 배경

Hydrocarbons(3.3  $\mu\text{m}$ ), CO(4.2  $\mu\text{m}$ ), CO<sub>2</sub>(4.6  $\mu\text{m}$ ), NO<sub>x</sub>(6.5  $\mu\text{m}$ ), SO<sub>x</sub>(7.3  $\mu\text{m}$ ) 등 수많은 오염물, 독가스 등의 흡수 밴드를 포함하는  $\lambda=3\sim 14 \mu\text{m}$ 의 중적외선 영역에서의 광원은 원거리 화학 센싱 및 화학 spectroscopy, 대기 중 흡수가 적은 3~5  $\mu\text{m}$ 와 8~12  $\mu\text{m}$  대기창(atmospheric windows)을 이용한 자유공간 광통신, 의료 수술, 의약 매개물, 제약, 환경 모니터링, 생의학/의료, 산업 공정 제어, 보건/안전, 폭발감지, 열추적 미사일의 적외선 감지 센서를 무력화하는 대응 수단(countermeasure) 등 민간, 산업 및 군사 분야의 광범위한 응용을 가진다([그림 1]).

이러한 파장 영역에서 동작하는 광원들 중에서 가스 레이저와 고체 레이저는 부피가 크고 동작이 불안하여 PbSe, PbS, PbTe와 같은 lead-salt 반도체 레이저가 주로 상용으로 이용되어 왔지만, 저온장치를 필요로 하므로 비용이 많이 들기 때문에 최근 중·

장적외선 영역의 광원으로 superlattice 구조를 통한 서브밴드간(intersubband) 전이를 이용한 신개념 반도체 양자 계단 레이저(Quantum Cascade Laser: QCL)는 높은 신뢰성, 넓은 파장 영역에 걸친 고온 및 고출력 연속 동작으로 그 가능성이 매우 크다<sup>[1]</sup>.

1969년 Esaki와 Tsu가 superlattices를 개발하였고<sup>[2]</sup>, 1971년 Kazarinov와 Suris에 의해 AlGaAs/GaAs superlattices에 전압을 인가해 photon-assisted tunneling을 통해 intersubband 내에 coherent한 빛이 방출된다는 양자 계단 레이저의 기본 개념이 제안되었고<sup>[3]</sup>, MBE와 같은 고품위 이종 접합 구조의 성장 기술의 진보와 함께 1994년 비로소 Bell 연구소에서 F. Capasso, J. Faist, C. Sirtori, C. Gmachl, A. Cho 등에 의해 10 K에서의 전기적 펌핑에 의해 펄스에서 동작하는 소자가 처음 제작되어 Science지에 발표되었다<sup>[4]</sup>. 이후 C. Sirtori는 프랑스의 Thomson-CSF, J. Faist는 스위스의 Neuchâtel 대학, C. Gmachl은 프린스턴 대학, F. Capasso는 하버드 대학으로 옮겨 연구를 계속하고 있다. 2002년 밴드 구조 엔지니어링과 epitaxial 성장 기술의 발전에 힘입어 Faist 그룹에서  $\lambda=8.9 \mu\text{m}$ 에서 최초로 10 mW의 상온 연속 발진을 얻어 Science지에 발표하였고<sup>[5]</sup>, 주도적 연구를 수행하면서 Alpes Lasers를 설립해 상용화 연구에 전념하고 있으나, 양자 계단 레이저 고유의 높은 동작 전압으로 인한 소자 내부의 심각한 열 발생 때문에 고온 고출력 연속 동작을 얻는데 여전히 어려움을 겪고 있다. 이러한 양자 계단 레이저의 상온 고출력 연속 동작에 있어서 획기적인 계기로써 미국 노스웨스턴 대학의 Razeghi 그룹에서 2003년 세계 두 번째로 100 mW 이상의 고출력 상온 연속 동작의 발표 이후 상당한 진보가 있



[그림 1] 기초-응용 분야를 위한 전자기파 스펙트럼

어  $\lambda=3.8\sim 10.6\ \mu\text{m}$  등의 넓은 파장 영역에 걸쳐 고출력 상온 연속 동작을 보고하고 있어 상용화를 위한 소자 성능 면에서 앞서 가고 있다<sup>[6]~[8]</sup>. 최근 Hewlett Packard(HP)에서 MOCVD에 의해  $\lambda=8.5\ \mu\text{m}$ 에서 200 mW 이상의 고출력을 가지고 상온에서 동작하는 소자가 개발되고 있으며<sup>[9]</sup>, 이외 미국에서는 Naval Research 연구소, Sadia National 연구소, 유럽에서는 영국의 Glasgow 대학, Sheffield 대학, Leeds 대학, Cambridge 대학, 프랑스의 THALES, 독일의 Fraunhofer 연구소, 뮌헨 공대, 베를린 대학, 이탈리아 로마 대학, 오스트리아의 TU Vienna 대학 등 주로 미국과 유럽을 중심으로 연구되고 있다. 최근에 양자 계단 레이저의 고온 고출력 연속 동작 및 wall-plug 효율 개선, 화학 센싱 및 spectroscopy를 위한 단일 모드 distributed feedback(DFB) 양자 계단 레이저 제작, 그리고 테라헤르쯔(THz) 이미징 응용 양자 계단 레이저 개발을 위해 미국에서는 정부 지원 하에 활발한 연구가 수행 중에 있다. DFB 양자 계단 레이저의 경우, Razeghi 그룹에서  $\lambda=4.8\ \mu\text{m}$ ,  $7.8\ \mu\text{m}$ 와  $9.5\ \mu\text{m}$ 에서 25 dB 이상의 SMSR(Side Mode Suppression Ratio)를 가지고 100 mW 이상의 상온 연속 동작을 가지는 소자가 개발되고 있으며<sup>[10]~[12]</sup>, Pranalytica, Inc.에서 Razeghi 그룹으로부터 공급 받은 칩에 의해 무반사 코팅과 Littrow cavity 구조를 가진 external cavity tunable 레이저를 제작하여 상온 연속 동작에서 400 nm 이상의 tuning 범위를 나타냈다. 2009년 Razeghi 그룹에서의 buried heterostructure와 diamond submount에 의한 epilayer-down 본딩의 방열 구조의 개선을 통해  $\lambda=4.6\ \mu\text{m}$ 에 동작하는 양자 계단 레이저가 상온에서 2.8 W 이상의 고출력이 보고되고 있다<sup>[13]</sup>.

테라헤르쯔파(300 GHz~10 THz) 기술은 최근 T-ray로 불리며 많은 관심을 끌고 있는데, X-ray와 달리 비이온화 전자기파로 DNA에 손상을 주지 않으며, 금속과 물을 투과하지 못하지만, 플라스틱, 나무, 의류, 안개 등을 투과할 수 있으므로 무기 은닉 및



[그림 2] 양자 계단 레이저의 중·장 적외선 및 테라헤르쯔 이미징 응용 분야

플라스틱 폭탄 탐지가 가능하고, 지방 조직과 같이 수분 함유량이 적은 조직을 수 mm 정도 투과했다가 반사할 수 있고, 조직 안에서 수분 함유량 혹은 밀도 차이를 탐지해낼 수 있으므로, 치아의 3차원 영상을 얻거나, 상피암을 효율적으로 감지할 수 있는 등 이미징, spectroscopy, 통신 등의 다양한 응용 분야를 갖는 매우 유망한 기술로써, 각종 영상, 정보, 보안, 의료, 우주, 군수, 환경 산업 분야 등 다양한 분야에 널리 이용될 수 있다([그림 2])<sup>[14],[15]</sup>. 응용 범위가 넓은 이유 중 하나는 자연계의 대부분을 형성하는 생물체나 분자 형태의 물질의 결합력으로 인해 1~100 meV의 매우 낮은 에너지의 빛으로 구조나 특성을 잘 분석할 수 있는데, 테라헤르쯔파가 우리를 둘러싸고 있는 많은 물질과 생명체를 탐구하는데 가장 유용한 도구로 쓰일 수 있고, 기존의 X-ray 촬영에 비해 정교하고 안전한 장점 때문에 미래의 의료 영상 기술 자원으로써 매우 훌륭한 광원으로 인정받고 있으며 세계적으로 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[16]</sup>.

하지만, [그림 1]에 보듯이 전파와 광파 사이에 존재하는 'THz Gap'이라고 불릴 정도로 아직 이 파장대역의 전자기파에 대한 연구가 상대적으로 미진한 상태이므로 테라헤르쯔파를 발생시키는 기술은 앞으로 많은 연구가 수행되어야 한다. 이러한 광원 개발의 대표적인 예로는 고출력을 갖는 자유 전자 레

이저, 방사광 가속기의 테라헤르쯔 광원이 개발되어 왔으나, 부피가 커서 응용 범위에 제한을 가지며 상용화에 어려움이 있고 극초단 레이저 펄스에 의한 테라헤르쯔 광원은 다소 소형이지만 매우 낮은 출력으로 이 또한 상용화에 한계가 있다<sup>[17]</sup>. 또한 photomixers, Schottky multipliers 등의 전파 영역에서 광원 개발을 위한 접근이 있어 왔으나, 출력이 수 nW~ $\mu$ W로 매우 낮은 값을 나타낸다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 소형, 안정성, 경제성 등의 장점을 가진 반도체 광원 개발이 요구되어 왔으며, 1990년대 초반 반도체 광원인 양자 계단 레이저의 개발 이후 혁신적인 연구를 통해 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 소자로서 관심이 집중되어 왔으며, 2001년 이탈리아 NEST-INFN & Scuola Normale Superiore의 Köhler 그룹과 영국 Cavendish 연구소에서 2 mW의 광출력을 갖는 반도체 광원인 4.4 THz( $\lambda \approx 67 \mu\text{m}$ ) 양자 계단 레이저가 처음 개발되었다<sup>[18]</sup>. 그 후, 0.68~5 THz에서 동작하는 양자 계단 레이저가 보고되고 있으며, 2005년 MIT의 Hu 그룹에 의해 164 K에서 펄스 동작, 117 K에서 연속 동작을 갖는 소자가 개발되었고, 광출력의 경우, 펄스 모드에서 250 mW, 연속 모드에서 130 mW가 얻어지고 있다<sup>[19]</sup>. 최근 National High Magnetic Field Laboratory의 Wade 그룹은 0.68~3.3 THz 영역에 걸쳐 동작하는 소자를 개발하였으며, 2008년 20 T 이상의 강한 static 자장을 가해 1 THz에서 215 K, 3 THz에서 225 K까지 동작하는 테라헤르쯔 양자 계단 레이저가 보고되고 있지만<sup>[20]</sup>, 세계적으로 그러한 강한 자장을 인가할 수 있는 곳이 많지 않다.

양자 계단 레이저는 InP계의 InGaAs/InAlAs, GaAs계의 AlGaAs/GaAs, GaSb계의 InAs/AlSb와 InGaAs/AlAsSb에서 좋은 성능을 가지고 제작되고 있으며, 중·장 적외선 영역의 경우 conduction 밴드 offset이 큰 InGaAs/InAlAs가 최고 성능을 나타내고 있으며, AlGaAs/GaAs는  $\lambda = 67 \sim 140 \mu\text{m}$ 의 테라헤르쯔 영역에서는 주로 사용되고, 3  $\mu\text{m}$ 보다 짧은 파장 영역에

서는 InAs/AlSb와 InGaAs/AlAsSb<sup>[21]</sup> 물질계에 대해 연구가 활발히 진행되고 있다.

## II. 양자 계단 레이저의 기술 개요

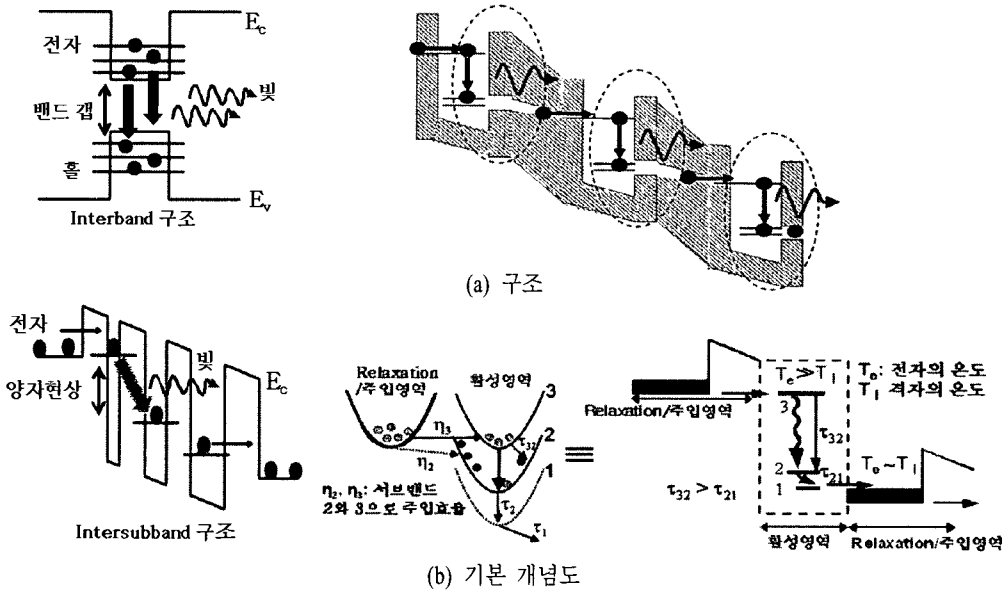
### 2-1 중·장 적외선 양자 계단 레이저

고온 고출력 양자 계단 레이저를 구현하기 위해서는 원하고자 하는 파장의 빛을 lasing하기 위한 활성층/주입층의 최적화, 빛을 손실 없이 전파하기 위해서 저손실 광도파로 구조 최적화, 그리고 소자 내부에 발생된 열을 효율적으로 제거하기 위한 방열 구조의 최적화가 이루어져야 한다.

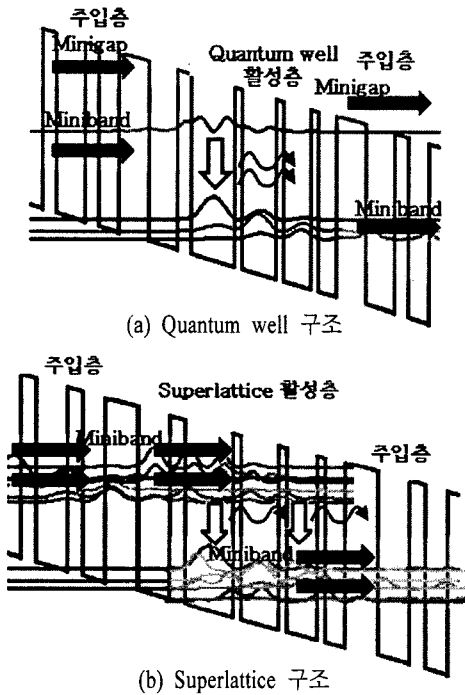
#### 2-1-1 양자 계단 레이저의 활성층/주입층

양자 계단 레이저는 [그림 3]에서와 같이 빛을 방출하는 활성 영역(active region)과 활성 영역으로 전자를 공급하는 주입 영역(injector region)의 25~75 stage를 적층한 계단 형태로 구성되어 있으며, 이를 구성하는 수 nm의 물질들의 두께와 조성에 따라 Schrödinger 방정식으로부터 파장이 결정될 수 있다.

[그림 4]에서 보듯이 활성 영역은 크게 quantum well 구조와 superlattice 구조로 구성될 수 있다. Quantum well 활성층은 미니밴드(miniband)와 미니갭(mini-gap)으로 이루어져 있고, 주입층에서의 전자가 얇은 barrier를 통해 활성층으로 tunneling하고, 미니 밴드를 통해 전자들은 쉽게 relaxation한다. 따라서 효율적인 resonant tunneling injection과 높은 extraction 효율을 가지고, vertical transition에 flexible하며 높은 광이득과 impurity에 덜 민감하다. Superlattice 활성층의 경우, 미니 밴드만으로 이루어져 있고, 높은 oscillator length를 가지지만, doping에 제한을 가지고, 낮은 injection selectivity를 가진다. 현재 quantum well 활성층을 사용한 양자 계단 레이저가 높은 성능을 나타내고 있다. 광이득( $G_p$ )은 위의 3 레벨 시스템으로부터 식 (1)에 의해 얻어질 수 있다<sup>[1],[22]</sup>.



[그림 3] 3개의 서브 밴드를 가지는 양자 계단 레이저.  $\tau_{32}$ ,  $\tau_{21}$ 은 서브 밴드 3에서 2로, 서브 밴드 2에서 1로의 relaxation 시간



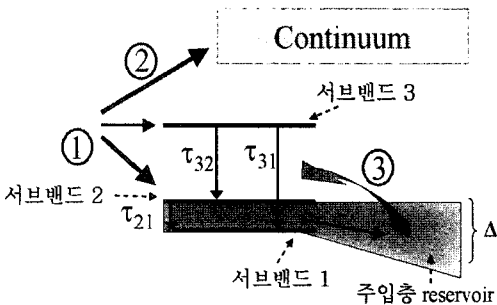
[그림 4] 양자 계단 레이저의 활성층

$$G_p = g_c \Delta n = g_c \frac{I}{q} \left[ \eta_3 \tau_3 \left( 1 - \frac{\tau_2}{\tau_{32}} \right) - \eta_2 \tau_2 \right] \quad (1)$$

여기서  $g$ 는 이득 단면,  $J$ 는 주입 전류,  $\Delta n$ 은 서브 밴드 3과 2사이 전자의 농도차,  $\tau_3$ ,  $\tau_2$ 는 서브밴드 2와 3의 수명이다. 레이저 동작을 위한 반전 분포 (population inversion)를 형성하기 위해 주입 효율을 높여야 하고, 동시에 서브 밴드 3에서 2로 전자가 relaxation되는 시간보다 서브 밴드 2로부터 다른 서브 밴드로 relaxation되는 시간보다 빨라야(즉,  $\tau_{32} > \tau_2$ ) 한다. 주입 영역에서는 미니 밴드를 통해 활성층 영역으로 전자의 relaxation을 더 원활히 하고, 미니 갭을 구성하여 전자의 continuum으로의 누설을 일부 방지할 수 있다. 기존의 반도체 레이저에서의 conduction 밴드의 전자와 valence 밴드의 홀의 재결합을 통해 밴드간(interband) 전이로 빛을 방출하고 그 파장이 반도체 물질의 고유한 밴드갭에 의해 결정되는 것과 달리 양자 계단 레이저는 단지 conduction 밴드

내의 전자만의 relaxation에 의해서 서브 밴드간 전이를 통해 빛을 방출하므로 단지 활성층 내의 층들의 두께와 폭의 조절에 의해 파장이 결정되므로  $\lambda=3\sim 25\ \mu\text{m}$  및 테라헤르쯔 영역에 걸쳐 사용되는 반도체 물질에 관계없이 넓은 파장의 빔을 얻을 수 있는 큰 장점을 가진다.

[그림 5]에서 보듯이 양자 계단 구조내의 주요한 세가지, 즉, ① 주입층의 전자가 직접 서브밴드 2로 relaxation을 통한 누설, ② 주입층의 전자가 continuum으로 누설, ③ 온도 상승에 따른 주입층으로부터 “backfilling”이라 불리는 열적 재분포를 통한 누설을 감소시켜야 상온에서 효율적인 반전분포를 얻을 수 있다<sup>[1]</sup>. 활성 영역이 주입 영역을 통해 계단 형태로 연결되어 있어 광자의 수가 활성층/주입층의 stage에 비례하므로  $[P=N(I-I_{th})\eta_{int}/(2q)]$ , 여기서  $N$ 은 stage 수,  $I_{th}$ 는 문턱전류,  $\eta_{int}$ 는 internal 양자 효율] 높은 광출력을 얻을 수 있다<sup>[23]</sup>. 주입 영역은 전자 주입 효율을 높이고, 서브 밴드 2와 1사이의 에너지를 LO phon(longitudinal optical phonon) 에너지와 일치시켜 전자가 서브 밴드 2로부터 빠르게 relaxation 되도록 활성 영역과 함께 고려되어야 한다. 중적외선 영역에서 파장이 짧아짐에 따라 특히 ②의 주입층의 전자가 continuum으로 누설이 급격히 증가하므로, conduction 밴드의 offset 에너지를 증가시키는 구조가 필수적인데, compressive strain을 갖는 well과 tensile strain



[그림 5] 양자 계단 구조내의 전자의 누설 경로

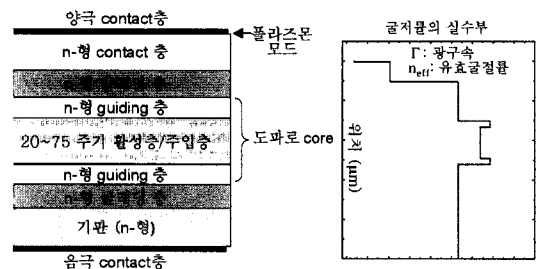
을 갖은 barrier를 교대로 증착하는 strain compensated 구조를 사용함으로써 dislocation 없이 critical thickness 이상으로 성장하여 이러한 band offset를 상당히 증가시킬 수 있다. Strain compensated 구조를 사용하여 지금까지 보고된 가장 짧은 상온 연속 동작 파장인  $\lambda\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 에서 100 mW 이상의 광출력이 증명되었다<sup>[7]</sup>. 또한, 장파장 양자 계단 레이저에서는 광 흡수 손실이 크므로 광이득을 증가시키기 위해 50 stage 이상의 활성층/주입층을 필요로 하므로 두꺼운 core층을 갖는다.

### 2-1-2 양자 계단 레이저의 도파로

[그림 6]에서 보듯이 양자 계단 레이저의 도파로에서는  $\lambda^{2-3}$ 에 비례하는 자유 전자 흡수로 인한 손실, 음의 유전상수를 가지는 금속 contact 층과 양의 유전상수를 갖는 반도체 경계면에서 TM의 플라즈몬 모드가 발생하여 기본 도파로 모드와 결합으로 인한 손실이 발생하게 되고, 기존의 반도체 레이저와 달리 도핑이 굴절을 및 광손실에 큰 영향을 준다. 광 구속(optical confinement),  $\Gamma$ 는 다음과 같이 주어진다<sup>[7]</sup>.

$$\Gamma = \frac{P_{core}}{P_{total}} = P_{core} = \frac{1}{2} \int_{core} \text{RE}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \hat{\mathbf{y}} dz \quad (2)$$

여기서  $P_{core}$ 와  $P_{total}$ 은 core 영역과 전체 영역에서의 광출력을 나타내고,  $P_{total}$ 은 1로 정규화되었다. 광

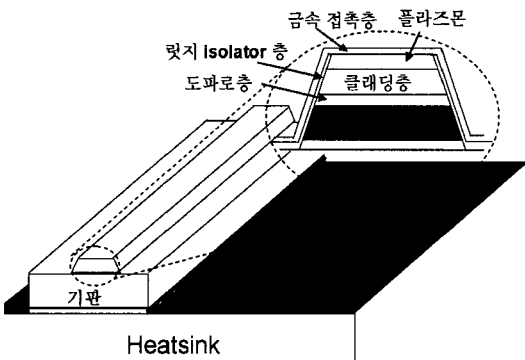


[그림 6] 양자 계단 레이저의 기본 구조 및 위치에 따른 굴절을 변화

구속을 향상시키기 위해서는 도파로 core 층과 클래딩(cladding) 층의 굴절률 차이를 증가시킴과 동시에 동작 파장에 비례해서 클래딩층의 두께가 증가해야 하지만, 클래딩층의 두께를 두껍게 하는 데는 한계를 가진다. 증적외선 영역에서 파장이 길어짐에 따라 클래딩층의 두께를 증가시키지 않으면서 광구속을 증가시키고, 장파장에서 심각한 자유 전자에 의한 광흡수의 최소화가 필요하다. 따라서 buried hetero-structure를 이용해 소자의 width를 줄이고, 광손실을 최소화함으로써 최근  $\lambda \sim 10.6 \mu\text{m}$ 에서 100 mW 이상의 광출력을 가지고 상온 연속 동작하는 소자가 제작되고 있다<sup>[8]</sup>.

### 2-1-3 양자 계단 레이저의 방열 구조

양자 계단 레이저의 경우, nonradiative 재결합 시간이  $\sim 10^{-12}$ 초의 LO 포논 산란에 의해 결정되므로 문턱 전류 밀도가 높고, 무엇보다 양자 계단 구조를 가지고 있어 동작 전압이  $\sim 8 \sim 10$  V로 기존의 반도체 레이저에 비해 10배 이상 높기 때문에 소자에서 발생하는 열이 매우 높기 때문에, 고출력 연속 발진을 위해서는 이러한 활성 영역으로부터 발생하는 열을 잘 확산시킬 수 있는 방열 구조의 epitaxial 구조 성장 및 공정 설계, 그리고 패키징 기술이 중요하다.



[그림 7] 양자 계단 레이저의 전형적인 epilayer-up 본딩 열 확산 구조

활성 영역의 온도( $T_{act}$ )는 다음 식에 의해 주어진다<sup>[5]</sup>.

$$T_{act} = T_{sub} + \frac{J_{th} V_{th}}{G_{th}} \quad (3)$$

여기서  $T_{sub}$ 는 heatsink 온도,  $J_{th}$ 와  $V_{th}$ 는 문턱 전류 밀도와 문턱 전압이고,  $G_{th}$ 는 활성 영역의 열전도도이며, 소자의 동작 온도를 높이기 위해서  $T_{sub}$ 와 관계된 높은 특성 온도( $T_0$ )와 낮은  $J_0$ (즉,  $J_{th} = J_0 \exp(T_{act}/T_0)$ ), 높은  $G_{th}$ 를 필요로 한다. 이러한 활성 영역으로부터의 열확산을 계산하기 위해서는 [그림 7]에서 보듯이 양자 계단 레이저 구조에서의 각 층의 열전도율을 통한 finite element method 시뮬레이션을 필요로 하고, 효율적인 열확산 구조를 위해 활성 영역의 열전도도를 개선하기 위한 regrowth를 통한 buried heterostructure 구조를 형성하거나, epilayer-down 본딩 구조로부터 활성층에서 발생한 열을 직접적으로 heatsink를 통해 빨리 확산시킬 수 있다. 장파장 양자 계단 레이저의 경우 도파로 광손실을 줄이기 위해 두꺼운 core층과 클래딩층을 가지므로 소자 내부에서 발생하는 열이 매우 높으므로 epilayer-down 본딩이 필수적이다. 따라서 단파장에서의 strain compensated 구조의 한계와 장파장에서의 도파로의 광손실을 줄이는데 한계가 있으므로 보다 나은 성능을 갖는 소자를 개발하기 위해서는 고온 고출력 연속 동작시 발생하는 열을 제거하기 위한 효율적인 방열구조를 통해 소자의 고온 연속 동작 특성을 개선하는 것이 매우 중요하다.

### 2-2 테라헤르쯔 양자 계단 레이저

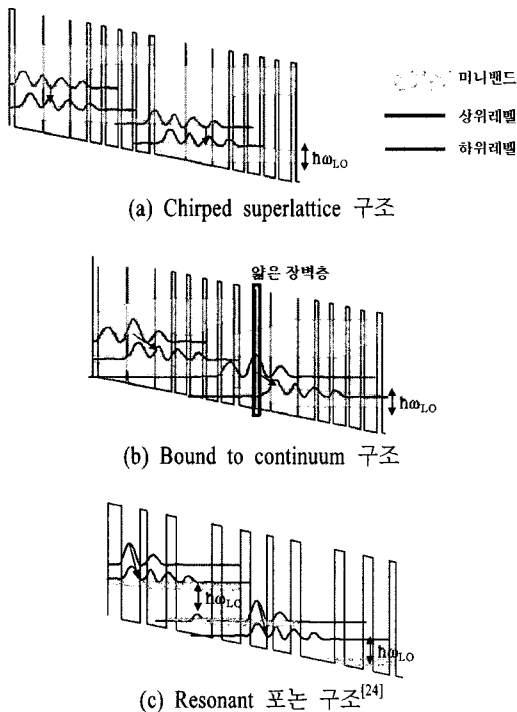
테라헤르쯔 영역에서 양자 계단 레이저의 경우,  $\sim 15 \sim 20$  meV보다 작은 photon 에너지로 인해(즉, GaAs에서의 LO 포논 에너지( $\hbar\omega_{LO}$ )  $\sim 36$  meV) 상위 laser 레벨과 하위 laser 레벨에서 전자의 선택적 주입 및 제거가 어렵고, 높은 온도에서 열적으로 activated된

상위 laser 레벨로부터 LO 포논 방출이 반전 분포를 상당히 감소시키므로 기존의 중·장 적외선 양자 계단 레이저에 비해 반전분포 형성이 힘들고, 온도 특성이 좋지 못해 소자 개발이 힘들다.

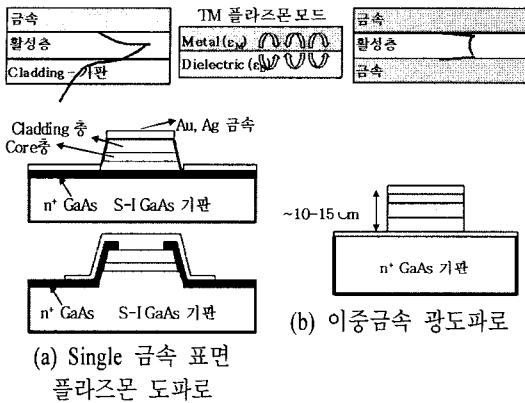
테라헤르쯔 영역에서의 활성층/주입층의 경우, 중·장 적외선 영역에서와 달리 서브 밴드의 에너지 간격이 LO 포논 에너지보다 작기 때문에 전자-전자 scattering이 중요해지고, 소자 설계를 위해 Monte Carlo 시뮬레이션이 필요하다. [그림 8]에서 보듯이 chirped superlattice 구조, bound to continuum 구조, resonant phonon 구조가 사용되고 있다<sup>[24]</sup>. ~105 nm module length를 갖는 chirped superlattice 구조는 상부 미니 밴드의 최하위 서브 밴드와 하부 미니 밴드의 최상위 서브 밴드 간의 광전이를 통해 빛이 발생하는 intersubband 전이로써 미니 밴드 내 서브 밴드간의 scattering에 의

한 전이 세기가 커서(즉, 서브 밴드 2와 서브 밴드 1 사이에서  $f_{21} \sim 2.5 \sim 3$ ) 자연스럽게 반전 밀도가 형성된다. 한편, bound to continuum 구조는 ~110 nm module length를 가지며 얇은 barrier에 의해 resonant tunneling 현상으로 광전이가 이루어지고 상부 밴드가 미니 갭에서 존재하여 diagonal 전이가 이루어져 전이세기는 약간 낮아지지만,  $f_{21} \sim 1.5 \sim 2$ 이고, 수명 시간이 길어져 더 효과적인 반전 밀도를 높일 수 있으며, 전자의 주입 및 제거의 선택도 또한 높아질 수 있어 좋은 온도 특성과 고효율을 나타낼 수 있다. Resonant phonon 구조는 ~55 nm의 module length를 가지며 중·장 적외선에서 사용되는 일반적인 resonant 포논을 이용하여  $f_{21} \sim 0.5 \sim 1$ 을 나타내며 하위 서브 밴드에서 전자가 주입 영역으로 신속히 전이될 수 있게 하여 반전 밀도를 형성하지만, 미니 밴드가 적게 형성되어 전이 세기가 약한 단점이 있는 한편, 전체 층의 두께를 줄일 수 있어 광이득을 크게 할 수 있다. 최근 ~130 nm의 module length를 갖는 hybrid/interlaced 구조가 보고되고 있다. 따라서 원하는 동작파장 영역에서의 이러한 구조들의 반전 분포 및 전이 세기를 극대화하여 광이득 및 양자 효율을 개선하기 위한 최적화 구조 설계가 요구된다.

자유 캐리어 손실이  $\lambda^{2-3}$ 에 비례하므로  $\lambda = 30 \sim 300 \mu\text{m}$ 의 테라헤르쯔 영역에서는 금속의 흡수로 인한 손실이 매우 크므로 매우 긴 파장인 테라헤르쯔 영역에 동작하기 위해서는 이러한 손실을 최소화하기 위한 테라헤르쯔 광도파로 구조가 기존의 dielectric 광도파로 및  $\lambda > 10 \mu\text{m}$ 에서의 표면 플라즈몬 광도파로 구조와는 달라져야 한다. [그림 9]에서 보듯이 테라헤르쯔 영역에서는 중·장 적외선 영역에서와 달리 기존의 dielectric 광도파로 구조를 이용할 수 없기 때문에 초기에는 모드가 금속과 반도체로 기하급수적으로 감쇄하는 guiding 구조로 활성층 모드와 낮은 중복(overlap)을 나타내는 얇은 표면 플라즈몬 광도파로가 사용되었고, 이중금속(금속-금속)



[그림 8] 테라헤르쯔 양자 계단 레이저의 에너지 밴드 구조



[그림 9] 테라헤르쯔 광도파로

광도파로를 제작하여 그 사이에 활성층을 형성함으로써 TM 모드의 전자계를 기판측 금속에 국부화시켜 활성층 모드와의 중첩을 증가시켜 기판으로의 감쇄를 방지하는 구조로 개선되고 있지만<sup>[24]</sup>, 더 나은 성능을 위해서는 새로운 개념의 테라헤르쯔 광도파로 구조의 설계가 필요하다.

또한, 나노 패터닝 기술에 의한 광결정(photonic crystals)을 이용하여 테라헤르쯔 영역의 광도파로 설계하여 좋은 성능이 보고되고 있으며, 발광층으로부터 빛이 잘 빠져나올 수 있게 추출 효율을 높일 수 있다<sup>[25]</sup>.

테라헤르쯔 양자 계단 레이저의 경우, 활성층/주입층의 두께가 ~10~15 μm로 매우 두껍고, 선택적 전자의 주입/제거가 필요하고 그러한 강한 nonradiative 포논 scattering으로 인해 열의 발생이 심각하다. 더욱이 높은 광손실로 인해 테라헤르쯔 radiation을 guiding하는 것이 어렵기 때문에 상온에서는 펄스 동작도 이루어지지 않고 있으므로, 동작 온도의 개선이 필요하다. 따라서 고출력 상온 발진을 위해서는 이러한 활성 영역으로부터 발생하는 열을 잘 확산시킬 수 있는 효율적인 방열 구조를 갖는 epitaxial 층의 구조 설계, 제작 공정 개선, 그리고 방열 패키지 기술 또한 병행되어야 한다.

### 2-3 양자 계단 레이저의 향후 전망

앞에서 살펴본 바와 같이 중·장 적외선 및 테라헤르쯔 영역에서 다양한 응용 분야를 갖는 양자 계단 레이저는 기존의 반도체 레이저와 달리 수 nm 크기의 수백 층의 superlattices로 구성되어 있어 성장 기술이 어렵고, 동작 파장, 동작 온도, 광출력 등의 소자 특성이 epitaxial 성장, 소자 구조 및 제작 공정, 그리고 방열 구조에 밀접하게 관계되어 있으므로 이를 최적화하기 위한 기술 개선이 필요하다. 최근 미국, 유럽의 선진국에서의 활발한 연구를 통해 λ ~ 3~25 μm와 λ ~ 30~300 μm의 파장 영역에서 동작하는 양자 계단 레이저가 제작되고 있으며, 미국 노스웨스턴 대학의 Razezghi 그룹에서 λ ~ 3.8~10.6 μm 영역에서는 DFB 레이저를 포함해 100 mW 이상의 광출력을 가지고 상온 연속 동작이 이루어지고 있으며, λ ~ 4.6 μm의 파장의 경우, ~3 W에 이르는 매우 높은 광출력이 상온 연속 동작에서 얻어지고 있다. 또한, 400 K(102 °C)까지 동작 온도를 가지며 상용화가 이루어지고 있다. 단파장 중적외선, 장파장 장적외선 및 테라헤르쯔의 영역에서 소자 동작의 그 제한 요인이 달라지므로 그 성능 개선을 위해서 주요 설계 및 제작 기술 관점이 다르게 고려되어야 한다. 양자 계단 레이저는 electric filed에 의해 동작하므로 본래 높은 열을 발생시키는 소자이므로 고출력 연속 동작을 위해서는 열 시뮬레이션에 의한 소자의 열 분석을 통해 효율적인 방열 구조를 갖도록 제작되어야 한다. 테라헤르쯔 양자 계단 레이저의 경우 상온 펄스 동작도 얻기 쉽지 않은데, 이를 개선하기 위한 활성층/주입층 구조와 또한 이러한 파장 영역에서 광흡수가 매우 크므로 손실이 작은 표면 플라즈몬 도파로 구조의 개선에 대한 연구를 통해 상온에서의 소자 동작이 실현될 수 있을 것으로 기대된다. 국내에서의 양자 계단 레이저에 대한 연구는 KIST, ETRI에 의해 λ ~ 9 μm에서 동작하는 소자에 대해 AlGaAs/GaAs 및 InGaAs/InAlAs



구조를 통한 연구가 부분적인 수행되었지만, 그 결과는 매우 미비한 실정이므로, 기초 연구를 통한 관련 핵심 기술의 확보가 이루어져야 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. C. Liu, F. Capasso, *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications I*, Academic Press, San Diego CA, 2000.
- [2] F. Esaki, R. Tsu, "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors", *IBM J. Res. Develop.*, vol. 14, p. 61, 1970.
- [3] R. Kazarinov, R. A. Suris, "Possibility of amplification of electromagnetic waves in a semiconductor with a superlattices", *Sov. Phys. Semicon.*, vol. 5, p. 707, 1971.
- [4] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, "Quantum cascade lasers", *Science*, vol. 264, p. 553, 1994.
- [5] M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilegems, E. Gini, and H. Melchio, "Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature", *Science*, vol. 295, p. 301, 2002.
- [6] J. S. Yu, S. Slivken, A. Evans, L. Doris, and M. Razeghi, "High-power continuous-wave operation of a 6  $\mu\text{m}$  quantum-cascade laser at room temperature", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, p. 2503, 2003.
- [7] J. S. Yu, A. Evans, S. Slivken, S. R. Darvish, and M. Razeghi, "Temperature dependent characteristics of  $\lambda \sim 3.8 \mu\text{m}$  room-temperature continuous-wave quantum cascade lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 88, 251118, 2006.
- [8] S. Slivken, A. Evans, W. Zhang, and M. Razeghi, "High-power, continuous-operation intersubband laser for wavelengths greater than 10  $\mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, 90, 151115, 2007.
- [9] L. Diehl, D. Bour, S. Corzine, J. Zhu, G. Höfler, M. Lončar, M. Troccoli, and F. Capasso, "High-power quantum cascade lasers grown by low-pressure metal organic vapor-phase epitaxy operating in continuous wave above 400 K", *Appl. Phys. Lett.*, 88, 209115, 2006.
- [10] J. S. Yu, S. Slivken, S. Darvish, A. Evans, B. Gokden, and M. Razeghi, "High-power, room-temperature, continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at  $\lambda \sim 4.8 \mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, 87, 041104, 2005.
- [11] S. R. Darvish, A. Evans, S. Slivken, J. S. Yu, and M. Razeghi, "Room-temperature high-power continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at  $\lambda \sim 9.6 \mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, 88, 201114, 2006.
- [12] S. R. Darvish, W. Zhang, A. Evans, J. S. Yu, S. Slivken, and M. Razeghi, "High-power, continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at  $\lambda \sim 7.8 \mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, 89, 251119, 2006.
- [13] M. Razeghi, "High-performance InP-based Mid-IR quantum cascade lasers", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, p. 941, 2009.
- [14] "테라헤르츠 (THz) 기술개발 동향", *IITA Report*, 2007년 9월.
- [15] "Emerging Technologies Tera-Hertz (THz) Wave", *IT Soc Magazine Special Report*, 2008년 5월.
- [16] "세상을 바꾸는 빛-테라헤르츠파", *Optical Science and Technology*, 2007년 7월.
- [17] D. H. Yoon, M. H. Kwak, Y. G. Yoo, and H. C. Ryu, "Trend and possibility of terahertz wave technology", *전자통신동향분석* 21, p. 129, 2006년.

- [18] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser", *Nature*, vol. 417, p. 156, 2002.
- [19] B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno, "Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode", *Opt. Express*, vol. 13, p. 3331, 2005.
- [20] A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, S. Kumar, B. S. Williams, Q. Hu, and J. L. Reno "Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225 K", *Nature Photon.*, vol. 3, p. 41, 2008.
- [21] D. G. Revin, J. W. Cockburn, M. J. Steer, R. J. Airey, M. Hopkinson, A. B. Krysa, L. R. Wilson, and S. Menzel, "InGaAs/AlAsSb/InP quantum cascade lasers operating at wavelengths close to 3  $\mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, 90, 021108, 2007.
- [22] 한일기, 김은규, "중적외선 양자폭포 레이저", *새물리*, 49, p. 1, 2004년.
- [23] S. L. Chuang, *Physics of Optoelectronic Devices*, John Wiley & Sons Canada, Ltd., 1995.
- [24] Benjamin S. Williams, "Terahertz quantum-cascade lasers", *Nature Photon*, vol. 166, p. 517, 2007.
- [25] Y. Chassagneux, R. Colombelli, W. Maineult, S. Barbieri, H. E. Beere, D. A. Ritchie, S. P. Khanna, E. H. Linfield, and A. G. Davies, "Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions", *Nature*, vol. 457, p. 174, 2009.

≡ 필자소개 ≡

유재수



2002년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)

2002년 3월~2002년 9월: 광주과학기술원 초고속네트워크 ERC 연구센터 연구교수

2002년 10월~2006년 8월: 미국 노스웨스턴대학교 양자소자센터 연구원

2006년 9월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 조교수