

# 테라헤르츠파 기술의 현황과 전망

Trend and Possibility of Terahertz Wave Technology

윤두협 (D.H. Yoon)	테라전자소자팀 책임연구원
곽민환 (M.H. Kwak)	테라전자소자팀 선임연구원
유용구 (Y.G. Yoo)	테라전자소자팀 선임연구원
류한철 (H.C. Ryu)	테라전자소자팀 연구원

## 목 차

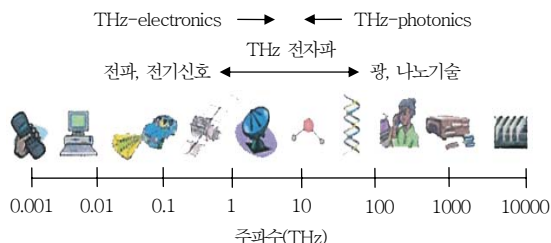
- .....
- I. 서론
  - II. THz파 공학의 발전
  - III. THz파 기반기술 연구현황
  - IV. THz파 응용 연구개발의 현황
  - V. 전망과 과제
  - VI. 결론

최근의 광-나노 기술의 발전에 힘입어, 테라헤르츠파(THz)파 분야에 있어서 기술혁신이 이루어지고 있다. THz 시간영역 분광법, THz-QCL, 서브-THz 무선 통신, 서브-THz 전기신호 처리기술 및 THz 디바이스 등 다양한 THz파 관련 연구 성과가 폭넓게 전개되고 있어, 새로운 과학기술 분야의 하나로서, 또 신규산업의 개척을 짚어지는 것으로서 크게 기대되는 기술이다. 따라서 구체적인 장래 전망을 명확히 하기 위하여 THz 기술에 관한 기술동향을 분석하였다. 본 고에서는 기술동향 분석 결과를 토대로 THz파 기술의 현황과 전망에 관하여 설명하고, 차세대 핵심기술(core-technology) 창출을 목표로, THz 전자파, THz-photonics, THz-electronics 세 가지 연구분야의 종합적인 추진을 제안하고자 한다.

## I. 서론

테라헤르츠(THz)파 공학은 최근의 광-나노 기술의 발전에 힘입어 기술혁신이 촉진되어, 새로운 분야를 개척하는 것으로서 주목을 집중시키고 있다. THz파는 전파천문과 분석과학 분야에 있어서, 폭넓게 연구·이용되고 있지만, 그 대상이 매우 제한적이었다. 이러한 THz파 기술에 새로운 센싱 기능이 추가되어, 공업·의료·바이오·농업·안전 분야 등 다양한 분야에 응용이 기대되고 있다. 또한 정보통신 분야에 있어서는 이용 전자파가 점점 더 고주파화로 진행되고 있어, 수백 GHz의 무선 통신이 실현되는 시기도 그리 멀지 않아 보인다. 게다가 THz 디바이스의 발전도 급속히 진행되어, 초고속 신호처리 기술도 이용 가능해지고 있다.

THz파 대역 (그림 1)에 있어서 기술혁신은 ① THz 전자파, ② THz-photonics, ③ THz-electronics의 세 가지 주요분야에서 진척되고 있다. THz 전자파 분야에서는 펨토초 레이저(femto-second laser)의 발전에 의하여 THz 시간영역 분광법이 개발되어[1], 푸리에(Fourier) 변환 성분이 수십 GHz에서 100THz를 넘는 초광대역 극초단 전자파 펄스의 발생과 시간 영역 측정에 의해[2], 새로운 THz 분광·이미징 기술이 탄생되었다[3]. 광공학(photonics) 관점에서 보면, photo-mixing에 의한 광·전자파 변환에 의하여, 120GHz 대역의 무선통신 기술이 개발되어, 수십 Gbps의 정보전달이 실현 가능하게 되었다. 또한 나노기술의 발전에 의하여, 높은 정밀도로 제어된 반도체 양자우물 구조의 제작



(그림 1) 주파수에 따른 다양한 기초-응용분야와 THz 전자파, THz-Photonics, THz-Electronics의 관계

이 가능하게 되어 양자중속레이저(QCL)의 THz 대역 발전이 실현되었다[4]. 현재로서는 1.9THz까지의 저주파화가 진행되고 있다[5]. 전자공학 연구 분야에서는 화합물 반도체 집적회로에 의한 MMIC나 고속 AD 변환기 개발도 진척되어, 또한 초전도단일자속양자(SFQ) 논리회로의 개발에 힘입어, 120GHz에서 동작하는 shift resistor[6]나 40GHz×4=160 Gbps의 광 pocket switch도 실현 가능하다. 지금 새롭게 THz 디지털 신호처리 기술을 이용할 수 있는 환경이 마련되고, 무선·계측 응용 등 다양한 산업기반이 구축되어 가고 있다.

본 고에서는 THz파 공학의 발전, 기반기술, 응용을 향한 대처방안과 장래 전망 및 반드시 해결되어야 할 과제 등에 관하여 몇 가지 중요한 분야를 발췌하여 소개하고자 한다.

## II. THz파 공학의 발전

1893년 창간된 미국물리학회지 “The Physical

### ● 용어해설 ●

**양자 중속 레이저(Quantum Cascade Laser: QCL):** 양자 중속 레이저는 반도체 양자우물구조의 subband 사이의 전자-정공 천이를 이용한 레이저로서, 빛이 발광하는 층을 복수 개 연결한 활성구조를 사용하여, photon energy의 작은 파장 영역에 있어서도 고효율이 얻어지는 관계로 초소형 고효율 레이저 광원으로 각광 받고 있다. 양자 중속 레이저는 특별하게 가공된 반도체 이종접합 구조의 전도 띠에서 inter-subband 전이를 기반으로한 단극 소자이다. 전도대의 전자와 가전자대의 정공이 결합하여 활성영역 반도체에서 발생하는 기존의 반도체 레이저 구조와는 대조적으로 동작하게 된다. 양자 중속 레이저 구조에서 subband에서 에너지함수 인가 바이어스 및 각 레이저의 두께에 의해 조절될 수 있으며, 반도체 밴드 갭은 가장 관계가 없다. 그 결과로 InGaAs/InAlAs 또는 GaAs/AlGaAs 구조에서 그들 고유의 밴드 갭에 관련된 것보다 더 긴 방출 파장레이저를 만들어 사용할 수 있다. 중요한 점은 소자의 결정 성장과 함께 THz 소자를 만드는 데 기반이 되며 이것은 지속적으로 성장하는 동안 재현성을 가질 수 있는 THz 구조를 만들 수 있다.

Review”의 제 1권 1페이지의 “A study of the transmission spectra of certain substances in the infrared”란 제목으로 소개된 논문[7]에 적외선으로부터 밀리미터파에 걸친 THz 대역에는 고체 내부의 광학 phonon 산란·플라즈마 주파수, 이온분극·배향분극 등의 유전성, 초전도체 에너지갭(energy-gap), 분자·고체 내의 각종 진동수/분자간 상호작용 등의 흥미 깊은 물성이 존재하며, 또한 바이오·생체·약품 등의 분석에 필수적인 영역으로서 science의 寶庫로서, 오랫동안 연구해오고 있다. 특히, 일본의 경우(THz-연구라인을 구축함: 북해도에서-남쪽 큐수까지), 본격적인 THz 대역 분석 연구가 시작된 것은 1952년 길영(吉永) 등이 원격외선회절분광 장치를 개발하면서부터이다.

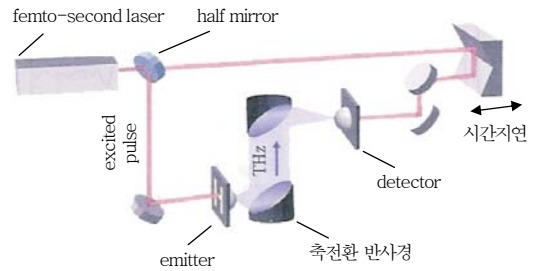
### Ⅲ. THz파 기반기술 연구현황

#### 1. THz파 분광 이미징 분석기술

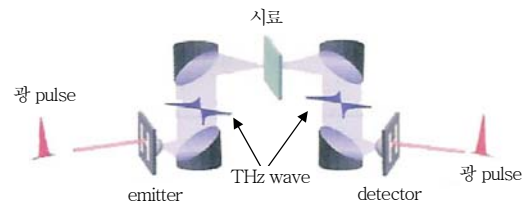
THz 전자파를 사용한 분광·이미징 기술이 급속히 발전하고 있다. 우선 주목해야 할 기술은 시간영역분광법이다. THz-TDS 시스템의 개념도를(그림 2)에 나타내었다. 주요한 구성요소는 펨토초 레이저, THz파 발생 소자, THz파 검출 소자, 시간 지연 스테이지 등이다. THz파 발생(광)원으로서는 반도체 광전도 스위치, 반도체기판, 비선형 광학결정 등이 이용되고 있다. THz파 발생 원리는 개발 방식에 따라 다소 차이가 있지만, 펨토초 레이저가 반도체 광전소자에 입사함으로써 THz 전자기 펄스가 발생되고, 공기 중에 전파(propagation)되어 검출기에 도달한다. THz 광이 도달하는 순간에만 동작하는 THz 검출기에는 나누어진 검출펄스가 인도되고, 그 검출된 광펄스에 시간지연을 부여하여서, 시간영역파형을 갖게 할 수 있다. 대표적인 검출 방법으로는 광전도 스위치 및 전기 광학(E-O) 결정을 사용하는 두 가지 방법이 있으며, 각각 고유한 특징을 가지고 있다.

주요한 개발요소로서는 광원의 고출력화[8], 광

대역화[2], 전반사분광(ATR)[9], 1.5 $\mu\text{m}$  펨토초 레이저 이용[10], 다이내믹 분광시스템 개발[11] 등이 있다. 최근의 연구성과로서는 광스위치를 사용한 초광대역 THz파 발생 연구가 있다. (그림 3)에는 두께 30 $\mu\text{m}$ 의 GaSe 결정을 사용한 광 정류(recti-

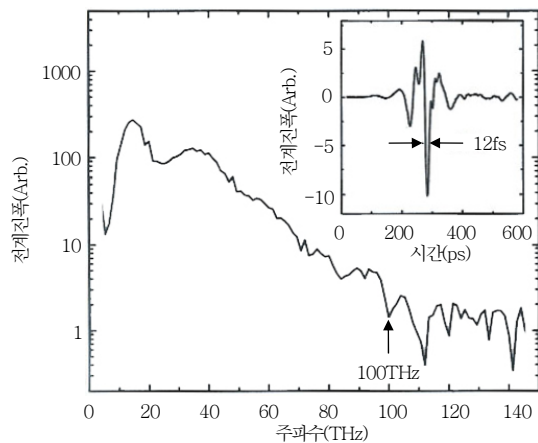


(a) THz 시간 영역 분광 시스템의 모식도



(b) THz Imaging의 구성

(그림 2) THz 시간 영역 분광 시스템과 Imaging 측정 시스템 구성



(그림 3) 광전도 안테나에 의한 초 광대역 THz 전자기파 검출 예. 펄스폭 10fs인 Ti:sapphire를 광원으로 하여 두께 30 $\mu\text{m}$ 의 GaSe 결정을 사용한 광 정류 작용에 의한 THz파를 전극 간격 5 $\mu\text{m}$ 의 다이폴 광전도 안테나를 사용해서 검출한 예. 삽입 그림은 시간 영역 파형으로서 반치폭은 약 12fs이다.

fication)에 의한 발생과 전극 간격(gap)  $5\mu\text{m}$ 의 다이폴(dipole)형 광전도 안테나에 의한 검출을 조합시켜 실현한 경우의 전자파 특성을 표시하였다. (그림 4)는 p-InAs 기판으로부터의 방사되는 THz파 스펙트럼의 여기 파장의존성을 나타낸다. 검출기 여기용으로도 동일 파장을 사용하고,  $1.5\mu\text{m}$  대역 펄스 레이저를 사용하여 약 4THz까지의 대역을 갖는 THz-TDS 시스템 개발이 가능해 보인다.

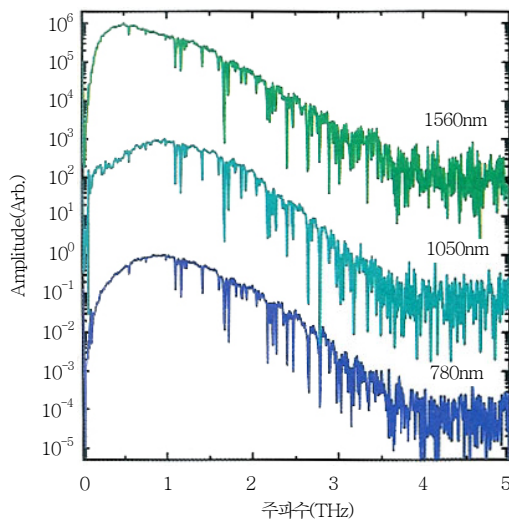
수분을 함유하고 있는 시료를 평가하기 위해서는 투과형 TDS는 수분에 의한 흡수가 매우 크기 때문에 곤란하다. 이런 문제를 해결하기 위하여, THz 시간영역 전반사 감쇠 분광(TDS-ATR)법이 개발되었다. THz 감쇄(evanescence)파를 사용함으로써, 바이오계 시료의 평가에 새로운 돌파구를 마련하기 위하여 개발이 계속되고 있다.

THz-TDS는 분광법으로 유용할 뿐만 아니라, 이미징 기술로서도 기대되고 있다. (그림 2b)에 나타낸 바와 같이, THz beam을 주사(scan)함으로써 이미징 분광이 가능하기 때문에 개발이 활발하게 진행되고 있다. 주요한 개발요소로서는 고화질화·고속화·소형화·고분해능화 등이 거론되고 있다. (그림 5)에 THz-TDS 영상 장치에 의한 관측 예를 표시하였다[12]. 건조시킨 고추와 새우의 투과상으로서, 내부 장기들이 명확히 관측되고 있는데, 초기의 관측 결과와 비교해 보면 현저히 진보된 결과이다. 최종의 고분해능 접근법으로서 SPM(주사형 probe 현미경)과 융합시킨 것으로서, 근접장형(near field type) THz 이미징 시스템 개발에도 정력적으로 몰두하고 있다[13].

THz-TDS와는 별도로 THz 고출력 광원의 개발도 진행되어, 분광·이미징 시스템으로의 응용이 추진되고 있다. THz파 발생기로서는 parametric 발생과 차주파수 발생이 있다.

Parametric 광원으로서 LiNbO<sub>3</sub> 등의 비선형 결정에 광강도가 강한 펄스 여기광을 입사시켜, 광학활성 phonon과의 상호작용에 의하여 THz source 광과 idler 광으로 분리되는 원리를 사용한다. 최근에 개발된 광주입형 THz파 parametric 발생기(IS-TPG)의 실험개념도를 (그림 6)에 나타내었다. 이것은 푸리에 한계의 단색성을 갖는 상온 동작의 광대역 파장가변 THz파 광원으로서, peak 출력도 수

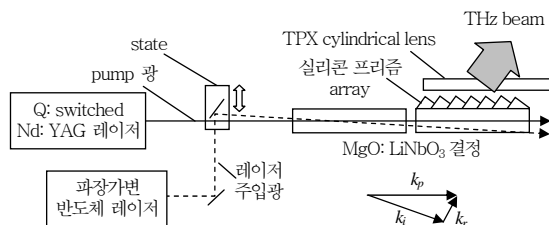
THz-TDS는 분광법으로 유용할 뿐만 아니라, 이미징 기술로서도 기대되고 있다. (그림 2b)에 나타낸 바와 같이, THz beam을 주사(scan)함으로써 이미징 분광이 가능하기 때문에 개발이 활발하게 진행되고 있다. 주요한 개발요소로서는 고화질화·고속화·소형화·고분해능화 등이 거론되고 있다. (그림 5)에 THz-TDS 영상 장치에 의한 관측 예를 표시하였다[12]. 건조시킨 고추와 새우의 투과상으로서, 내부 장기들이 명확히 관측되고 있는데, 초기의 관측 결과와 비교해 보면 현저히 진보된 결과이다. 최종의 고분해능 접근법으로서 SPM(주사형 probe 현미경)과 융합시킨 것으로서, 근접장형(near field type) THz 이미징 시스템 개발에도 정력적으로 몰두하고 있다[13].



(그림 4) 파장 780, 1050, 1560nm의 Femto-second Laser를 사용한 p-InAs 기판 표면으로부터 THz파를 저온 성장 GaAS 광전도 스위치에 의하여 측정한 예



(그림 5) THz-TDS 시스템을 사용하여 관측한 고추와 새우의 이미지



(그림 6) 광 주입형 THz파 Parametric 발생기의 블록도

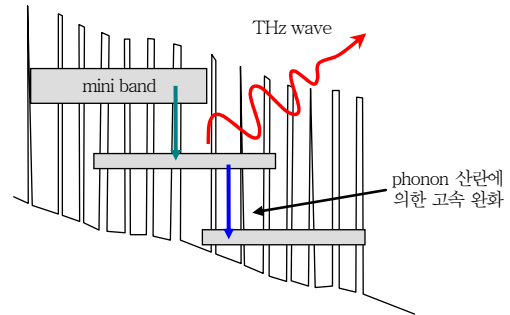
백 mW(에너지 출력: 1nJ 이상)를 가지고 있어서, 향후 여러 가지 응용이 기대된다.

차주파수 발생 원리는 파장이 약간 다른 두 개의 광원을 비선형 광학결정에 조사할 경우 발생하는 이차비선형 효과를 통해 여기되는 차주파수 항이 THz 광원으로 되는 것으로서, 최근에는 일본반도체연구소가 GaP 반도체기판을 사용하여, 고효율 THz 광원의 개발에 성공하였다[14]. 펄스 레이저 광원을 사용하는 경우, 펄스 빔 자신의 파장이 넓어지기 때문에 차주파수에 대응하는 THz파의 발생도 가능하고, THz-TDS 광원으로서 폭넓게 사용되고 있다. 대표적인 재료로는 ZnTe, GaSb, GaAs, GaP, DAST 등이 있다. THz파 광원으로서 탐색적 요소가 크고, 새로운 유전체 결정·유기물 결정을 사용한 THz파 광원의 탄생 가능성도 크다.

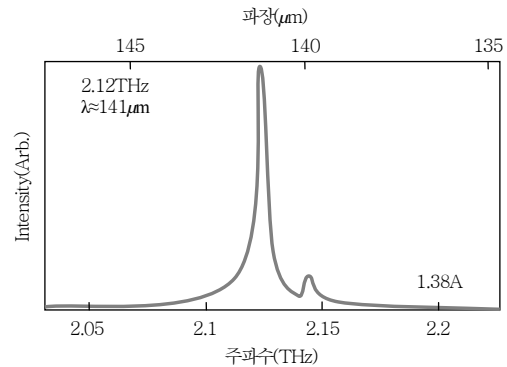
## 2. THz파 광공학 및 전자공학

THz파 광원개발을 위하여 전자 디바이스 개발에서 사용되었던 접근방식이 활발하게 진행되고 있다. NTT의 石橋 등이 개발한 단일주행(종방향) carrier photodiode(Unit Transverse Carrier-photodiode: UTC-PD)는 광 응답이 아주 고속이어서, photo-mixing 방식보다 고효율 THz파 발생이 가능하다. 한편, 주목 받는 다른 소자로서는 THz 대역 양자속 레이저(QCL)가 있다. (그림 7)에 표시한 바와 같이 복잡한 양자 우물구조를 성장한 후, 미니 밴드간의 천이를 이용하는 것으로서, 완화 에너지 값이 수 meV 정도이고, THz파 대역의 발진이 가능하다 [4]. (그림 8)에 2.12THz 발진을 하고 있는 모습을 표시하였다[5]. 주요한 개발과제는 저문턱값화, 발진의 저주파수화 및 고온동작화 등이 있고, 특히 미국을 중심으로 활발히 연구되고 있다. 일본 동북대학의 대곡(大谷) 등은 단파장 QCL 기술에 있어서 세계를 리드하고 있다. 한편, THz-QCL의 개발은 미국이 중심이 되어 빠르고, 급격하게 연구가 진전되고 있다.

그 이외에 공명투과다이오드(RTD), TUNNETT 다이오드[15], 정전유도 트랜지스터[16], 이차원 플라즈몬 공명형 photo-mixer, p-Ge laser[17] 등



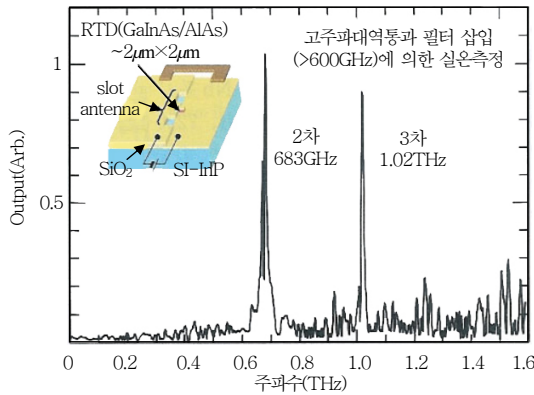
(그림 7) THz 양자 우물 구조 레이저의 동작원리



(그림 8) THz 양자 우물 구조 레이저로부터의 2.12THz 수신 신호

다양한 THz파 디바이스가 연구되고 있다. 최근 천전(淺田) 등은 RTD 발진 파장의 3배에 달하는 3배 파를 얻어내는 데 성공하여 1.02THz의 광원 개발에 성공하였다(그림 9) 참조. 이것은 단일개체 전자 디바이스의 실은 발진으로서는 세계 최고 주파수이다. GaInAs/AlAs 양자 우물구조를 사용한 RTD이며, 미세 슬롯 안테나를 집적화시킨 것으로서, 향후의 전개가 기대된다. 또한, 평천(平川) 등은 광여기의 Bloch oscillation을 관측하는 데 성공하는 등 [18], 향후의 THz파 발진 디바이스의 전개가 기대된다. 한편, THz파 검출기술로서는 시간영역용으로 저온성장 GaAs, E-O 효과 등이 사용되고 있고, 재료 검색을 포함하여 고감도·광대역화가 주요 과제로 되어 있다. 또한, 비시간영역에 대해서는 다양한 소자 가운데 bolometer, 초전소자(pyroelectric devices), 초전도 검출기(superconductor detector) 및 THz 대역 단일 광자 검출기 등이 중요한 디바이스다.





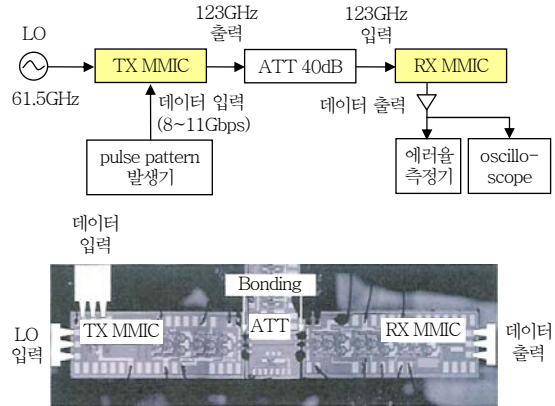
(그림 9) GaInAs/AlAs 구조 공명 투과 다이오드에 의한 발진. 600GHz 이상의 고주파 투과 필터를 삽입하여 2차로 683GHz 및 1.02THz의 수신이 관측되었다.

### 3. THz 주변 기술

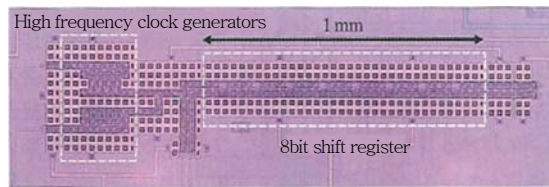
광 THz파 변환용 광원으로 사용되는 레이저도 중요한 개발요소이다. 펨토초 레이저로서는 compact · 고안전성 등의 측면에서 보면 광섬유 레이저의 성능이 급속히 좋아지고 있어서 THz파 발생용 광원으로서 기대되고 있다. 또한, Ti:sapphire계 펨토초 레이저로서는 단파장 펄스화 구현이 주요 연구 과제이고 시간영역 분광법에서는 초광대역화가 기반기술이 되고 있다.

THz 무선 및 계측응용의 기반기술로서는 THz 파 신호처리 디바이스 개발이 중요하다. InP계 화합물 반도체로서는 차단(cutoff) 주파수가 500GHz를 뛰어넘어 집적화 연구를 비롯하여 다양한 고속회로 제작이 시도되고 있다[19]. (그림 10)에 120GHz 무선통신용 MMIC의 개략적인 사진을 나타내었다. 현재 무선통신개발에서는 photo-mixing 기술이 사용되고 있어서 전전기(all electrical) THz 무선통신 구현을 위한 개발이 진행되고 있다.

초고속 집적회로의 발명 문제를 해결하기 위하여 초전도 단일자속 양자 논리회로의 개발도 활발하게 진행되고 있다. (그림 11)에 동작주파수 120Hz를 실현한 8bit shift resist의 개략도를 표시하였다[6].



(그림 10) 120GHz 대역 무선 링크용 MMIC 사진과 120GHz 대역 송수신 MMIC에 의한 10 Gb 무선 링크 전송 실험 시스템의 블록도



(그림 11) 120GHz 동작을 실현한 초전도 단일 자속 양자 이온 회로에 의한 8bit shift register. 128개의 조셉션 접합으로 구성되어 있고 소비전력은 41μW이다.

## IV. THz파 응용 연구개발의 현황

### 1. 응용이 목표로 하는 분야

THz 기술이 절실하게 개척해 나갈 응용분야로서 주요 3분야 즉, THz파 · THz 광공학 · THz 전자공학의 융합에 의해, 정보통신 · 생명 · 의료 · 안전 · 건강 · 산업 · 환경 · 우주과학 등 폭넓은 전계가 기대되고 주된 응용은 분광 분석분야와 정보통신분야로 대별된다. 분석응용의 관점에서 볼 때, THz파는 다양한 물질을 투과하며, X-선 · laser 등에 비교하여 안전하고, 물질 고유의 투과 · 흡수 · 반사특성(지문 스펙트럼)을 나타내는 등 다양한 장점을 가지고 있다. 분석분야에서는 생체 · 고분자 · 전자재료 등 다양한 물질의 분광분석 및 이미징 기술을 결합한 의료진단 · 은의물(隱匿物) 검사 · 바이오 매트릭스

등으로의 응용이 연구되고 있다.

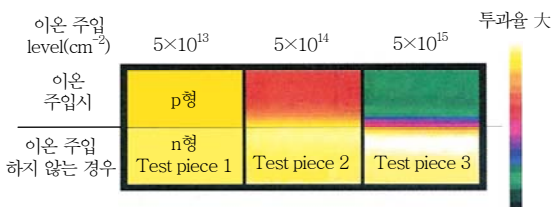
## 2. 분석분광 · 이미징 응용

THz-TDS의 실현에 의하여, THz 대역과 연관된 복소굴절률 · 복소유전율 · 복소전도율 등을 쉽게 측정 · 평가할 수 있고, 다양한 물질과 연관된 THz 대역 고유물성이 점차 분명해지고 있다. 최근에는 미국 · 영국 · 일본 등에서 연속적으로 THz-TDS 시스템, THz 분광장치, 이미징 시스템의 상품화가 시작되어 조금씩 보급되는 환경이 마련되고 있다.

분석응용으로서 우선 전자재료 · 공업재료 평가로의 응용을 열거할 수 있다. 예를 들어, (그림 12)에 THz-TDS와 이미징을 결합한 시스템에 의해 이온 주입량의 차이를 매핑한 결과를 표시하였다.

이외에 산업분석응용이 기대되는 예로써, Laser-THz-Emission 현미경(LTEM)을 사용한 LSI 불량고소 특정장치가 있다[20]. LTEM은 펄초 레이저 조사에 의하여 다양한 물질로부터 THz파가 방사되는 특성을 이용하여 물질의 THz파 방사 영상을 얻는 것으로서 분해능은 사용된 레이저 빔의 지름에 의하여 정해지기 때문에 수백 nm의 크기의 구조체까지 평가가 가능한 것이 기대된다. (그림 13)에 LSI(MPU 6502)의 LTEM 이미지를 나타내었다. 현재의 분해능은 약 3 $\mu$ m이다. (그림 13)에는 OP-Amp의 일부를 의도적으로 단선시켰을 때 관측한 LTEM 이미지를 나타낸다. 분명히 다르게 관측되는 관계로 향후의 응용전개가 기대된다.

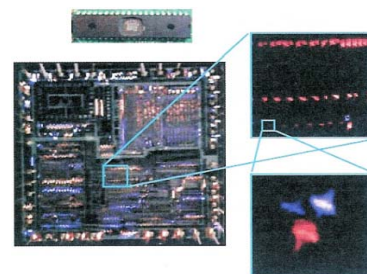
의료 · 바이오 · 의약품 분석 등으로의 응용도 활발히 연구되고 있다[21]. THz 대역의 정보에는 수



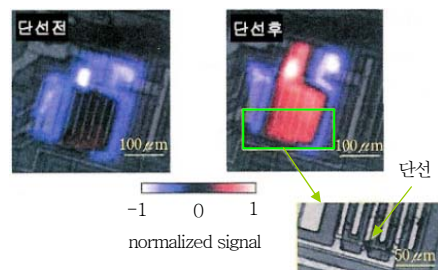
(그림 12) n형 실리콘 웨이퍼의 우측 반쪽에 보론 이온을 주입한 웨이퍼의 다면 THz 투과 이미지

소결합 상태와 분자간 상호작용 등이 포함되어 있는 관계로 다양한 분자식별에 이용될 수 있는 가능성이 높다. 예를 들면, DNA 한 가닥 사슬/두 가닥 사슬의 판별이 가능하다고 보고되어 있어 현재에는 DNA 칩의 응용연구가 진행되고 있다. 생체 세포의 수분량에도 매우 민감하기 때문에 암세포 이미지를 얻기 위한 응용도 폭넓게 연구되고 있다. 특히, 피부암 검사의 가능성이 논의되고 있어 장래에는 암세포의 온라인 진단 등으로 응용이 기대되고 있다. 또한, 아미노산, 당, 염기 등의 생체관련 물질은 THz 대역에서 특징적인 흡수를 보이는 것으로 알려져 있어 의약품 분석응용도 기대된다. (그림 14)에 의약품 barbital (최면제)를 가열한 경우의 THz 대역 흡수계수의 변화를 나타내었다. 그림에서 보여진 바와 같이 “A”와 “B”의 차이는 성분에는 변화가 없고, 결정의 다양한 모양에 의한 것으로서, 그러한 동정/정량에 이용 가능하다.

THz파는 안전 · 안심 사회 구현을 위한 핵심기술로서 필수 불가결하다. 먼저, 금지약물 · 위험물 등



(a) 레이저 THz 방사 현미경(LTEM)에 의한 마이크로 프로세서(MPU6502)의 관측 예. 분해능은 약 3 $\mu$ m



(b) 회로의 일부를 단선시킨 경우의 OP amp의 LTEM 이미지. 단선에 의한 이미지가 크게 다른 것을 확인할 수 있다.

(그림 13) LSI 회로의 LTEM 이미지 변화

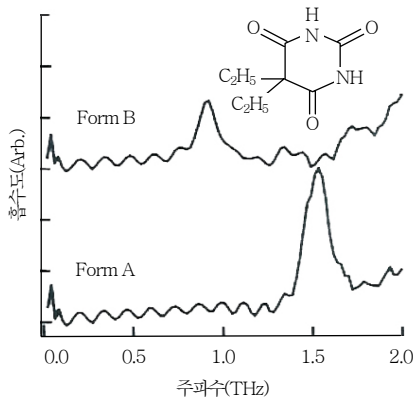
의 비파괴·비침습 검사 응용이 기대되고 있다 [22]. 봉투 안에 담겨 있는 코카인(마약) 등의 검출이 가능하고, 우편물 검사방법의 개발 등에 몰두하고 있다. 수분을 포함한 물질의 검사에도 위력을 발휘해서 식품·농작물 관리 등에도 응용이 검토되고 있다. 미국에서는 THz-TDS와 THz파 카메라를 사용하여 공항 내의 은폐물 검사, 옥외의 위험물 탐지, 개인조회기술의 개발도 정력적으로 수행되고 있다.

THz-QCL 응용으로서의 단거리 통신 및 이미징 시스템의 전개가 기대되고 있지만, 아주 가까운 장

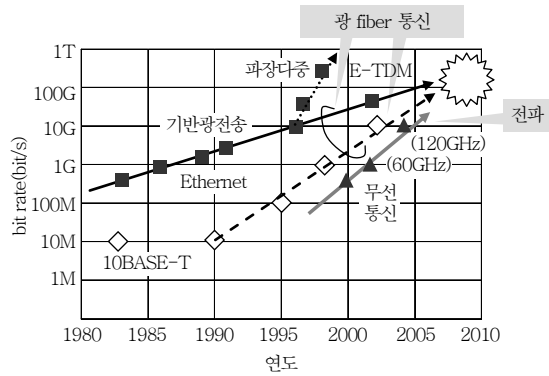
래에 응용 가능한 가스분석 등도 향후의 환경계측 기술로서 중요한 기술이다.

### 3. 정보통신 응용

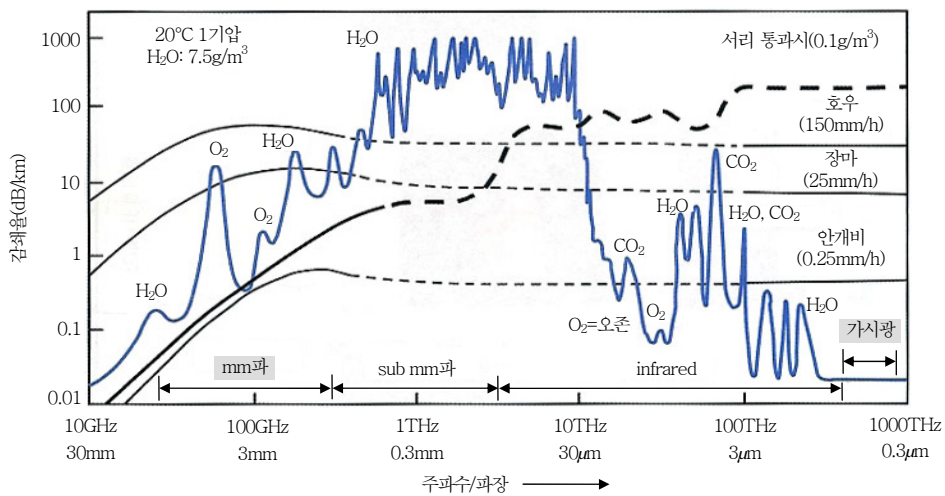
고속·대용량 및 자유로운 정보통신 환경조성을 하여 많은 노력이 이루어지고 있다. 무선 LAN은 UWB와 60GHz 무선통신 등에 의하여 1Gbps 이상의 통신속도가 실현되었기 때문에 10Gbps 이상의 무선통신 개발을 향하여 연구개발도 시작되었다. (그림 15)에 표시한 바와 같이, 미래 광섬유 기반(基幹) 네트워크와 무선통신 시스템이 끊임 없이 연결되는 환경으로 향하고 있고 새로운 응용분야를 개척하는 것도 기대된다. THz 무선통신 개발에 있어서



(그림 14) 의약품 Barbitol의 결정형태에 의한 THz 흡수 스펙트럼의 변화. Form A는 실온에서 아세톤/물로부터 재결정화된 것. Form B는 160°C에서 30분간 가열한 것. 중적의 스펙트럼에는 거의 변화가 나타나지 않는다.



(그림 15) 각종 통신에 있어서 비트율 진화

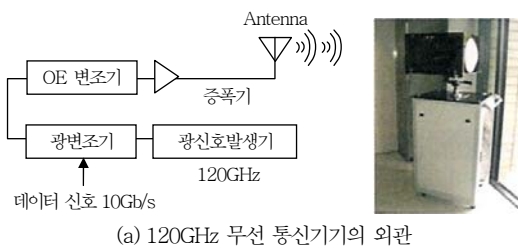


(그림 16) THz 전자기파의 전송 시 대기 감쇠의 모습

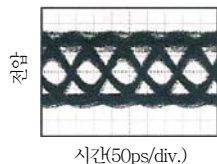


의 장애요인은 수증기에 의한 전자파의 흡수이다. (그림 16)에 표시된 바와 같이 400GHz에서 10THz 까지는 커다란 흡수 대역이 있어서 중장거리 무선통신용에는 적합하지 않다. 현재까지는 UTC-PD와 photo-mixing 기술을 사용하여 120GHz 대역의 무선 필드 테스트를 시작하고 있고(그림 17 a), 10Gbps 무선통신을 개발을 진행하고 있다. (그림 17b)에 표시된 바와 같이 eye-pattern으로부터 10Gbps 무선통신이 가능하다는 것을 나타내고 있다. 옥외의 단거리 무선통신은 300GHz 정도까지는 현실적으로 무선통신 대역이고, 40Gbps 정도까지는 실현될 가능성이 높다. 한편, 옥내용 단거리 무선 통신에서는 THz-QCL의 출현에 의하여 그다지 제한받지 않고 이용가능 범위를 넓히는 것이 가능하다.

광통신 분야에서는 10Gbps의 Ethernet이 유선 기반의 LAN으로서 보급이 시작되고 그의 진전에 수반하여 기간 네트워크에서는 매초 수백 Gb의 전송량 실현을 목표로 하여 개발을 진행하고 있다. 가까운 장래에 기간 네트워크 노드 및 서버와 연관된 대용량 정보처리가 불가결하다. 이를 실현하기 위해서는 THz 디바이스·집적회로의 구현이 중요한 관건이다. 현단계에서 이러한 개발을 위해 화합물 반도체 집적회로에 의한 고속 ADC[23] 및 SFQ 회로에 의한 광 pocket switch의 개발이 진행되고 있다. (그림 18)에 40GHz×4=160Gbps의 SFQ 광 poc-

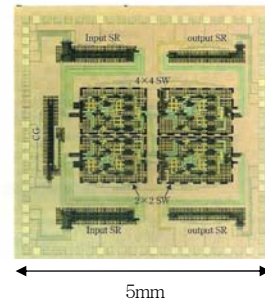


(a) 120GHz 무선 통신기기의 외관



(b) Bypass. 10Gbit/s의 전송이 실현되었다.

(그림 17) UTC-PD와 Photo-mixing을 사용한 무선 필드 테스트



(그림 18) SFQ 회로에 의한 40GHz×4 광 Pocket Switch

ket switch의 사진을 나타내었다. SFQ 회로에 의한 광 pocket switch는 반도체 사용보다 저소비전력이 되고, 시스템으로의 크기도 초소형으로 제작하는 것이 가능하다. 또한 반도체 논리회로에서는 대용이 어려울 것으로 보이는 160GHz×1의 개발도 가시권에 들어왔다[24]. 최종적으로는 초전도 디바이스와 화합물 반도체 디바이스의 혼성(hybrid) 시스템이 차세대 광 정보통신을 지탱하는 것으로 될 것이다.

#### 4. 그 외 다른 기초과학 응용 및 시너지 효과 등

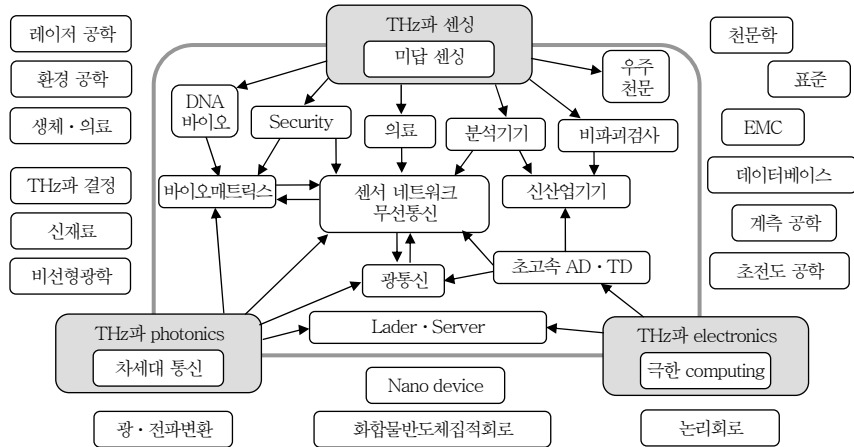
오래 전부터 THz 연구를 견인하였던 분야로서 우주·천문 연구와 연관된 THz 기술이 있다. ALMA 계획에 있어서 THz 검출기의 개발은 세계적인 과제로서 진행되고 있다. SMILE 프로젝트에 있어서 위성으로부터의 THz 대역 지구환경계측과 나란하게 ASFRO-F에 관련된 THz 이미징 어레이의 개발 등 대규모 프로젝트가 추진되고 있다. 천문·우주연구에 있어서 THz 응용은 일본 내에서 산업분야로는 아직 인식되지 않고 있지만, 세계적으로 보면 이미 거대한 시장을 가지고 있는 산업기반이다.

### V. 전망과 과제

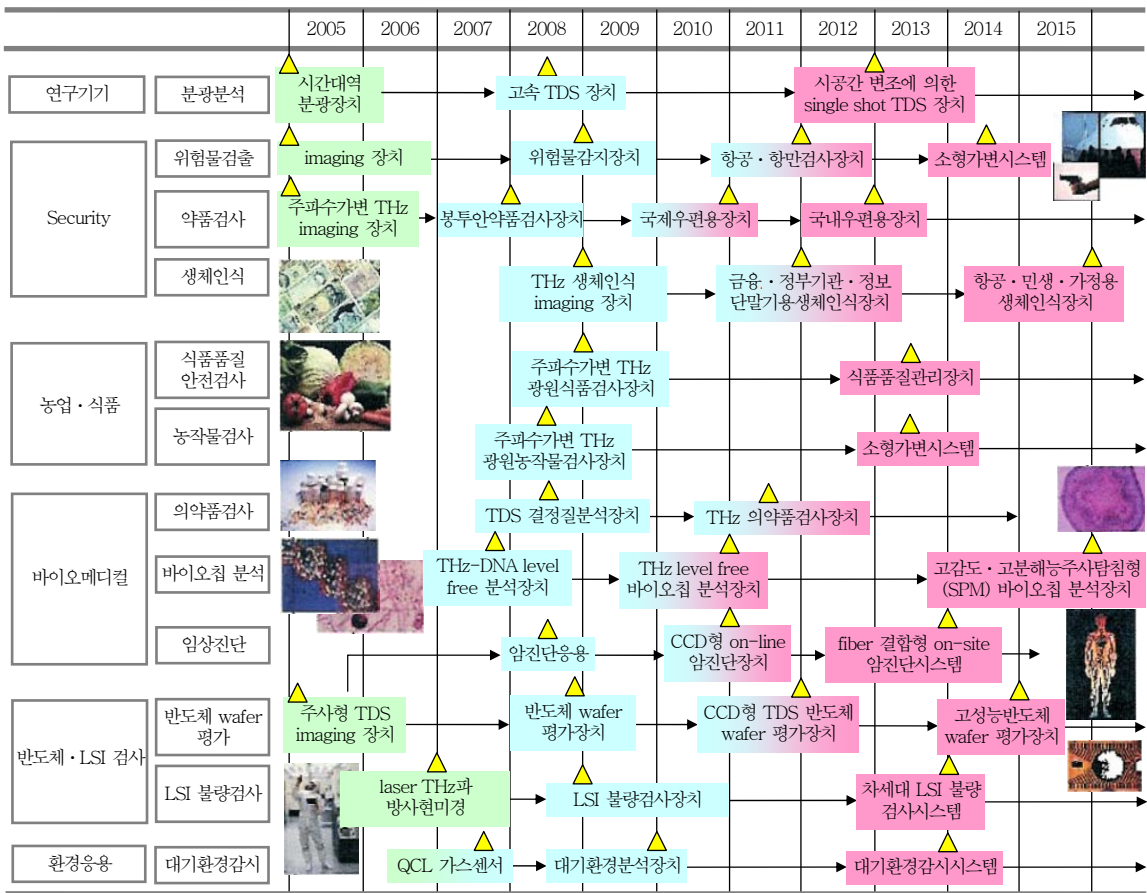
#### 1. THz 기술이 개척할 미래상

THz 기술이 개척해야 할 응용은 더없이 광범위하여서 다양한 학문 위에 성립한다. (그림 19)에 향

후 전망의 이미지를 정리하였다. 중요한 점은 THz 파 기술은 나노 기술과 같이 다양한 분야를 직접 연결하는 기술로서, 다양한 분야에서 새로운 과학과 산업의 창출이 기대된다. 예를 들어, 분광분석기술



(그림 19) THz 기술이 목표로 하는 분야

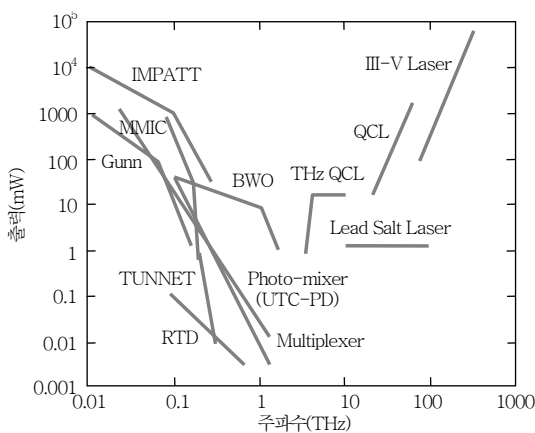


(그림 20) THz 분광-imaging 응용기술의 로드맵

이 전개할 것으로 기대되는 분야의 로드맵을 (그림 20)에 나타내었다. 응용분야는 연구기기·안전·바이오메디컬·농업/식품·반도체 산업·환경 응용 등의 분야에서 다양한 응용에 맞는 기기를 개발하는 것으로서, 새로운 산업응용이 개척된다. 정보통신 분야에 있어서도 무선통신과 계측기기 등의 개발에 관한 로드맵도 책정하는 것이 가능하다. 이런 것들을 실현하기 위해서는 디바이스 개발 등 기반기술의 진전이 필요하다.

## 2. 해결해야 할(맞서야 할) 과제

THz 산업을 전개하는 데 있어서 다양한 연구과제가 존재한다. 한 예로써, CW 광원에 관한 주파수와 각종 디바이스의 출력을 정리한 것을 (그림 21)에 표시하였다. THz 대역에 대한 계측기기의 개발은 일본 내에서는 거의 실시하지 못하고 있기 때문에 THz파 공학의 발전에 있어서 계측기기 개발에 대한 투자는 빠뜨릴 수 없는 것이다. 또한 통신응용 및 센싱·안전응용에서는 THz 전자환경양립성(EMC) 연구와 표준화가 불가결하고 조기 착수가 요망된다. 또한, THz 대역에 있어서 분자간 상호작용 등 이제까지 밝혀지지 않은 물리현상에 관한 정보가 숨겨져 있어서 응용개발을 위해서는 다양한 물질의 THz 물성 데이터베이스를 구축하는 것도 필수 불가결하다. 그 외에 중요한 과제로서는 고감도 THz 검출소자·



(그림 21) THz 대역 CW 광원의 출력

THz 카메라 등의 개발, 양자중속 레이저(QCL)의 tunnable화·고출력화·저문턱 전류화·고온 동작화·집적회로의 고밀도·저소비 전력화 등이 열거된다. 각 응용분야에 있어서의 구체적인 예를 <표 1>에 소개하였다.

이상과 같은 과제해결을 위해 로드맵에 따르면 연구개발도 가능하고, 덧붙여 다양한 시너지 효과로부터 새로운 응용의 탄생도 크게 기대된다. 미국에 비하여 일본의 경우, 진행되는 연구과제도 많고, 또한 THz파·THz-photonics·THz-electronics의 세 분야를 종합적으로 추진하고자 하는 아이디어는 일본 독자적인 것이고 세계를 리드하는 연구분야를 구축할 수 있는 환경이 있다. 하지만 아직 THz 연구 분야는 미성숙 분야로 있고, 탐색적·도전적인 요소를 많이 포함하고 있기 때문에, 기초과학·기반기술 육성과 응용분야 개척을 위하여 산·학·연이 협동

<표 1> THz 당면 과제 예시

분야	과제
정보통신	THz 대역 무선·광통신, 초고속 정보처리 시스템, THz IT 소자, 고주파 계측기기, THz파 센서·카메라, 센서 네트워크, 바이오매트릭스, 위성간 통신, 무선이동통신 시스템, 기기 EMC
바이오·생체·의료·약품	암 진단·결정구조(여러 모양) 검사 등 각종 전문분석·계측기기, 바이오·생체·의약품 데이터베이스, 분자구조해석, 의료현장 onsite imaging 분석 시스템, EMC, 의료 응용을 위한 THz-FEL
안전·환경·사회기반	위험물·우편물 검사 시스템, 안전관련 물질 데이터베이스, THz 센서, 카메라, 바이오매트릭스, 환경 분석 시스템 및 환경물질 데이터베이스, 충돌방지 차량탐재 센서, 도로 환경 모니터링 등의 교통안전 기술, 차량 탐재 IT 기지국, 재해 시의 무선이동통신 시스템, QCL을 사용한 가스 분석기술
산업응용·표준	산업응용분석, 이미징 장치, THz 카메라, 나노재료 분석장치, 반도체, 전자재료 평가장치, LSI 불량분석 시스템, 농작물 육성관리 시스템, 식품 검사, 관리기기 개발, 식품·식물관련 데이터베이스, 전력·주파수 등 각종 THz 표준화 기술, EMC
기초과학·우주	고기능 THz 분광 이미징 장치, THz devices, 고기능 THz-FEL 개발, 양자 잡음 급 THz 센서·Imager, THz 국부발진기, 분자구조 해석응용, 탐색적 응용연구, 각종 데이터베이스

으로 연구개발 프로젝트를 추진하는 것이 중요하다.

## VI. 결론

THz 기술의 새로운 틀을 짜는 데 있어서의 기본적인 전망을 소개하였다. THz파 공학, THz파 photonics, THz파 electronics의 3가지 분야가 융합함으로써, 정보통신·의료·안전·건강·산업·환경·우주·과학 등 폭넓은 분야에서 전개가 기대되고, THz파 기술은 중점연구분야에 대해서는 횡단적으로 전개되는 기반기술이고, 차세대 핵심기술의 하나로 거론되고 있다. 다양한 분야에 있어서 새로운 산업화 실현이라는 과제를 해결하기 위하여, 분야를 막론하고 경계 없는 대처가 필요하기 때문에 다양한 관계자의 횡단적 연휴와 산·학·연에 의한 효과적인 연구개발 프로젝트의 추진이 중요하다.

## 약어 정리

E-O	Electro-Optical
MMIC	Microwave Monolithic Integrated Circuit
SFQ	Superconductor Flux Quantum
THz-QCL	THz Quantum Cascade Laser
THz-TDS	THz Time Domain Spectroscopy
THz	Terahertz
UWB	Ultra Wide Band

## 참고 문헌

[1] D.H. Auston, K.P. Cheung, and P.R. Smith, "Pico-second Photoconducting Hertzian Dipoles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.45, 1984, p.713.

[2] C. Kubler, R. Huber, S. Tubel, and A. Leitenstorfer, "Ultrabroadband Detection of Multi-terahertz Field Transients with GaSe Electro-optic Sensors: Approaching the Near Infrared," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.85, 2004, p.3360.

[3] B.B. Hu and M.C. Nuss, "Imaging with Terahertz Waves," *Opt. Lett.*, Vol.20, 1995, p.1716.

[4] R. Kohler, 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, 2002, p.156.

[5] B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J.L. Reno, "Resonant-phonon Terahertz Quantum-cascade Laser Operating at 2.1THz," *Electron. Lett.*, Vol. 40, 2004, p.431.

[6] H. Akaike, T. Yamada, A. Fujimaki, S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, Y. Kitagawa, and M. Hidaka, "Demonstration of a 120GHz Single-flux-quantum Shift Register Circuit Based on a 10kA cm<sup>-2</sup> Nb Process," *Supercond. Sci. & Technol.*, Vol.19, 2006, p.320.

[7] E.F. Nicols, "A Study of the Transmission Spectra of Certain Substances in the Infrared," *Phys. Rev.*, Vol.1, 1893, p.1.

[8] N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida, and Z.L. Liu, "High Average-power THz Radiation from Femtosecond Laser-irradiated InAs in a Magnetic Field and Its Elliptical Polarization Characteristics," *J. Appl. Phys.*, Vol.84, 1998, p.654.

[9] H. Hirori, K. Yamashita, M. Nagai, and K. Tanaka, "Attenuated Total Reflection Spectroscopy in Time Domain Using Terahertz Coherent Pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, 2004, p.L1287.

[10] M. Nagai, K. Tanaka, H. Ohtake, T. Bessho, T. Sugiura, T. Hirosumi, and M. Yoshida, "Generation and Detection of Terahertz Radiation by Electro-optical Process in GaAs Using 1.56μm Fiber Laser Pulses," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.85, 2004, p.3974.

[11] R. Huber, C. Kubler, S. Tubel, A. Leitenstorfer, Q.T. Vu, H. Haug, F. Kohler, and M.C. Amann, "Femtosecond Formation of Coupled Phonon-Plasmon Modes in InP: Ultrabroadband THz Experiment and Quantum Kinetic Theory," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.94, 2005, p.027401.

[12] K. Kawase, "Terahertz Imaging for Drug Detection and Large-Scale Integrated Circuit Inspection," *Optics & Photonics News*, Vol.35, 2004, p.34.

[13] B. Knoll and F. Keilmann, "Infrared Conductivity Mapping for Nanoelectronics," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.77, 2000, p.3980.

[14] T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, T. Kimura, and K. Saito, "Tunable Terahertz Wave Generation in



- the 3-to 7-THz Region from GaP," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.83, 2003, p.237.
- [15] P. Plotka, J. Nishizawa, T. Kurabayashi, and H. Makabe, "240-325GHz GaAs CW Fundamental-mode TUNNETT Diodes Fabricated with Molecular Layer Epitaxy," *IEEE Tran. Electron. Dev.*, Vol.50, 2003, p.867.
- [16] J. Nishizawa, P. Plotka, and T. Kurabayashi, "Ballistic and Tunneling GaAs Static Induction Transistors: Nano-devices for THz Electronics," *IEEE Tran. Electron Dev.*, Vol.49, 2002, p.1102.
- [17] I. Hosako, "Multilayer Optical Thin Films for Use at Terahertz Frequencies: Method of Fabrication," *APPLIED OPTICS*, Vol.44, 2005, p.3769.
- [18] N. Sekine and K. Hirakawa, "Dispersive Terahertz Gain of a Nonclassical Oscillator: Bloch Oscillation in Semiconductor Superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.94, 2005, p.057408.
- [19] K. Ishii, K. Sano, K. Murata, M. Ida, K. Kurishima, T. Shibata, T. Enoki, and H. Sugahara, "90Gbit/s 0.5W Decision Circuit Using InP/InGaAs Double Heterojunction Bipolar Transistors," *Electron. Lett.*, Vol.40, 2004, p.1020.
- [20] T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita, and K. Kawase, "Laser Terahertz-emission Microscope for Inspecting Electrical Faults in Integrated Circuits," *Opt. Lett.*, Vol.28, 2003, p.2058.
- [21] R.M. Woodward et al., "Terahertz Pulse Imaging in Reflection Geometry of Human Skin Cancer and Skin Tissue," *Phys. Med. Biol.*, Vol.47, 2002, p.3853.
- [22] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Non-destructive Terahertz Imaging of Illicit Drugs Using Spectral Fingerprint," *OPTICS EXPRESS*, Vol.11, 2003, p.2549.
- [23] D.C. Larrabee et al., "Application of Terahertz Quantum-cascade Lasers to Semiconductor Cyclotron Resonance," *Opt. Lett.*, Vol.29, 2004, p.122.
- [24] H. Nosaka, M. Nakamura, M. Ida, K. Kurishima, T. Shibata, M. Tokumitsu, and M. Murakguchi, "A-24-Gbps 3-bit Nyquist ADC Using InP HBTs for Electronic Dispersion Compensation," *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S Int'l*, Vol.1, 2004, p.101.