

테라헤르츠 신호원 개발

강광용 | 백문철 | 정세영 | 강승범 | 곽민환
한국전자통신연구원

요약

본고에서는 테라헤르츠 광 신호의 발생과 검출을 위한 다양한 기술에 대하여 리뷰하였다. 이들 중 테라헤르츠 광원 기술로서 중요도가 높은, 광전도 신호원, 파라메트릭 신호원 및 차주파수 방식의 신호원 기술을 논의하고, 전자 주입형 양자폭포레이저(Quantum Cascade Laser) 방식과 광혼합(Photomixing) 방식의 신호원 기술 및 이와 관련된 결과와 개발된 테라헤르츠 광신호원의 성능에 대하여도 소개한다.

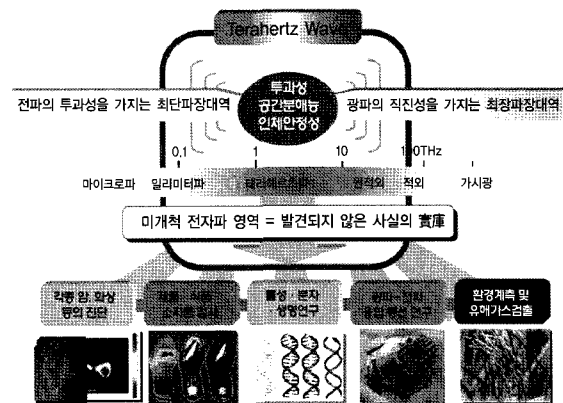
I. 시작하면서

테라헤르츠(THz)-파는 주파수로는 0.1~10 THz (1THz=10¹²Hz) 영역에 위치하고, 파장으로는 3mm~30 μ m 범위를 점유하는 전자기파이다. 즉 기존의 반도체 기반의 고속 트랜지스터를 이용한 밀리미터파(서브-밀리미터파) 대역과 반도체 레이저를 이용한 원적외선(FIR) 전자기파 사이의 주파수 대역에 해당되는 전파자원자원이라고 할 수 있다. 한편, THz-파 기술은 다양한 과학기술 범주의 경계에 위치하여, 많은 학문분야의 발전을 촉진하는 융합형 과학기술 성격이 매우 강하기 때문에, 현재의 상상을 뛰어넘는 새로운 과학적 발견과 광범위한 응용(상용)기술의 창출에 크게 활용될 수 있다고 인식을 같이하고 있다. 특히, (그림 1)에 나타낸 바와같이 물질과의 상호작용(Interaction)을 고려할 때, 광파(Lightwave : Photon)의 직진성과 전파(Radiowave :

Electron)의 투과성 2가지 특성을 모두 가지고 있기 때문에 순수과학적인 관점에서 매우 흥미로운 연구대상이며, 기술적인 면에서도 핵심성과 첨단성을 두루 갖추고 있으며 점차 전세계적인 이슈가 되고 있다[1].

II. 테라헤르츠(THz) 광원

THz 광의 응용범위는 전술하 바와 같이 그 응용분야가 대단히 넓다. THz-파가 여러 가지 물질을 투과하고, 수백 μ m(미크론미터)의 분해능을 보유하고 있으며, 특히 인체에 무해하다는 뛰어난 특징을 가지고 있다. 또 시약류(분말류, 마약류 및 병원균, 생체류 등)에 대한 THz 대역의 지문(Finger print) 스펙트럼 때문에 각각의 식별이 가능하고, 또



(그림 1) 테라헤르츠파의 특징과 응용분야

한 물분자에 대한 흡수가 크지만 물과 얼음에서의 흡수차이를 확연히 구별하며, 반도체 불순물(도핑정도)에 대한 감식 등 다른 주파수 대역에서는 볼 수 없는 특징을 보여준다. 또한 넓은 대역에서 파장 변화가 가능하고(tunable), 코히런트 THz-광원은 소재물성, 분자광학, 생명과학 및 생화학, 약품과학, 의료영상 등의 기초과학에서 대기관측, 가스감지, 식품검사 및 암세포 진단 등에 활용가능성을 높혀가고 있다[2, 3, 4, 5].

테라헤르츠 주파수 영역에서 사용되는 광원은 크게 코히런트(coherent) 광원과 인코히런트 광원으로 나눌 수 있다. 코히런트 광원은 레이저 기술을 기반으로 한 신기술(Technology)에 해당한다. 한편, 과거부터 사용했던 인코히런트 광원은 흑체복사(Blackbody radiation)나 수은램프가 이에 해당된다. 인코히런트 광원을 이용하여 상온에서 THz-파를 측정할 경우, 주위환경(Background, 열적잡음)에 신호가 묻혀 검출효율이 향상되지 않는다는 심각한 문제가 있었지만, 코히런트 광원의 출현에 의해 검출효율은 비약적으로 증대하였고, 시간영역(Time Domain) 퓨리에 분광기술에 기초한 백그라운드 퓨리에 측정도 가능하게 되었다.

코히런트 THz-파 발생법에는 레이저를 여기광원(Excited source)으로 이용하는 방법과 전류주입(Current injection)에 의한 방법이 있다. 전자의 경우는, 1) 펨토초(Femtosecond) 펄스-레이저에 의해 여기된 반도체 소자(안테나와 반도체 표면 등)나 비선형 광학결정에 의한 발생법, 2) 두 대의 레이저 주파수를 이용한 차주파수(差周波數)에 의한 발생법, 3) 비선형 디바이스를 이용한 파라메트릭(Parametric) 발진기에 의한 발생법 등이 있다. 후자의 경우는, 1) 소규모 소자인 양자폭포레이저(QCL: Quantum cascade laser)나 2) 대규모 시스템인 자유전자 레이저(FEL: Free electron laser)를 사용하는 방법 등이 있다. 펨토초 레이저의 여기(Excitation)를 이용하는 THz-파 발생법에는 광전도 안테나(Photoconductive antenna: PCA), 광정류(Optical Rectification) 효과, 반도체 표면, 반도체 초격자(Superlattice) 및 초전도체를 이용하는 등 다양한 발생법이 있다. 그 중에서도 광전도 안테나는 THz-파 발생 뿐만 아니라 검출에도 이용할 수 있기 때문에 대표적인 THz-파 발생·검출 소자이다[5, 6].

한편, 비선형 광학결정을 이용하는 THz-파 파장가변광원(Wavelength Tunable Source)으로서 파라메트릭

(Parametric) 광원, 차주파수(Frequency Difference) 발생에 의한 광원, 광정류를 이용한 광원 등이 주로 개발되고 있다. 이들 광원은 고휘도(Brightness), 고코히런스(Coherency), 광대역 파장가변 특성, 좁은 발진선폭(Oscillation Bandwidth) 등의 특징을 가지고 있을 뿐만 아니라, 실온에서 동작하는 소형 광원으로서 광범위한 응용이 기대된다[6, 7, 11, 13].

특징적인 다른 발생법으로는 양자폭포레이저로 대표되는 다양한 THz 소자로부터 자유전자레이저(Free Electron Laser: FEL)에 이르는 광범위한 분야에서 폭넓게 광원개발이 수행되고 있으며 선진국 주도로 각축장을 형성하고 있다. 자유전자 레이저는 거대한 시설이 필요하기 때문에 대학이나 기업체가 쉽게 소유할 수 있는 장치(시스템)가 아니다. 따라서 현재로서는 범용적이라고 할 수 없지만 의료응용, 재료개발, 데이터베이스 구축 및 기초과학용으로는 매우 중요하다[8].

특히, 테라헤르츠 양자폭포레이저(THz-QCL)는 최근 급격한 발전을 이루고 있으며, 펄스 발진(Oscillation)의 경우 액체질소 온도에서도 구동할 수 있는 기술수준까지 완성되어 있으므로, 향후 실온동작이 가능해지면 널리 이용될 것으로 전망된다[9, 15].

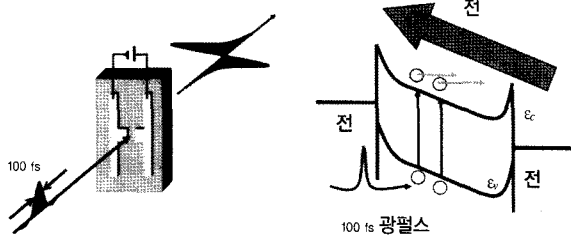
따라서 본고에서는 다양한 THz-파 발생방법 중에서, 연구개발의 비중을 고려하여 펨토초 광펄스와 반도체를 이용한 THz-파 발생과 비선형 광학결정을 이용한 THz-파 발생방법, 양자폭포레이저를 이용한 THz-파 발생방법, 포토믹싱 방법 등을 논의하고자 한다.

2.1 반도체 기반의 광전하 발생을 통한 테라헤르츠파 발생

펨토초 광펄스로 반도체 내에 전하(charge)를 생성시키고, 전하의 이동에 의해 THz-파를 발생시킬 수 있다. 이는 통상적인 안테나에서 발생하는 전자파를 고속으로 발생시키는 경우로서, 단순히 전류의 미분에 비례하여 방사(emission)되는 전장에 의한 것으로, $E(r,t) \propto dj(t)/dt$ 로서 설명할 수 있다. 다시말하면, 전류의 시간변화가 1 피코초(pico second) 정도로 빨리 변화하는 경우, 테라헤르츠 성분을 갖는 THz-파를 발생시킬 수 있다. 이러한 전류의 고속 변조(modulation)를 담당하는 핵심소자로서 반도체 기반의 광전

도 안테나(Photoconductive Antenna) 및 반도체 기판 표면이 많이 활용된다. 현재 보급/상용화 되어있는 펨토초 레이저의 파장이 약 800 nm이므로, PCA용 반도체로는 GaAs계가 주로 이용된다. 특히, 분자선 에피택시(Molecular Beam Epitaxy) 장비를 이용하여 저온에서 성장한 LT(Low Temperature growth)-GaAs의 경우, 발생강도가 강하며 또한 검출소자로서도 사용할 수 있는 잇점 때문에 많이 활용된다.

예를 들어, (그림 2.1)과 같은 쌍극자 안테나(Dipole Antenna : 5 μ m의 광전도 갭을 가짐)를 반절연성(SI-Semi-insulation)의 GaAs 기판 상에 제조하고, 높은 전장을 인가한 상태에서 초단 펄스광을 조사(Irradiation)한다. 이 결과 광여기된 전하는 순간적으로 전류를 발생시켜 반도체 내부를 흐르고, 쌍극자 방사기구에 의해 전자기파가 외부로 방사된다. 발생시, 자유공간과의 결합효율을 향상시키기 위하여 THz-파가 투과하는 실리콘(Si) 반구형(Hemispherical) 렌즈와 결합하여 활용하는 경우가 많다.반도체 표면에서 발생하는 기구(메카니즘)은 표면에 존재하는 빌트인(built-in) 전장에 의해 동일하게 순간적으로 전류가 발생하는 경우와 여기된 전하가 확산으로 이동하는 경우(이를 전극전장전극광펄스 광 뎀버(Demver) 효과라고 함)가 있지만, 사용하는 재료와 여기 조건에 따라 변화한다[10].



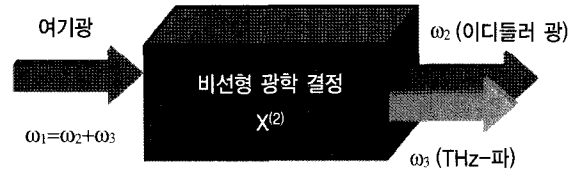
(그림 2.1) 광전도 안테나로부터의 테라헤르츠파 발생 기구 (메카니즘)

2.2. 파라메트릭 발생 및 차주파수 발생

[1] 파라메트릭 테라헤르츠파 발생

파라메트릭(Parametric) 광원은 광강도가 강한 펄스 여기광(Pump beam)을 비선형 광학결정에 입사했을 때, 광학적으로 활성화된 포논(Phonon)과 THz-파를 혼성한 폴라리톤

(Polariton)에 의한 유도(誘導) 라만(Raman)산란으로 인하여 입사 여기광과 파장이 약간 다른 아이들러(Idler beam)과 THz-파(Signal beam)가 강한 파라메트릭 상호작용(효과)을 일으켜 발생한다. 이러한 상호작용 효과를 (그림 2.2)에 나타내었다.

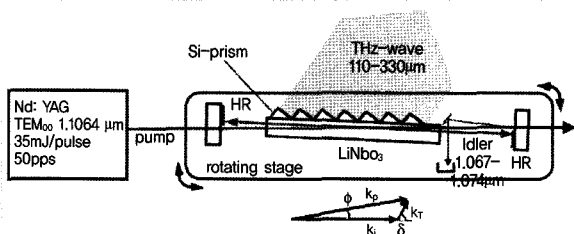


(그림 2.2) 파라메트릭 THz-파 발생 메카니즘

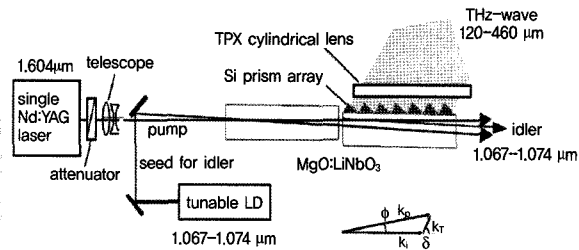
파라메트릭 광원 개발은 주로 이화학연구소(RIKEN, 일본), 도호쿠(동북, 일) 대학, 나고야대학, ETRI(한)에서 수행되고 있으며, 비선형 광학결정으로는 니튬나이오베이트(LiNbO₃) 단결정을 이용하고, 1~3 THz(파장, 100~300 μ m) 부근을 아우르는 파장가변 광원을 실현하고 있다. 이 광원을 테라헤르츠파 파라메트릭 광원이라고 말하며, 발생방법에 따라 크게 두 가지로 분류된다. 한가지는 발생하는 아이들러광에 대해 공진기(Resonator) 구조를 가지지 않은 THz-파 파라메트릭 발생기(TPG = Terahertz Parametric Generator)이고, 다른 한가지는 공진기 구조를 가진 THz-파 파라메트릭 발진기(TPO=THz Parametric Oscillator)이다((그림 2.3)에 TPO의 개요도를 나타내었다).

THz-파 파라메트릭 광원의 경우, 여기광으로서 Q-스위치 Nd: YAG 펄스-레이저(1.064 μ m)를 사용하며, 위상정합(Phase matching)이 성립하는 각도에서 아이들러광(1.07 μ m)과 THz-파가 비동일선상(Non-collinear)에 발생한다. 그렇기 때문에 연속적으로 파장선택을 할 수 있도록 독특한 제어방법이 개발되었다. 구체적으로 말하면, TPG에서는 공진기 구조를 갖지 않기 때문에 각도 방향에서 넓은 위상정합을 만족하며, THz-파 발진선폭은 500 GHz 이상이 된다. 그 방법에 대응하여, 모드 도약(Mode hop)이 없도록 반도체 레이저를 이용한 광주입(Photo-injection)을 도입하면, 파장 선택 기구(메카니즘)와 THz-파의 선폭을 수백 GHz로부터 푸리에 한계인 약 100MHz까지 협대역(Narrow)화하고,

동시에 피크(Peak) 출력을 수 mW에서 수백 mW로 크게 향상시킬 수 있다. 이와같은 광주입 방법에는 반도체 레이저의 파장을 제어함으로써, 자동적으로 위상정합 각도를 만족시키는 구조(Acromatic phase matching)도 아울러 개발되었으며, (그림 2.4)에 Injection-seeded TPO의 개요도를 나타내었다.



(그림 2.3) THz Parametric Oscillator(TPO)의 개요도

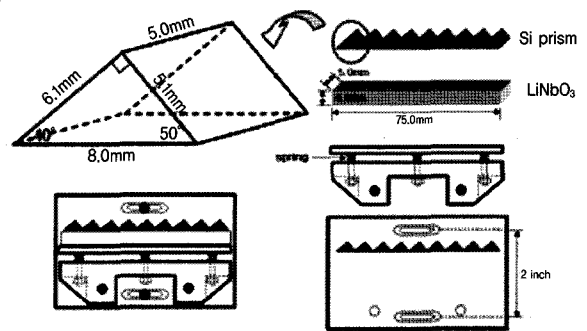


(그림 2.4) Injection-seeded THz 파라메트릭 발생기의 개요도

그리고 TPO에서는 파장가변 기구로서 두개의 거울(Mirror)를 사용하여 아이들러광을 왕복시키는 패브리 페로(Fabry-Perot) 공진기를 사용한다. 이러한 공진기 전체를 고정밀(각도 분해능(0.06초) 회전 스테이지를 통해 제어하는 방식과 세개의 거울로 구성된 링형(Ring type) 공진기 중에서 한개의 거울을 회전·제어함으로써 아이들러광의 광축을 고속 및 무작위(Random)로 변화시키는 방법을 실현하고 있다.

한편, 비선형 광학결정으로서 5mol% 산화마그네슘(MgO)이 첨가된(Doping) 리튬나이오베이트(MgO: LiNbO₃) 결정을 사용한 결과, 무첨가(순수한) 리튬나이오베이트(LiNbO₃) 결정을 사용한 결과에 비해 출력이 5배정도 증가하였다는 보고도 있다. 또한 여기광에 비해 THz-파가 발생하는 각도가 65° 정도로 클 경우, THz-파가 LiNbO₃ 단결정(굴절률: 5)

내에서 전반사하는 것을 막기 위하여 실리콘(Si) 프리즘(굴절률: 3.4)을 사용함으로써 효율적으로 추출할 수 있다. (그림 2.5)에는 실리콘(Si) 프리즘의 제작규격과 LiNbO₃ 단결정과 접합상태 그리고 THz-파 발생시스템의 핵심모듈(fixture)로서 제작된 THz-파 파라메트릭 발생모듈을 나타내었다[11].

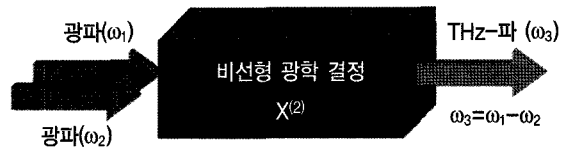


(그림 2.5) Si-프리즘과 slab형 LiNbO₃ 단결정을 결합시킨 THz-파 파라메트릭 발생모듈(ETRI의 연구결과)

[2] 차주파수 THz-파 발생

차주파수 혼합(DFG: Difference Frequency Generation) 방식에 의한 THz-파 발생은 (그림 2.6)에 나타난 바와 같이 비선형 광학결정에 파장이 약간 다른 두 개의 근적외(Near-IR) 광을 입사한 후, 포논-폴라리톤을 여기시켜 차주파수에 해당하는 THz-파를 추출하는 방법이다. DFG에 의하여, THz-파를 발생시키는 경우는 광대역 파장가변성(특히, 3 THz 이상)과 고출력화를 목표로 하며, 파장변환 효율이 높은 선형(Linear) 광학결정이나 THz-파를 비교적 적게 흡수하는 작은 크기의 단결정을 이용한 기술 등이 있다.

그리고 이러한 목적에 사용되는 단결정에는 무기·유기재료로서 GaP, GaSe, ZnGeP2(ZGP), DAST(4-dimethylamino-



(그림 2.6) 차주파수 THz-파 발생 메카니즘

N-methyl-4-stilbazolium-tosylate) 등이 이용되고 있다[12].

일본의 반도체 연구소 등의 연구개발 그룹에서는 GaP 결정을 이용한 DFG를 개발하고 있는 바, 입력하는 두개의 광중에서 하나는 Q-스위치 Nd:YAG 레이저로부터 발생되는 기본파는 $1.064 \mu\text{m}$ 이며, 다른 한가지는 파장변환 효율이 좋은 $\beta\text{BaB}_2\text{O}_4$ (BBO) 결정을 이용한 광 파라메트릭 발진기(OPO=Optical Parametric Oscillator)를 이용하며, Nd:YAG 레이저로부터 3배파($0.355 \mu\text{m}$)를 입사시켜 기본파의 파장과 약간 다른 근적외광을 발생시킨다. 그리고 BBO결정을 회전시켜 $1.035 \sim 1.063 \mu\text{m}$ 범위에서 OPO의 파장을 가변할 수 있으며, 발생시킨 2파장 근적외선광을 GaP 단결정에 위상정합 각도로 입사시켜 THz-파를 발생시킨다. 이 방식의 경우, THz-파의 파장가변 뿐만 아니라 OPO의 회전제어, 각도위상정합 제어를 동시에 실행해야 하므로 제어가 복잡하다.

이러한 방식에서, 성능을 높이고 파장, $40 \sim 1000 \mu\text{m}$ (주파수: $0.3 \sim 7.5 \text{ THz}$)의 광대역 가변성과 입력 에너지를 최대한 피크 파워가 800mW (2.5 THz)에 이르는 고출력 특성 구현이 가능하다. 다만, 출력되는 THz-파의 발생 방향은 파장이 짧을수록 입사하는 근적외광에 대해서 각도가 커진다. 특히 5.5 THz 이상을 발생시키는 경우에는 전반사되지만, 결정을 회전시켜 전반사를 방지하고 있다. 그러나 이와같이 일정한 방향으로 THz-파를 유도하는 경우에는 외부에서 파장변화에 맞추어 조정할 필요가 있다.

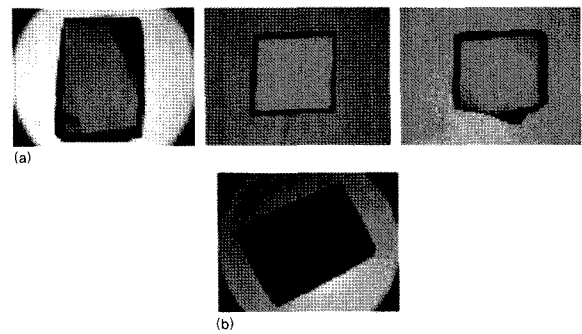
한편, 동일선상(Collinear)의 위상정합 배치에서 차주파수 혼합(DFG) 방식으로 THz-파를 발생시키는 경우에는 코히런스 길이를 크게 할 수 있는 여기광 파장을 선택하여 구현한다. 일본의 반도체 연구소 연구그룹에서는 파장 $940 \sim 1000\text{nm}$ 범위의 2파장을 여기광원으로 이용함으로써 파장 $70 \sim 600 \mu\text{m}$ (주파수: $0.5 \sim 4.5 \text{ THz}$)의 파장가변성과 1.2mJ/pulse 의 입력 에너지에 대해 5nJ/pulse (2.6 THz)출력을 구현하였다. 이러한 발생 방식은 동일선상 위상정합을 위하여 파장을 변화시켜도 THz-파의 발진방향이 변화하지 않는다는 특징이 있으므로 응용면에서 매우 유리하다. 동일선상 위상정합 배치에서는 GaP 단결정 이외에도 일본 반도체연구소와 미국 Lehigh 대학 등에서는 GaSe 결정이나 ZnGeP2 (ZGP) 단결정을 이용한 결과를 보고하였다[13].

GaSe 단결정을 사용하는 경우, $58 \sim 4300 \mu\text{m}$ (주파수:

$0.07 \sim 5.2 \text{ THz}$)의 파장가변과 3.1 THz 에서 15mW 의 출력을 구현하였고, 또는 다른 연구결과에서는 출력 69.4W (1.53THz) 등으로 고효율 출력이 가능하다고 보고하고 있다. 실험시스템을 고려하면, 입력 2파장의 편광방향이 서로 다른 광학배치(oe-e, oe-o)에 의해 파장 가변범위는 각각 $83.1 \sim 1642 \mu\text{m}$ (주파수 P : $0.18 \sim 3.61 \text{ THz}$)와 $80.2 \sim 1416 \mu\text{m}$ ($0.21 \sim 3.74 \text{ THz}$)가 구현되었고, 출력도 각각 36W , 19W 이며 사용하는 단결정에 따라서는 한 자릿수(Order) 정도 더 큰 경우가 있다고 보고하였다.

(그림 2.7)에 나타낸 바와 같은 유기 DAST 결정은 특히 3THz 이상의 고주파 영역에서 분산, 흡수가 모두 비교적 적어 광대역 THz-파 발생에 효과적이다. DAST 결정의 THz-파 및 광 특성을 고려해, 동일선상 위상정합에서 파장, $15 \sim 50 \mu\text{m}$ (주파수 : $2 \sim 20 \text{ THz}$)의 광대역 파장가변 광원을 구현하고 있다[14].

한편, 동일선상 위상정합을 실현하기 위하여 코히런스 길이가 길어지는데 적합한 $1.4 \mu\text{m}$ 대역의 입력 2파장 광파를 Nd:YAG 레이저로 여기하는 KTP결정기반의 OPO를 이용해 THz-파를 발생시키는 연구도 있다.



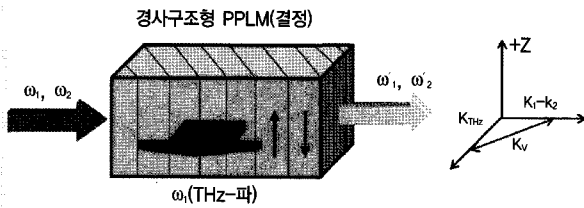
(그림 2.7) (a) 대표적인 유기 DAST 단결정, (b) 교차한 편광자 하부에 놓여진 DAST 단결정(결정방식은 참고문헌)

발생하는 THz-파의 특성은 결정성에 크게 의존하는데, 상기 GaSe 결정과 ZGP결정, GaP결정, DAST결정에서 현재로는 결정 품질의 제어가 충분하지 않으며, 결정 성장에서 결함이나 전위를 포함하기 쉬운 경향이 있기 때문에 품질을 향상시키는 기술 개발이 기대된다.

이제는 보다 고효율화를 실현하는 방법으로서 주기분극반

전(Periodically poled) 비선형광학 (Nonlinear optic) 결정을 이용한 의사(Pseudo-) 위상정합 방식에 의한 차주파수 THz-파 발생 방법을 소개한다. 이 방법에서는 벌크 단결정보다 효율적으로 THz-파를 발생시킬 수 있으며, 광대역 파장가변 이라기보다는 필요한 영역으로 압축해서(좁혀서) 고성능 광원을 구현할 수 있도록 분극반전 주기 등을 유연하게(Flexible) 디자인한 점이 핵심이다.

여기에서 (그림 2.8)에 나타낸 그리고 현 단계에서 제작기술이 확보되고 있는 주기분극반전(Periodically Poled) LiNbO₃ 결정(일반적으로, PPLN이라고 함)이 주로 사용되고 있다.



(그림 2.8) 경사구조형 PPLN을 사용한 테라헤르츠파 발생

특히, LiNbO₃ 단결정은 비교적 THz-파를 많이 흡수하므로 결정으로부터 THz-파를 추출하는 방법이 많이 고려되었다. 즉, 일본의 동북(도호쿠)대학 그룹에서는 2파장(ω₁, ω₂) 여기광을 입사하면 PPLN에 대해 수직방향으로 결정축면에서 THz-파를 추출함으로 THz-파 흡수를 감소시키고 있다.

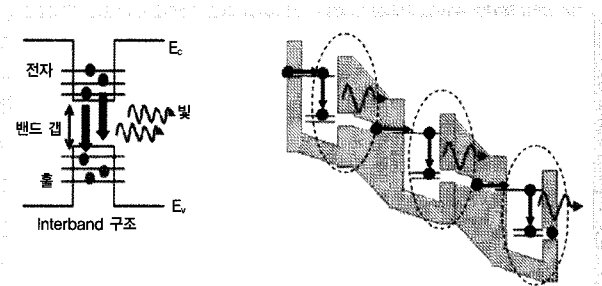
(그림 2.8)에서 보는 바와 같이, 경사진 주기분극반전 LiNbO₃ 단결정에 의한 표면에서 출력하는 차주파수 방식의 THz-파 발생방법을 제안해 구현한 것이다. 경사진 주기분극반전은 결정 내에서 발생한 THz-파가 서로 상쇄되지 않도록 외부로 방출되게하고, 입력 2파장 여기광에 대해서도 위상정합을 취할 수 있도록 고안된 것이다. 입력 2파장(ω₁, ω₂) 광파는 Nd:YAG 레이저를 여기광원으로 사용하고, PPLN-OPO 및 PPLN 광 파라메트릭 앰프(OPA)로서 1.5 μm대의 2파장(ω₁, ω₂) 광파를 발생시킨다. 그리고 결정온도 조절에 따른 파장변화로 168~240 μm(1.25~1.8 THz) 범위의 파장가변성을 실현하고 있다. 출력(Output power)은 입력 2파장의 에너지가 0.82mJ/pulse일 경우, 최대 0.32pJ/pulse를 얻고 있다.

그외에도 독일 Kaiserslautern 대학이나 미국 Michigan 대학 등에서 펄스초 펄스-레이저를 이용하고 광정류효과에 의해, PPLN 결정 표면에서 THz-파를 발생시키는 방법도 실현하였다. 이 경우, 파장동조(Wavelength tuning)를 얻기 위해 1) 결정의 각도를 변화시키는 방법, 2) 분극반전이 다른 결정을 사용하는 방법, 그리고 3) 결정 내에서 분극반전의 폭이 연속적으로 변화하도록 디자인된 PPLN을 사용하여 여기광 입력위치를 변경하는 방법 등이 보고되었으며, 특히 후자(3)의 경우 0.8~2.5THz의 동조 범위를 얻고 있다.

의사(Pseudo-) 위상정합 방식에 의하여 차주파수 THz-파를 발생시키는 경우, 입력하는 여기광의 선택이나 발생하는 THz-파를 추출하는 방법 등에 의해 주기분극반전을 디자인할 수 있으며, 비교적 THz-파의 흡수가 큰 결정에 대해서도 표면 발생으로 흡수를 경감할 수 있는 등 유리한 특징을 가진다.

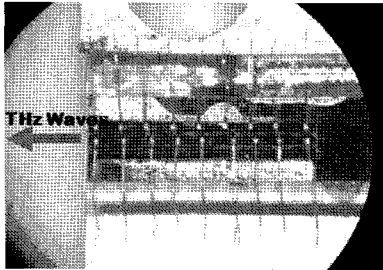
2.3. 테라헤르츠 대역 양자폭포레이저

‘캐스케이드(폭포)’란 연속적인 계단형 폭포를 의미한다. 분자선 에피택셜 결정성장(MBE)방법 등에 의해 제조된 양자역학적 계단을 전자가 한단씩 내려올 때마다(서브 밴드간 천이에 의해) 발생하는 광자를 이용하는 새로운 형태의 반도체 레이저를 양자폭포레이저(QCL: Quantum Cascade Laser)라고 하며, (그림 2.9)에 Interband 구조와 QCL 개요도를 나타내었다. QCL은 반도체 양자우물(Quantum well)구조에서 서브-밴드간 광학천이(Inter-band optical transition)를 이용한 레이저로서 중적외(Mid Infrared) 영역(4~13 μm)에서 실은 동작하는 유일한 반도체 레이저이다.



(그림 2.9) Interband 구조와 양자폭포레이저의 모식도: 계단을 하나씩 내려갈 때마다 광자가 하나씩 발생하므로, 단수를 많게 하면 고출력화가 가능하다.

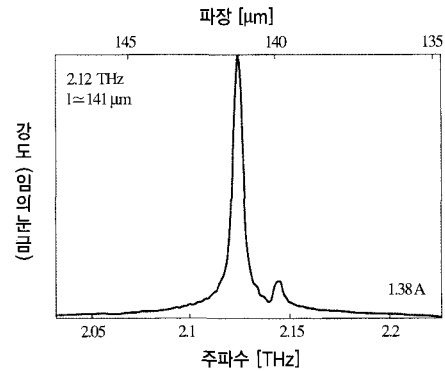
그리고 일본 NICT, Hosaco 그룹에서 개발한 GaAs/AlGaAs 박막을 이용하여 제작한 THz 양자폭포레이저(성인 손톱의 1/6 정도 크기임. 단, 실온동작은 아님)을 나타내었다[1].



(그림 2.10) 일본 NICT, Hosaco 그룹에서 개발한 GaAs/AlGaAs THz-QCL(480 모델)

이러한 QCL은 결정성장하는 기술에 의해 밴드구조를 인공적으로 제어할 수 있기 때문에, THz 대역까지 파장을 길게 할 수 있다. 활성 영역 내에서는 한 개의 전자가 한 개의 광자를 발생시킨 후에 재이용되어(Carrier recycling) 다시 광자를 발생한다. 이를 반복하면 고출력화가 가능하고 THz 대역용 소형 고출력 반도체 레이저도 기대할 수 있다. THz 대역에서의 레이저 발진은 2002년 이탈리아의 그룹에 의해 실현되었으며, 그 이후 영국, 프랑스, 스위스 등의 유럽 제국 및 미국을 중심으로 정력적으로 테라헤르츠대 QCL의 연구가 이루어지고 있다. 일본에서는 동북(도호쿠) 대학, NICT 및 히로시마대학 등에서 중적의 QCL 연구가 진행되고 있다. 그리고 한국에서는 KIST, ETRI, 경희대학교 등에서 연구를 진행하고 있지만 선진국에 비해서는 초보단계에 머물고 있다. 최근까지 레이저 발진 파장역은 65~160 μm (0.4~2.1 THz), 광출력은 약 10mW(연속발진시), 임계 전류밀도 $J=100\sim 300 \text{ A/cm}^2$ 정도였고, 액체질소온도(77K) 이상에서의 동작온도를 얻고 있지만, 선진국을 중심으로 THz 기술연구에 매진하고 있는 주요연구 팀에서는 양자소자인 QCL의 중요성 때문에 많은 투자를 하고 있고, 성능도 전술한 것보다 더 많이 향상되고 있다.

광출력은 캐스케이드 구조의 단수를 늘리면 비교적 용이하게 증가시킬 수 있다. 동작온도 향상(실온동작이 목표임)과 발진파장의 장파장화(THz 대역용)는 어려운 과제이지만 착실하게 진행되고 있다. MIT 그룹에서는 2005년에



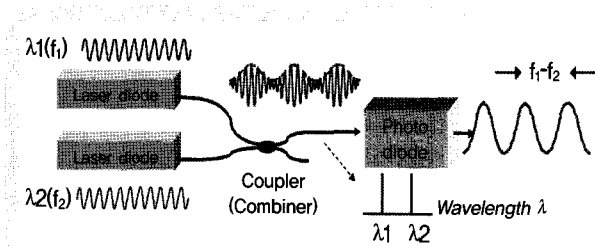
(그림 2.11) THz 대역용 양자폭포레이저(QCL)에서 2.12THz파를 발생하는 연구결과

2.12THz의 장파장에서 발진을 달성하고 있으며(그림 2.11 참조), 또한 3THz의 소자는 펄스파장 발진 모드에서 164K에서의 동작을, 연속파장 발진 모드에서는 117K에서의 동작을 실현하고 있다. 장파장화를 제한하고 있는 핵심요인으로 서 서브 밴드의 에너지 간격이 좁아지면서 원하는 서브 밴드에 선택적으로 캐리어를 주입하기 어려운 점을 들 수 있다. 그리고 동작온도를 높이는 연구를 제한하고 있는 주요 요인은 온도 상승과 함께 여기(excited) 준위의 캐리어가 열(熱)여기되어 포논에 의해 산란이 쉬워져 비방사(Non-emission) 재결합 시간이 단축된다는 것이다. 향후 연구개발이 진행되어, 새로운 활성층 디자인이 창출될 뿐 만아니라 공진기 구조가 최적화될 것으로 전망되고 있다. 그렇게 될 경우, 1 THz 정도의 장파장화(전자소자의 고주파화에 의해 도달가능하다고 고려되는 주파수의 상한값)가 실현되어, 테라헤르츠갭(THz-gap)이 해소될 것으로 생각된다. 또한 가시광선과 적외선(IR) 반도체 레이저가 주변에서 다양한 기기로 응용되고 있듯이, THz-QCL의 실온동작도 실현되어 범용으로 손쉽게 사용할 수 있는 날이 그리 멀지는 않는 것으로 전망되고 있다. 현재 스위스의 벤처 회사가 액체질소 냉각의 THz 대역 QCL을 시판화하고 있으므로 수입해서 사용하는 것도 가능하다[9, 15].

2.4. 광혼합(모토믹싱) 기술

THz-파를 발생하는 광원 기술에는 직접 테라헤르츠 주파수의 전자파를 발생시키는 레이저를 이용하는 방법 이외에 원하는 주파수(대략 THz)만큼 떨어진 두개의 광파를 발생

하고 중합시켜 포토 다이오드 등으로 자승 검파하여 비트 주파수(차주파수)로서 발생시키는 방법이 있는 바, (그림 2.12)에 나타내었다. 광원에는 레이저 다이오드와 CW 티탄(TiO₂) 사파이어 레이저 등이 이용되는데, 광전(O/E) 변환 소자로서 광통신대역을 이용할 수 있으며 광통신용으로 개발된 고성능 광컴포넌트로 구성할 수 있다. 또한 손실이 적은 광섬유를 이용해 멀리 떨어진 장소로 THz-파를 전송할 수 있는 이점이 있어 실용상 중요한 기술이다. 여기서는 통신광대역 반도체 레이저를 이용한 테라헤르츠대역의 주파수에 차이가 있는 두 파장의 광파 발생방법 및 광섬유를 이용한 다파장 광원에 대해서만 기술한다. 다파장 광원에는 광섬유를 이용해 테라헤르츠대역 주파수가 다른 두 개의 광파를 선택한다[16, 17].



(그림 2.12) 2파장 발생 광원을 이용한 테라헤르츠 발생방법

(1) 2대의 반도체 레이저를 이용하는 방법

2파장 광파를 발생시키기 위해서는 파장이 다른 2대의 DFB 레이저의 출력광을 중합시키는 방법이 있으며 가장 간단하다. 두 대의 DFB 레이저의 파장 차이(주파수 차이)를 선택함으로써 임의의 비트 주파수를 발생시킬 수 있으며, 원리적으로는 빛의 주파수 정도까지 가능하다. 이 방법의 문제점은 주파수 안정성으로, 예를 들어 두 대의 DFB 레이저의 온도차가 1°C 정도인 경우 주파수 차이는 수 GHz 정도 발생한다. 이 주파수 드리프트(drift)를 억제하기 위해서는 광파의 주파수를 안정시키거나 주파수 차이를 안정시킬 필요가 있다.

(2) 모드 동기 반도체 레이저

또 하나의 다른 방법으로서 다(multi)모드 발진 반도체 레이저를 이용해 그 중 2개 모드의 비트를 취하는 방법이 있다. 모드 동기 반도체 레이저는 공진기내를 왔다갔다(주회)

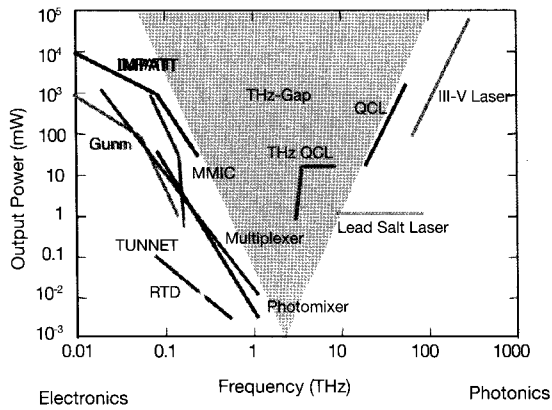
하는 광펄스를 반복적으로 변조함으로써 광펄스를 발생시키는 레이저로, 주파수 영역에서 보면 주회 주파수에 대응하는 간격으로 나열된 다모드 스펙트럼을 가진다. 따라서 임의의 2개 종모드를 발취하면 반복 주파수의 정수배가 되는 고조파 발생이 가능하다. 특히 능동 모드로 동기화하는 경우, 종모드 간격은 외부에서 인가하는 변조 주파수에 일치하며, 분리된 두개의 종모드의 간격(gap)도 전기적인 정밀도를 가지고 있다. 즉 발생하는 THz-파는 주파수 드리프트(Drift)가 없으며, 기대되는 스펙트럼 선포는 이용하는 고주파 발진기의 선포 정도가 된다. 한편 수동 모드로 동기화하는 경우에는 기본적으로 고조파 변조가 불필요하기 때문에 1 THz을 초과하는 높은 반복시간 주파수를 얻을 수 있다. 그러나 주로 캐리어 밀도 변동에 의해 시간 지터(jitter)가 비교적 크다는 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 일반적으로는 반복 주파수에 일치하는 전기 신호를 중첩하는 하이브리드 모드 동기가, 반복 주파수가 높고 전기적 변조가 곤란한 경우에는 반복 주파수 1/정수 배의 광펄스열을 주입하는 서브-하모닉 광 싱크로너스 모드 동기법이 이용된다. 서브-하모닉 광 싱크로너스 모드 동기법에 의하면 480GHz의 안정적인 광펄스열이 발생할 수 있다.

III. 결론 : 테라헤르츠 광원의 특성

각종 THz 대역 전자파원(또는 광원)에 대한 단일소자 출력(주파수-출력 관계)을 (그림 3.1)에 나타낸 바와 같이, 반도체 소자(레이저) 등 소형소자를 중심으로 실었다.

3.1 연속파(CW) 광원

(그림 3.1)에 나타낸 바와 같이, THz 단일 소자류의 튜닝 범위는 좁지만, 동일한 원리로 구조와 조성을 변경하여도 표시되어 있는 범위를 커버할 수 있다. 특히, Photomixer (UTC-PD)는 2광파의 주파수 차이를 조정해 단일 소자로 도시되어 있는 범위를 커버할 수 있지만, 다른 전자소자는 주변회로 구성에 의해 튜닝 범위가 결정된다. 중요한 점은 THz-QCL이 테라헤르츠 캡을 매우고 있다고 판단된다.



(그림 3.1) 테라헤르츠대역 연속파(CW) 광원의 출력

3.2 펄스 광원(피크 파워)

DAST 결정에 의한 차주파 발생, 인젝션 시드 테라헤르츠 파 파라메트릭 발생(TPG), THz 파라메트릭 발진기(TPO), 주기적 분극 반전 LiNO₃ 결정(PPLN)에 의한 THz-파 발생 특성을 논의하였다. 특히, 펄스 광원의 응용 시 중요한 파라미터는 피크 출력력이므로 여기서는 피크 출력을 주로 설명하였다. 피크 출력만 놓고보면 테라헤르츠 갭을 메우고 있는 것처럼 보이지만, 실제로는 ~수 mW 정도의 출력으로 인해, 여전히 펄스 광원으로는 테라헤르츠갭을 메우지 못하고 있기 때문에 지속적인 연구개발이 필요하다.



[1] 장선호, 이민경, 강광용. "Tera-Hertz Wave", IT-SOC magazine, vol. 24, pp.10-21, 2008년 5월.
 [2] P. H. Siegel, "Terahertz technology", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2002.
 [3] P. H. Siegel, "Terahertz Technology in Biology and Medicine", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 52, NO. 10, OCTOBER 2004.
 [4] X. C. Zhang, "Terahertz wave imaging: horizons and

hurdles", Phys. Med. Biol., vol. 47, pp. 3667-3677, 2002.
 [5] B. Ferguson, X. C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology", Nature materials, vol. 1, pp. 26-33, 2002
 [6] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology", Nature Photonics, vol. 1, 2007.
 [7] K. Kawase, "Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler", Appl. Phys. Lett., vol. 68, no. 18, pp. 2483-2485, 1996.
 [8] Young Uk Jeong et al., "Application of a wide-band compact FEL on THz imaging", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 543, pp. 90-95, 2005.
 [9] Faist, J. et al., "Quantum cascade laser", Science, vol. 264, pp. 553-556, 1994.
 [10] Ch. Fattinger, D. Grischkowsky, "Terahertz beam", Appl. Phys. Lett., vol. 54, no. 6, pp. 490-762, 1989.
 [11] K. Kawase et. al., "Terahertz wave parametric source", J. Phys. D, vol.34, pp. R1-R14, 2001.
 [12] T. Taniuchi et. al., "Tunable terahertz-wave generation in DAST crystal with dual-wavelength KTP optical parametric oscillator," Electron. Lett., vol. 36, no. 16, pp. 1414-1416, 2000.
 [13] T. Taniuchi et. al., "Widely tunable terahertzwave generation in an organic crystal and its spectroscopic application," J. Appl. Phys., vol. 95, no. 11, pp. 5984-5988, 2004.
 [14] K. Suizu et. al., "High-power terahertz-wave generation using DAST crystal and detection using mid-infrared powermeter," Opt. Lett., vol. 32, no. 19, pp. 2885-2887, 2007.
 [15] G. Grassler et. al., "Intersubband and interminiband GaAs=AlGaAs quantum", Physica E, vol. 7, pp. 1-7, 2000.
 [16] E. R. Brown et, al., "Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs", Appl. Phys. Lett., vol. 66, pp. 285-284, 1995.

[17] K. A. McIntosh et. al., "Terahertz photomixing with diode lasers in low-temperature-grown GaAs", Appl. Phys. Lett., vol. 67, pp. 3844-3846, 1995.



약 력



1975년 서울대학교 공학사
 1982년 국립경상대학교 석사
 1988년 부산대학교 박사
 1985년 ~ 1988년 부산대학교 기초과학연구소 연구조원
 1989년 ~ 현재 한국전자통신연구원 책임연구원/팀장
 관심 분야: 강상관전자계 소재/소자, 테라헤르츠 소재/소자/시스템

강 광 용



1979년 서울대학교 공학사
 1982년 한국과학기술원 공학석사
 1990년 한국과학기술원 공학박사
 1982년 ~ 현재 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부
 책임연구원
 관심분야: 테라헤르츠파 발생 및 검출기술, 테라비트급
 정보저장기술, 나노소재의 물성분석기술

백 문 철



2004년 국립경상대학교 공학사
 2007년 충남대학교 공학석사
 2007년 ~ 현재 충남대학교 박사과정중
 2008년 ~ 현재 한국전자통신연구원 테라전자연구팀 위촉연구원
 관심분야: THz 소자용 박막 MBE 성장 및 소자 제작, THz-QCL,
 3-5 쪽 나노와이어 및 나노닷 MBE 성장, 양극산화 알루미늄 나노템플릿 제작 및 이를 이용한 나노닷 성장

정 세 영



1995년 충북대학교 학사
 1998년 충북대학교 석사
 2008년 충북대학교 박사
 2008년 ~ 현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 관심분야: THz 분광 및 이미징 시스템, Biophotonics

강 승 범



1995년 국립경상대학교 공학사
 1998년 국립경상대학교 공학석사
 2002년 국립경상대학교 전기공학과 박사
 2002년 ~ 현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 관심분야: 산화물 마이크로파 수동소자, 산화물 박막 성장 및 분석,
 THz 분광 및 이미징 시스템

곽 민 환