

<p>THz CW Technology</p>	<p>박건식 · 소진규 · 정영욱* · 이기태* · 정순신** · 전석기** · 김정일** · 한일기*** · 최원준*** · 이정일*** · 백찬욱**** · 한성태**</p> <p>서울대학교 물리천문학부 · *한국원자력연구원 · **한국전기연구원 · ***한국과학기술연구원 · ****삼성종합기술원</p>
--------------------------	--

I. 서 론

마이크로파와 적외선 사이에 위치한 테라헤르츠 파(0.1~30 THz)는 그 응용 가능성의 풍부함에도 불구하고 광파와 전파의 경계에 위치해 있어 두 영역의 전통적인 발생 방식을 통한 광원 개발로는 한계에 직면해 있었다. 이러한 한계로 인해 이 대역은 천체물리학 외의 분야로부터는 폭 넓은 관심을 받지 못하였으나, 90년대 들어 나노 기술과 광 기술의 비약적인 발전에 힘입어 펄스와 연속 광원의 지속적인 발전이 이루어져 그 응용 범위 또한 공업, 의료, 바이오, 농업 안전 분야 등으로 꾸준히 확장되어 가고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

테라헤르츠파의 발생 방식은 크게 펨토초 레이저에 기반한 시간 영역 분광법(THz-TDS)으로 대표되는 펄스형 광원과 반도체 양자 우물 구조에 기반한 양자 폭포 레이저(QCL) 및 진공 전자를 이용한 진공 발전기와 같은 연속형 광원으로 나뉜다. 펄스 방식의 광대역에 비하면 연속 광원의 대역폭은 상대적으로 작다고 볼 수 있으나, 펄스 광원에서 얻을 수 없는 고분해능의 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 그 출력 또한 펄스 광원에 비할 수 없을 정도로 높다. 또한, 펄스 광원은 소형화에 일정한 제약이 있는 데 비해 연속 광원은 소형화 및 휴대화가 가능하다. 본 원고에서는 테라헤르츠파 연속 광원의 개발 현황 및 연속 광원의 장점을 바탕으로 한 응용 사례들을 소개

하고자 한다.

II. 테라헤르츠 연속 광원의 개발 현황

2-1 자유 전자 레이저

자유 전자 레이저의 파장은 전자 빔의 에너지에 따라 크게 달라지며, 사용하는 전자가속기의 에너지 범위에 따라 테라헤르츠파, 적외선, 가시광선, 자외선, X선 등의 대역에서 레이저 빛을 내게 된다. 자유 전자 레이저에 사용되는 가속기의 종류는 정전 가속기, 고주파 선형 가속기, 마이크로트론, 전자 저장 링(electron storage ring) 등 다양하며, 가속기의 종류에 따라 전자 빔의 에너지 범위가 달라지고 따라서 자유 전자 레이저의 파장도 달라진다. 자유 전자 레이저는 또, 종래의 레이저에 비하여 출력을 대단히 크게 할 수 있고 에너지 변환 효율이 높은 장점도 있다. 그리고 종래의 레이저에서와 같은 매질의 열화 현상이 없어 수명이 길고, 연속 운전이 가능하다.

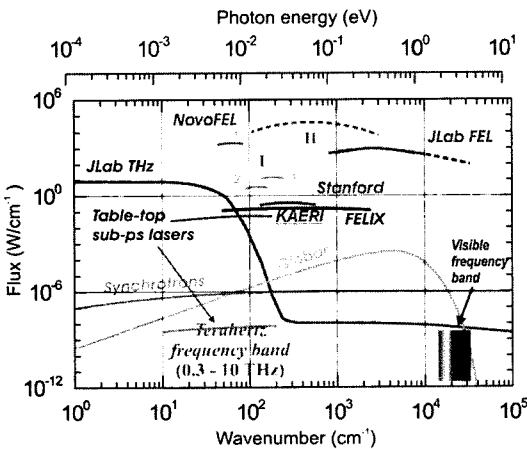
자유 전자 레이저는 일찍부터 테라헤르츠파 대역의 가장 이상적인 광원으로 인정받고 있는데, 그 이유는 다른 광원에 비하여 출력 강도가 최소 수 백배에서 수 만 배에 이를 정도로 강하고, 분광 특성이 우수하며 자유롭게 파장을 선택할 수 있다는 점 등 때문이다. 하지만 자유 전자 레이저는 개발 비용과 기술의 난이도가 높고 장치의 크기가 거대하여 많이 개발되지 못한 단점이 있었다. 현재 전세계적으로 미

국, 유럽(네덜란드, 독일, 프랑스, 이탈리아), 러시아, 일본, 중국, 그리고 우리나라 등에서 약 10여개의 테라헤르츠 자유 전자 레이저 장치가 가동되고 있다.

전 세계적으로 몇 가지 유형의 테라헤르츠 자유 전자 레이저가 개발되었거나 개발되고 있다. 가장 먼저 개발된 것은 다양한 이용자들에게 강력하고 우수한 특성의 테라헤르츠 빔을 제공하는 이용자 시설(user facility)이다. 그리고, 테라헤르츠 영역의 광화학반응, 새로운 물질의 생산, 고부가가치 재료 처리 등의 역할을 담당할 평균 출력이 100 W를 넘어서는 고효율 테라헤르츠 자유 전자 레이저가 개발, 실증되었다. 그 대표적인 것이 [그림 1]에 나타나 있는 러시아 부드케핵물리연구소의 NovoFEL이다. 마지막으로 최근 개발이 활성화되고 있는 소형 테라헤르츠 자유 전자 레이저이다. 보안 검색 및 의료 현장에서 사용이 가능한 수 W급 이상의 평균 출력을 가지면서도 장치의 크기가 탁상형 수준인 장치이다. 현재에는 미국을 중심으로 비밀리에 군사용으로 개발되고 있다. 한국에서도 소형 테라헤르츠 자유 전자 레이저 분야에서는 약 10여년전부터 연구 개발에 착수하여 우수한 기반 기술과 성과를 가지고 있다.

가장 먼저 개발된 테라헤르츠와 자유 전자 레이저 이용자 시설은 1980년대 후반에 구축된 UCSB의 테라헤르츠 과학센터이다. 정전형 가속기를 사용하는 이 시스템은 원적외선에서 밀리미터파에 이르는 테라헤르츠 전 영역에서 동작한다. 특히, 테라헤르츠와 펄초 레이저 등을 결합하여 물성 및 생명공학 연구에 있어서 새로운 지평을 열었다. 이후 유럽 연합은 네덜란드에 FELIX 자유 전자 레이저 연구 시설을 구축하여 최근까지 우수한 성과를 얻고 있다. FELIX 역시 물성, 생명공학 분야에 있어서 우수한 연구 결과를 생산하고 있다. 이들 시스템은 높은 출력 밀도를 이용하여 다른 테라헤르츠 광원이 보여주지 못하는 우수한 결과를 많이 양산하고 있다. 그 대표적인 것으로 1.5 THz에서 마이오글로빈의 광반응을 처음으로 측정된 UCSB의 결과<sup>[3]</sup>와 3.45 THz의 박테리오투신 진동 모드를 이용한 구조 변환 측정을 관측한 FELIX의 결과<sup>[4]</sup> 등이 있다. 이들은 단순히 주요 생체 조직에 대한 분광학 수준을 넘어서서 자유 전자 레이저의 높은 출력 밀도를 이용한 구조 변화와 광반응을 유도할 수 있었다는 면에서 주목을 받았다. 이렇듯 자유 전자 레이저는 테라헤르츠 영역에서 새로운 물질의 합성 및 생산 등의 역할을 담당할 수 있는 유일한 고효율 광원이다.

고출력 테라헤르츠 광원의 새로운 가능성을 보인 러시아 부드케핵물리연구소의 NovoFEL은 1~3 THz 영역에서 평균 출력 400 W를 달성하였다<sup>[5]</sup>. 상전도 가속기를 사용하는 에너지 회수형 시스템으로 1단계에서 테라헤르츠의 고효율 자유 전자 레이저 빔을 발생하고, 2단계에서는 에너지를 높여서 적외선 영역으로 파장을 확장한다. 이 강력한 발생 장치는 테라헤르츠 분광학 등 탐구의 도구에서 벗어나 광반응이나 물성 개질, 새로운 재료 생산 등 에너지를 직접 이용하는 적극적인 활용이 가능함을 보여주었다. 그리고, 최근에는 상온에서 동작하는 마이크로볼로미터 평면 어레이를 사용하여 초당 90 프레임의 테라



[그림 1] 테라헤르츠 영역에서 동작하는 광원들의 출력 밀도(Courtesy of G. Kulipanov, BINP, Russia)

헤르츠 실시간 영상을 실현하기도 하였다<sup>[6]</sup>.

현재 보안 검색이나 의료 현장에서 실시간 검색이나 영상에 필요한 테라헤르츠 평균 출력은 약 1 W 이상으로 추정된다. 현재의 기술로 테라헤르츠 전 영역에서 이러한 세기의 출력을 발생시킬 수 있는 유일한 광원이 자유 전자 레이저이다. 하지만 현장에서 사용할 수 있는 수준의 탁상형 크기와 높지 않은 개발비를 실현하는 문제는 여전히 숙제로 남아 있었다. 한국원자력연구원에서는 이러한 문제점에 주목하여, 소형 마이크로트론 가속기를 이용하여, 기존 장치보다 크기를 대폭 줄인 소형 테라헤르츠파 자유 전자 레이저 개발에 성공하였다<sup>[7]-[9]</sup>. 한국원자력연구원에서는 소형인 마이크로트론 가속기를 선택하였다. 그리고, 가속기의 크기와 가격에 큰 영향을 미치는 고주파 발생 장치에 있어서는 저가이며 소형인 마그네트론을 사용하였다. 이 자유 전자 레이저는 그 크기가 불과 2×3 m<sup>2</sup> 정도이며, 100~300 마이크로미터의 아주 넓은 파장 대역에서 레이저를 발생시킬 수 있다.

한국원자력연구원에서는 최근 개발된 기술을 바탕으로 공항, 항만, 병원 등에서 사용할 수 있는 소형의 탁상형 자유 전자 레이저 장치 개념 설계를 수행하고 있다. 이러한 장치는 미국 등에서 국방용으로 개발되고 있으며, 러시아, 일본 등에서도 최근 기술개발이 이루어지고 있다. 테라헤르츠 산업 분야의 성장과 함께 이러한 소형 자유 전자 레이저 장치의 수요가 점차 높아질 것으로 기대를 모으고 있다.



[그림 2] 한국원자력연구소에서 개발한 소형 테라헤르츠파 자유 전자 레이저(좌) 장치와 이를 이용하는 응용 연구 실험 장치(우)

## 2-2 멤스 가공 진공소자

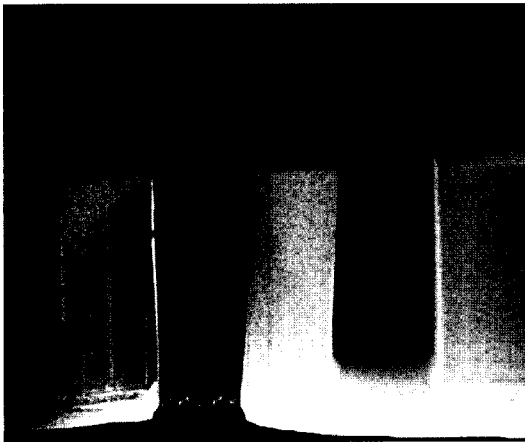
고출력 연속 광원의 하나로 체렌코프 방사에 기초한 진공 발진기(vacuum electron devices)를 들 수 있는데, 이는 최근의 반도체 가공 기술에 기반한 MEMS 가공의 발전에 힘입은 바가 크다. 주파수가 0.1~1.0 THz 대역에서 복잡한 3차원 구조의 cavity, coupling 구조, waveguide, beam tunnel 등의 제작이 수백  $\mu\text{m}$ 의 두께와 매우 높은 고폭비(high-aspect-ratio)를 갖는 구조물의 제작이 LIGA(German acronym for Lithographie, Galvanoformung Abformung; deep etch X-ray lithography, electroplating, and molding) 및 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 방법을 통해 가능해진 것이다<sup>[10]-[14]</sup>. [그림 3]에 LIGA 및 DRIE 방법을 통해 가공된 수백  $\mu\text{m}$  높이의 cavity 구조들을 볼 수 있다. 진공 발진기가 테라헤르츠 대역에서 사용하려면 최종 가공된 구조물의 표면 거칠기가 고려하는 파장에 비해 일정 수준 이하로 유지되어야 하는데, LIGA 방법으로 가공된 결과물의 표면 거칠기는 테라헤르츠 대역에서도 적용 가능성이 검증된 바 있다<sup>[13]</sup>.

최종 회로는 보통 coupler와 함께 가공되며, 한 예로 0.1 THz 주파수 대역의 전자파 발진기인 CCBWO (Coupled-Cavity Backward-Wave Oscillator)의 제작된 모습을 [그림 4]에 나타내었다<sup>[14][15]</sup>. 3차원 구조의 CCBWO 회로 제작을 위해 3장의 실리콘 웨이퍼를 각각 DRIE 에칭한 후 이들 웨이퍼를 Au-Sn eutectic bonding을 하여 제작하게 되는데, [그림 2]에서 보듯이 DRIE와 eutectic bonding 공정을 적용하여 매우 정밀한 3차원 구조의 테라헤르츠 구조물의 제작이 가능하다<sup>[16][17]</sup>.

한편, 작동 주파수가 높아지면 발진을 일으키기 위해서 요구되는 전류 밀도는 거의 제곱에 비례해서 높아지게 되며, 테라헤르츠 대역에서는 수백 A/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도가 요구된다. 따라서, 기존의 널리 사용되는 열음극 전자총 대신에 탄소 나노 튜브 등의 전계 방출 냉음극을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있

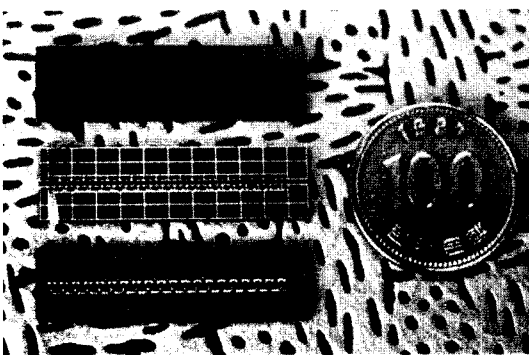


(a)



(b)

[그림 3] (a) LIGA 및 (b) DRIE 방법으로 가공된 구리 및 실리콘 구조물

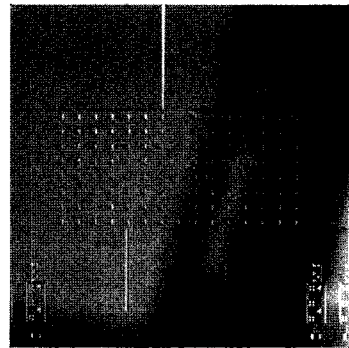


[그림 4] DRIE와 eutectic bonding을 이용한 제작된 0.1 THz CCBWO 회로

다<sup>[10]</sup>. 또한, 새로운 광학 개념의 적용을 통해 전자 빔과 회로의 상호 작용을 개선시키고자 하는 노력이 계속되고 있으며, 광결정 및 플라즈몬 결정 등이 기존의 공진기, 도파관 및 저속파 구조를 대체해 나가고 있다<sup>[18]~[20]</sup>. [그림 5]에 기존의 금속 공진기를 광결정으로 대체한 광결정 reflex klystron과 저속파 구조를 1차원 플라즈몬 결정으로 대체해 두 개의 교차 진행하는 전자 빔과 상호 작용하는 스미스-퍼셀 자유 전자 레이저를 도시하였다. 현재 출력을 높이기 위한 sheet-beam 형태의 전자 빔과 멤스 가공된 회로를 이용해 0.1~1 THz 급의 초소형 테라헤르츠파원을 개발 중에 있다. 상용화된 기술은 수년내에 완성될 것으로 기대되고 있다.

### 2-3 THz Quantum Cascade Laser

THz 광원을 개발하는 방법 중의 하나로서 반도체 나노 초격자를 이용한 양자 폭포 레이저(quantum cas-



(a)



(b)

[그림 5] (a) 0.1 THz 광결정 reflex klystron 및 (b) 0.5 THz 플라즈몬 결정 구조

cade laser)가 있다. 양자 폭포 레이저는 [그림 6]에 나타낸 바와 같이 전자를 주입시키기 위한 주입층(injector)과 발광을 위한 발광층(emitter)이 1 주기를 구성하며, 이와 같은 1 주기를 수 십 번 반복하여 적층된 구조로 이루어진다. [그림 6]의 왼쪽 그림에 나타낸 바와 같이 주입층으로 주입된 1개의 전자가 주입층 및 발광층을 지나면서 여러 개의 광자를 발생시키는데 그 전자의 이동 경로가 마치 폭포 모양과 유사하여 양자 폭포 레이저라 한다. 1994년에 J. Faist와 F. Capasso 등에 의하여 약 70 THz 영역의 양자 폭포 레이저가 처음으로 개발된 이후 현재에는 약 1.59 THz까지 낮은 주파수 대역의 양자 폭포 레이저가 개발되었다<sup>[21],[22]</sup>.

THz 양자 폭포 레이저의 응용 분야는 원리적으로 다른 THz 파와 마찬가지로 THz 분광, THz 이미징 등의 분야로 응용이 가능하며, 실제로 몇몇 분야에서 응용 연구가 보고되었다. 일례로 4.3 THz 양자 폭포 레이저와 마이크로볼로메터를 이용하여 실시간으로 지문을 영상화 한 결과가 보고되었고<sup>[23]</sup>, THz 분광을 통하여 반도체 내에서 가속 장치에 의한 공명이 일어날 가능성을 제시하였으며<sup>[24]</sup>, 미분 흡수 LIDAL(Di-

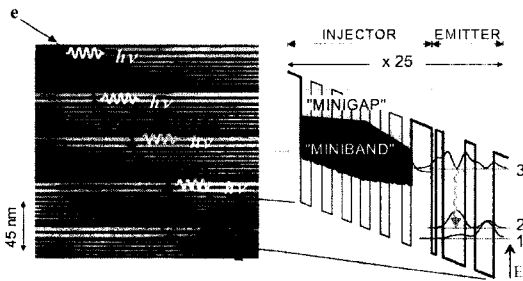
fferential Absorption LIDAL: DIAL)에 의한 THz 폭포 센서 응용 등이 보고되었다<sup>[25]</sup>. 한편, 광자 결정과 THz 양자 폭포 레이저를 결합하여 수직 발광 양자 폭포 레이저가 개발되고 있는데, 바이오나 유체 역학 분야를 위한 센서로 응용될 것으로 전망되고 있다<sup>[26]</sup>.

향후 THz 대역의 양자 폭포 레이저에서 광출력 증가, 연속 발진, 동작 온도 증가, 파장 가변 등의 문제 등이 지속적으로 해결되면 그 응용 분야도 보다 다양화 될 것이며, 더욱이 보통의 반도체 레이저 다이오드와 마찬가지로 소형, 경량이라는 장점으로 여타 THz 파에 비하여 비교 우위에 있는 고유의 응용 분야가 확보될 것으로 전망된다.

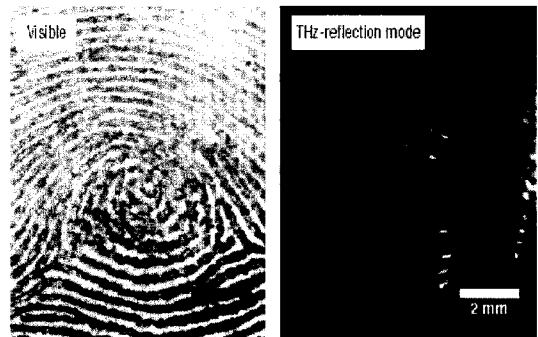
### Ⅲ. 테라헤르츠 연속 광원의 응용

#### 3-1 테라헤르츠 이미징

테라헤르츠 광을 이용한 이미징은 펨토초 레이저와 photoconductive antenna를 이용한 TDS(Time-Domain Spectroscopy)와<sup>[27]</sup> 나노초 레이저를 이용하여 비선형 광학으로 발생시킨 TPO(Terahertz Parametric Oscillator)<sup>[28]</sup> 등의 pulse 작동과, BWO(Backward-Wave Oscillator)<sup>[29]</sup>와 같은 진공 디바이스 또는 Gunn diode 및 양



[그림 6] 양자 폭포 레이저 개념. 좌측 그림: 주입층(사선 화살표 영역)과 발광층(수직 화살표 영역)으로 이루어진 1개의 주기가 반복되어 적층된 구조를 나타내는 TEM 이미지, 우측 그림: 주입층과 발광층의 에너지 밴드 다이어그램(전도대역만 표시)



[그림 7] 4.3 THz 양자 폭포 레이저와 320×240 마이크로볼로메터를 이용한 지문의 실시간 THz 이미지<sup>[23]</sup>

자 폭포 레이저를 이용한 CW(Continuous Wave) 작동<sup>[30]</sup>의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. 이 중에서 CW 작동은 pulse에 비해 고출력 테라헤르츠 광을 안정적으로 얻을 수 있고 복잡한 광학 시스템 없이 비교적 간단하게 소형으로 이미징 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있다. 이러한 CW 광원은 보통 0.1~1.5 THz 대역까지 다양하게 개발되어 있으며, 일반적으로 CW 광원의 출력은 주파수가 커지면서 급격히 감소하게 된다.

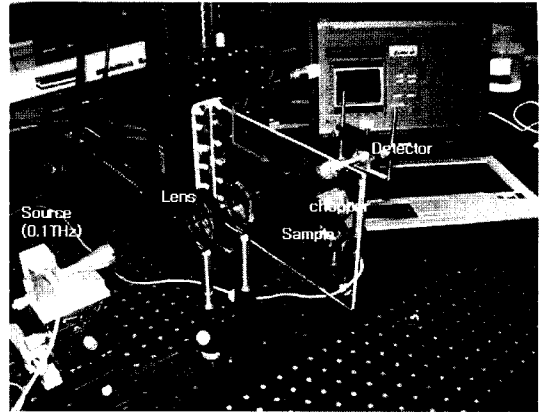
CW 광원을 사용한 테라헤르츠 이미징 시스템은 거의 대동소이하므로 본 고에서는 Gunn diode를 사용한 테라헤르츠 이미징 시스템을 예로 소개하겠다. [그림 8]에서 보듯이 각각 0.1, 0.3 THz 두 개의 광원을 사용하여 dual hone 안테나로 전자기파 에너지를 대기 중에 보낸다. 그 후 렌즈를 이용하여 평행광으로 만든 후 XY stage에 고정된 샘플 상에 광을 조사하여 그 투과 또는 흡수된 양을 Schottky diode detector로 검출한다. Lock-in amplifier를 이용하면 S/N 비를 100배 이상 개선할 수 있다.

위와 같은 연속 광원 이미징 시스템은 [그림 9]와 같이 펄스 방식에 비해 차지하는 면적이 그리 크지 않다. 이미징용 target은 다양하게 이용할 수 있는데, [그림 9]에서 보듯이 XY 축으로 스캔하면서 이동 가능한 stage를 컴퓨터로 제어하면서 동시에 테라헤르츠 광의 투과 및 흡수 정도의 데이터를 취하여 최종 이미지를 얻게 된다.

사용한 두 개의 Gunn diode는 0.1 및 0.3 THz 주파수를 내는데, 각각 광을 집속시킨 후 측정할 전자파의 직경은 intensity가 약 1/e2 지점에서 각각 5 mm



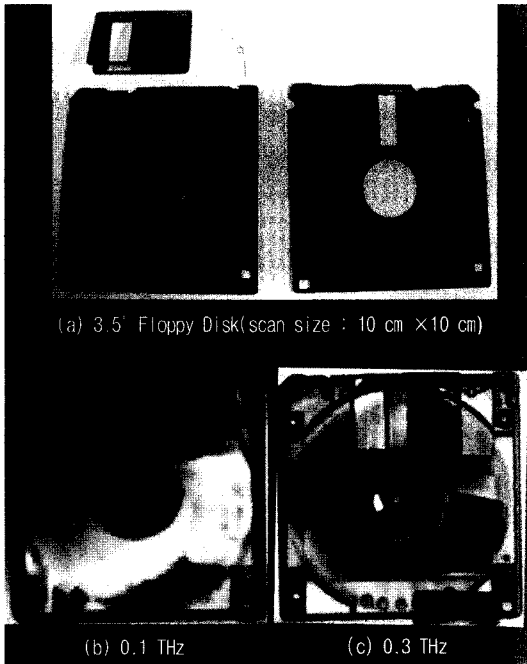
[그림 8] Gunn diode를 이용한 CW imaging system



[그림 9] Gunn diode를 이용한 CW imaging system

1.5 mm를 기록하였다. 두 광원 모두 출력이 비슷하여 약 10 mW의 CW 광을 이용하여 XY stage 상에 고정된 3.5 인치 플로피 디스켓에 조사하여 그 투과된 에너지를 Schottky diode와 lock-in amplifier를 이용하여 측정하고 그 데이터를 이미지화 하면 [그림 10]과 같다.

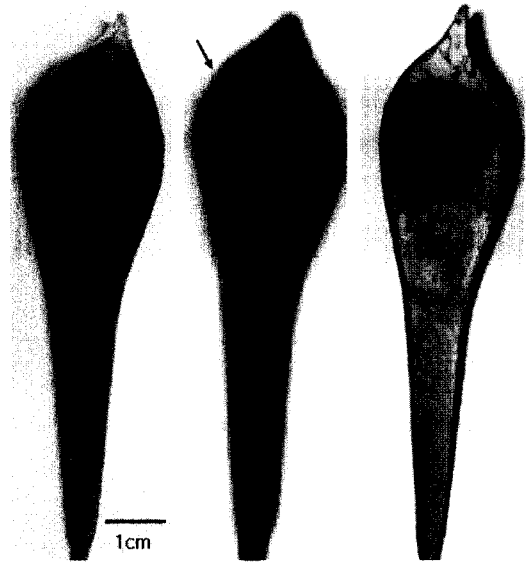
[그림 10](a)에서는 측정에 사용한 3.5인치 플로피 디스켓을 분해하여 내부 모습을 나타내었다. 이때 내부를 분해하기 전, 0.1 THz 영상 이미지를 얻은 결과는 [그림 10](b)에 나타내었다. 여기에서는 디스켓 외곽과 금속 부분 그리고 중심의 자기 디스크 부분과 디스켓 상하면의 접합 부분이 선명하게 나타났으나, 전체적으로 이미지가 선명하지 않으며 내부의 구조를 정확하게 예측하기가 어렵다. 그 이유는 0.1 THz 광의 최소 직경이 앞서 언급한 바와 같이 대략 5 mm 이기 때문에 이보다 작은 분해능을 얻기가 원리적으로 불가능하였다. [그림 10](c)에는 0.3 THz 광을 이용하여 보다 선명한 영상 이미지를 얻은 결과를 나타내었다. 이때에는 광의 최소 직경이 1.5 mm로 측정되기 때문에 디스켓 내부의 모습이 분명하게 관찰되었다. 디스켓의 외부 플라스틱 실장의 두께 및 접합용 홈 그리고 내부 플라스틱의 높낮이 차이 및 디스크 표면 보호용으로 쓰인 얇고 투명한 플라스틱 plate



[그림 10] 3.5인치 플로피 디스크의 테라헤르츠 광 투과 영상 이미지

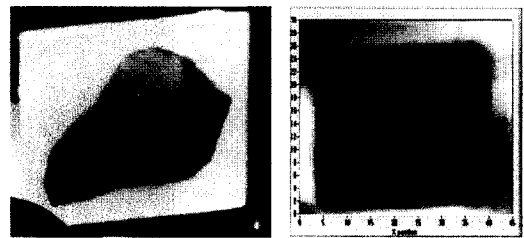
까지도 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 이러한 영상을 얻기 위해서는 표면에서의 반사 및 시스템 상에서 일어나는 공진 그리고 외부 환경 변화와 스캔 작동시 발생할 수 있는 오차 등등을 고려한 측정이 필요하다.

이와 더불어 플라스틱 외에 유전체로 이루어진 나무의 열매 영상 이미지도 얻을 수 있었다. [그림 11]에는 육안으로 관찰 가능한 열매의 겉모습과 0.1 THz 광으로 얻은 내부의 씨앗 이미지, 그리고 이를 확인하고자 절단한 내부의 모습을 모두 보여주었다. 금속이나 플라스틱과 달리 유기물로 이루어진 나무의 열매도 내부의 씨앗이 보일 정도로 테라헤르츠 광은 비파괴 영상 이미지에서 매우 훌륭하게 쓰일 수 있다. 이러한 연구를 바탕으로 의료 영상 및 다양한 물질 분석 그리고 spectroscopy까지 그 응용 범위를 확대할 수 있다.



[그림 11] 닝쿨나무 열매의 테라헤르츠 광 투과 이미지와 그 단면

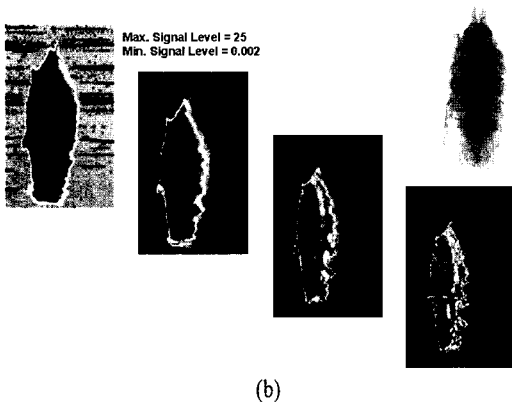
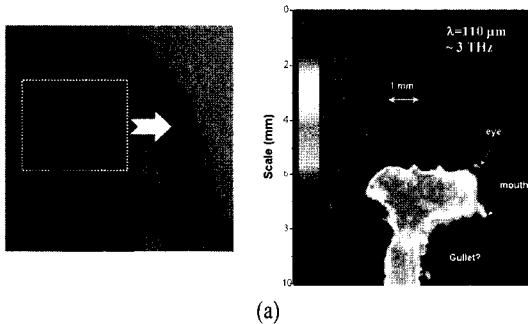
한편, 암세포나 종양 세포를 주변 세포와 육안으로 구별할 수 없을 경우에도, 암세포의 수분 함량이 주변 세포와 다르므로 암세포를 테라헤르츠 이미지로 구분하는 것이 가능하다. [그림 12]에 종양이 이식된 쥐의 상피세포의 육안 이미지와 테라헤르츠 이미지를 비교해 보았다. 이 경우, 샘플은 파라핀 처리가 된 상태인데, 파라핀은 테라헤르츠파에 거의 투명하며, 세포는 이미 포르말린에 담겨놓아 고정되었으며, 수분이 제거된 상태여서 테라헤르츠 이미지를



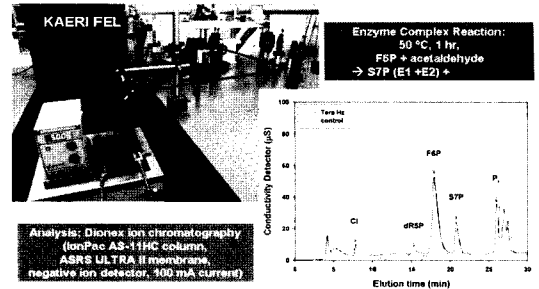
[그림 12] 종양이 이식된 쥐의 상피세포의 육안 이미지와 0.2 THz에서 얻은 테라헤르츠파 이미지

얻어내는 것이 가능하다.

지금까지는 일반 유전체, 건조 상태의 생체나 아주 얇게 자른 시편의 테라헤르츠 이미지를 예시했다. 이들 시료들은 수분 함량이 적어 상대적으로 테라헤르츠파 이미지를 얻기가 쉬운 편이다. 한편, 강력한 고출력의 테라헤르츠 자유 전자 레이저를 사용하면 건조하지 않은 살아있는 조건의 생체에 대해서 테라헤르츠 이미지를 얻는 것이 가능한데, [그림 14]는 한국원자력연구소의 자유 전자 레이저로 얻은 3 THz에서의 사마귀와 바다 벌레의 생체 투과 사진이다<sup>[31]</sup>. 앞으로 많은 기술 개발이 이루어져야 할 것이지만, 살아있는 조건의 테라헤르츠 투과 영상을 처음으로 얻었다는 점에서 의미를 찾을 수 있다.



[그림 13] 테라헤르츠파 자유 전자 레이저로 촬영한, 살아있는 조건의 사마귀(a)와 바다 갯벌레 테라헤르츠파 투과 이미지(b)



[그림 14] 테라헤르츠파 자유 전자 레이저 빔을 이용한 특정 효소의 선택적 합성 결과

### 3-2 기타 응용

고출력 테라헤르츠파 자유 전자 레이저를 활용하면 다른 저출력의 광원이 접근하지 못하는 새로운 응용분야를 개척하였다. 예를 들면 특정 효소의 경우, 테라헤르츠 빔을 조사하면 광화학 반응으로 합성될 수 있음을 확인하였다. [그림 15]에 나타나 있는 것과 같이 dRSP 효소는 일반적인 환경에서는 합성이 어려운 물질이다. 그러나, 3 THz 빔을 조사하면 합성이 가능함을 확인할 수 있었다.

## IV. 결 론

본 고에서는 테라헤르츠 광원 중 연속 광원의 개발 및 응용 현황에 대해 국내 사례를 중심으로 알아보았다.

## 참 고 문 헌

- [1] Carlo Sirtori, "Bridge for the terahertz gap", *Nature*, vol. 417, pp. 132-133, May 2002.
- [2] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology", *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 97-105, Feb. 2007.
- [3] R. H. Austin, et al., "Far-infrared perturbation of reaction rates in myoglobin at low temperatures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 62, pp. 1912-1915, Apr. 1989.



- [4] A. Xie, et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, 018102, 2002.
- [5] N. A. Gavrilov, et al., "Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL", *Nucl. Instr. Meth. A* 575, pp. 54-57, May 2007.
- [6] M. A. Demyanenko, et al., "Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, 131-116, Apr. 2008.
- [7] J. Lee, et al., "Experimental observation of mode competition and single-mode operation in JINR-IAP millimeter-wave FEM oscillator", *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A* 407, pp. 161-166, 1998.
- [8] Y. U. Jeong et al., "First lasing of the KAERI compact far-infrared free-electron laser driven by a magnetron-based microtron", *Nucl. Instr. Meth. A* 475, pp. 47-50, Dec. 2001.
- [9] Y. U. Jeong et al., "Upgrade of a compact FIR FEL driven by a magnetron-based microtron for the wavelength range of 100 ~ 300  $\mu\text{m}$ ", *Nucl. Instr. Meth. A* 507, pp. 125-128, Jul. 2003.
- [10] S. T. Han, S. G. Jeon, Y. M. Shin, K. H. Jang, J. K. So, J. H. Kim, S. S. Chang, and G. S. Park, "Experimental investigations on miniaturized high frequency vacuum electron devices", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, pp. 679-684, Apr. 2005.
- [11] S. T. Han, K. H. Jang, J. K. So, J. I. Kim, Y. M. Shin, N. M. Ryskin, S. S. Chang, and G. S. Park, "Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube", *IEEE Trans. Plas. Sci.*, vol. 32, pp. 60-66, Feb. 2004.
- [12] Y. M. Shin, et al., "Novel coupled-cavity TWT structure using two-step LIGA fabrication", *IEEE Trans. Plas. Sci.*, vol. 31, pp. 1317-1324, Dec. 2003.
- [13] Y. M. Shin, J. K. So, J. H. Kim, S. T. Han, K. H. Jang, S. S. Chang, and G. S. Park, "Microfabrication of millimeter wave vacuum electron devices by two-step deep-etch X-ray lithography", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 091916, Mar. 2006.
- [14] P. A. George, C. Manolatu, F. Rana, A. L. Bingham, and D.I R. Grischkowsky, "Integrated waveguide-coupled terahertz microcavity resonators", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, 191122, Nov. 2007.
- [15] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, "Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator", *Appl Phys. Lett.*, vol. 43, pp. 5637-5646, Oct. 2004.
- [16] C. H. Tsau, S. M. Spearing, and M. A. Schmidt, "Fabrication of wafer-level thermocompression bonds", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 11, pp. 641-647, Dec. 2002.
- [17] Q. Y. Tong, Q. Gan, G. Hudson, G. Fountain, P. Enquist, R. Scholz, and U. Gosele, "Low-temperature hydrophobic silicon wafer bonding", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 4767-4769, Dec. 2003.
- [18] S. G. Jeon, Y. M. Shin, K. H. Jang, S. T. Han, J. K. So and G. S. Park, "High order mode formation of externally coupled hybrid photonic-bandgap (PBG) cavity", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 021112, Jan. 2007.
- [19] Young-Min Shin, Jin-Kyu So, Kyu-Ha Jang, Jong-Hyo Won, Jung-Il Kim, Anurag Srivastava, and Gun-Sik Park, "Superradiant terahertz smith-purcell radiation from surface-plasmon excited by counter-streaming electron beams", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 031502, Jan. 2007.
- [20] Young-Min Shin, Jin-Kyu So, Kyu-Ha Jang, Jong-Hyo Won, Anurag Srivastava, and Gun-Sik Park, "Evanescent tunneling of an effective surface plasmon excited by convection electrons", *Phys. Rev.*

- Lett.*, vol. 99, 147402, Oct. 2007.
- [21] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A.Y. Cho, "Quantum cascade laser", *Science*, vol. 264, pp. 553-556, Apr. 1994.
- [22] S. Kumar, Q. Q. Benjamin, S. Williams, and Q. Hu, "Quantum-cascade lasers with one-well injector operating at 1.59 THz ( $\lambda=188.5 \mu\text{m}$ )", [ieeexplore.ieee.org/iel5/4452319/4452320/04453211.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4452319/4452320/04453211.pdf).
- [23] A. W. M. Lee, B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno, "Real-time imaging using a 4.3 THz quantum cascade laser and a 320×240 Microvolumeter Focal-Plane Array", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, pp. 1415-1417, Jul. 2006.
- [24] D. C. Larrabee et al., "Application of terahertz quantum-cascade lasers to semiconductor cyclotron resonance", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 29, pp. 122-124, Jan. 2004.
- [25] D. J. Cook, M. G. Allen, B. K. Decker, R. T. Wainner, J. M. Hensley, and H. S. Kindle, "Detection of high explosives with THz radiation", *IRMMW-THz 2005*, vol. 1, pp. 7-8, Sep. 2005.
- [26] R. Colombelli, K. Srinivasan, M. Troccoli, O. Painter, C. Gmachl, D. M. Tennant, A. M. Sergent, D. L. Sivco, A. Y. Cho, and F. Capasso, "Quantum cascade surface-emitting photonic crystal laser", *Science*, vol. 302, pp. 1374-1377, Nov. 2003.
- [27] K. L. Nguyen, T. Friscic, G. M. Day, L. F. Gladden, and W. Jones, "Terahertz time-domain spectroscopy and the quantitative monitoring of mechanochemical cocrystal formation", *Nature Materials*, vol. 6, pp. 206-209, Mar. 2007.
- [28] K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata, and H. Ito, "Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 195-197, Jan. 2002.
- [29] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, "Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, pp. 5637-5646, Oct. 2004.
- [30] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. I. Lin, J. S. Hwang, J. Xu, and X. C. Zhang, "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, 054105 Jan. 2005.
- [31] Y. U. Jeong et al., "Demonstration of a wide-band compact free electron laser to the THz imaging of bio samples", *Nucl. Instr. Meth. A* 575, pp. 58-62, May 2007.

≡ 필자소개 ≡

박 건 식



1978년 2월: 서울대학교 물리교육과 (이  
학사)  
1989년 2월: Univ. of Maryland 물리학 (이  
학석사)  
1989년 2월: Univ. of Maryland 물리학  
(이학박사)  
2004년 10월~현재: 서울대학교 물리천

문학부 교수

1987년 5월~1995년 8월: Naval Research Laboratory Research  
Scientist

1984년 1월~1987년 4월: University of Maryland Teaching Assis-  
tant

정 순 신



1997년 2월: 서울대학교 물리교육학과  
(교육학사)  
1999년 2월: 서울대학교 과학교육학과  
(교육석사)  
2002년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학  
박사)  
2001년 9월~현재: 한국전기연구원 (선

임연구원)

[주 관심분야] 마이크로파, 밀리미터파, 테라헤르츠파 소자 및  
시스템

소 진 규

현재: 서울대학교 물리천문학부

정 영 옥



1988년 2월: 서울대학교 물리학과 학사  
1990년 2월: KAIST 물리학과 석사  
1993년 2월: KAIST 물리학과 박사  
1994년 1월~현재: 한국원자력연구원 책  
임연구원

[주 관심분야] 자유 전자 레이저, 고출력  
테라헤르츠파 발생 및 응용, 레이저 가속

전 석 기



1998년 8월: 서울대학교 물리교육과 (이  
학사)  
2001년 3월: 서울대학교 물리학부 (이학  
석사)  
2005년 3월: 서울대학교 물리학부 (이학  
박사)  
2005년 1월~현재: 한국전기연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 고출력 마이크로파, 밀리미터파 소자, 고 전류  
밀도 전자 빔 소스

이 기 태

현재: 한국원자력연구원 연구원

김 정 일



2000년 2월: 서울시립대학교 물리학과  
(이학사)  
2002년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학  
석사)  
2006년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학  
박사)  
2006년 7월~현재: 한국전기연구원 선

임연구원

[주 관심분야] 밀리미터파 및 테라헤르츠파 소자

한 일 기

현재: 한국과학기술연구원 연구원

최 원 준

1986년 2월: 서강대학교 물리학과 (이학사)  
1988년 9월: 서강대학교 물리학과 (이학석사)  
1996년 2월: 서강대학교 물리학과 (이학박사)  
1990년 2월~현재: 한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 연구원/선임연구원/책임연구원  
[주 관심분야] MBE를 이용한 나노구조반도체 (양자점, 양자우물 등) 성장 및 나노광소자 (양자점 LD, 양자구조 원적외선 수광소자, 단광자발생기)

이 정 일

현재: 한국과학기술연구원 연구원

백 찬 욱



1997년 2월: 서울대학교 물리교육과 (이학사)  
1999년 2월: 서울대학교 물리교육과 (교육학석사)  
2004년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학박사)  
2004년 12월~현재: 삼성종합기술원 전

문연구원

[주 관심분야] 테라헤르츠 발진회로 및 시스템

한 성 태



1999년 2월: 서울대학교 물리교육과 (이학사)  
2005년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학박사)  
2008년 2월: Massachusetts Institute of Technology 박사후 연구원  
2008년 3월~현재: 한국전기연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 고출력 연속파 테라헤르츠 발생 및 응용 시스템