

테라헤르츠 융합기술

Terahertz Convergence Technologies

목 차

- I . 서론
- II . 테라헤르츠 광원
- III . 테라헤르츠 검출기술
- IV . 테라헤르츠 분광(Spectroscopy)과 영상(Imaging)
- V . 테라헤르츠 융합기술
- VI . 전망과 전략

백문철 (M.C. Paek)	테라파기술팀 책임연구원
최상국 (S.G. Choi)	테라파기술팀 책임연구원
곽민환 (M.H. Koak)	테라파기술팀 선임연구원
김성일 (S.I. Kim)	테라파기술팀 선임연구원
강승범 (S.B. Kang)	테라파기술팀 연구원
류한철 (H.C. Ryu)	테라파기술팀 연구원
정세영 (S.Y. Jeong)	테라파기술팀 연구원
이승환 (S.H. Lee)	테라파기술팀 연구원
강광용 (K.Y. Kang)	테라파기술팀 팀장
마사요시 도노우치 (Masayoshi Tonouchi)	일본 오사카 대학교

테라헤르츠 기술은 최근의 첨단기술의 발전에 힘입어 미지의 전파자원에서 미래의 전파자원으로 인정되면서 세계적으로 점점 많은 주목을 받고 있고, IT, BT 등과의 융합을 통한 다양한 응용분야에서 그 중요성을 더해가고 있다. 여기에서는 테라헤르츠 기술에 대한 개념적인 소개와 함께 IT, BT를 비롯한 여러 다양한 분야와의 융합을 통한 기술개발의 현황과 미래에 대한 전망 등을 살펴보고자 한다.

I. 서론

테라헤르츠파는 적외선과 마이크로파의 중간영역에 해당하는 전자기파로서, 일반적으로 100GHz에서 30THz 범위의 주파수에 속하며 천문학 및 분 석과학 분야에서는 오래 전부터 연구되어 왔다. 최근에는 광자공학과 나노기술의 발전에 힘입어 더욱 많은 분야에 적용되고 있으며 융합을 위한 테라헤르츠 기술의 연구가 이루어지고 있는데, 그 분야에는 대표적으로 정보통신 기술(ICT)을 비롯한 생명 및 의학, 비파괴 평가, 보안 감시, 식품과 농산물의 품질관리, 지구환경 모니터링 및 초고속 컴퓨팅 기술 등이 속한다.

테라헤르츠 연구분야는 그 동안의 혁신적인 기술 발전에 힘입어 미래기술로서의 중심적인 위치에 서게 되었으며, 이러한 역할을 주도한 관련 핵심기술에는 테라헤르츠 시간 영역 분광(Terahertz-Time Domain Spectroscopy), 테라헤르츠 영상(THz imaging), 그리고 비선형 현상을 이용한 고풍력 테라헤르츠 발생 등을 들 수 있다. 이러한 기술들은 여러 가지 다양한 분야의 소재들을 분석하거나 통신용 수단으로 적용함으로써 종래의 기술과 다른 고유한 특성을 가진 새로운 기능을 수행할 수 있다.

● 용 어 해 설 ●

양자폭포레이저(Quantum Cascade Laser): 주로 적외선 이하 장파장의 전자기파를 방사하는 레이저로서, 반도체 밴드갭의 천이를 통한 일반적인 레이저와 달리 양자우물 구조로 형성된 서브밴드 간의 천이를 이용한다. 전자-정공의 재결합이 아닌 전자만의 천이를 이용하므로 반복적으로 형성된 양자우물 구조에서, 연속하여 계단식 방사를 할 수 있으므로 양자폭포 레이저라고 한다.

테라헤르츠 시간영역 분광(THz-TDS; Terahertz Time Domain Spectroscopy): 테라헤르츠 초단펄스를 이용한 분광법을 뜻한다. 일반적인 분광법과 달리 분석소재에 대하여 테라헤르츠파의 위상(phase) 및 진폭(amplitude)에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있으며, 특히 생체소재에 대해 비파괴 분석을 할 수 있는 것이 특징이다.

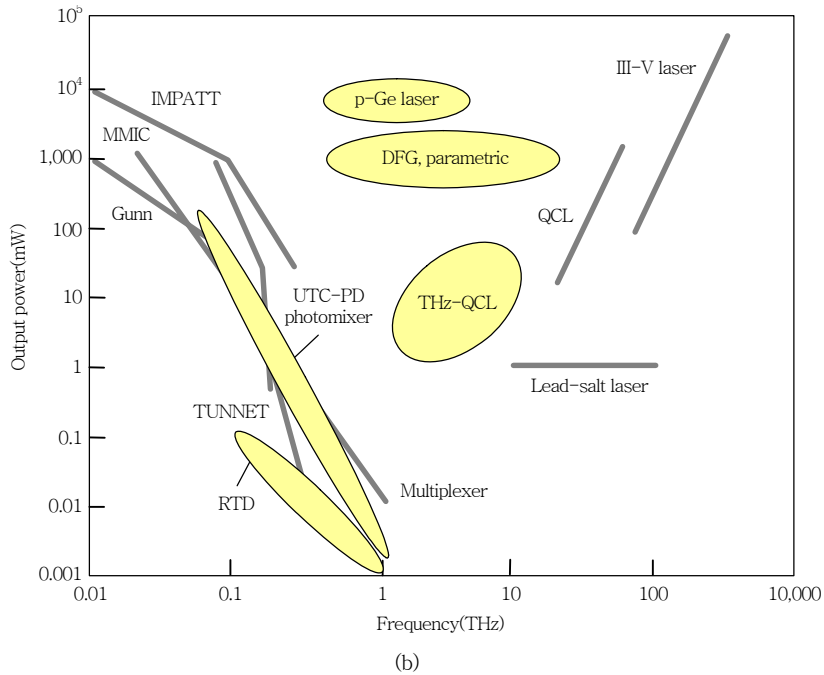
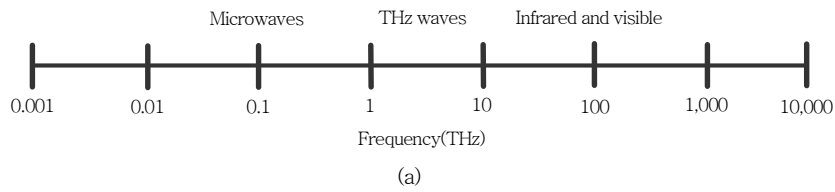
테라헤르츠파는 광파와 전자파의 중간영역에 위치하고 있어 광자공학적 접근과 전자공학적 접근이 가능하다. 광전자공학 기술분야에서는 양자폭포레이저(QCL)와 일방 캐리어 포토다이오드(UTC-PD) 등과 같은 소자의 개발이 현실화되어 테라헤르츠 기술은 더욱 진일보하게 되었다. QCL은 강한 출력의 연속 테라헤르츠 광원으로 개발되고 있으며, UTC-PD는 광대역 무선통신을 위한 수백 GHz 영역의 서브 테라헤르츠파를 발생시키는 포토믹싱용으로 사용된다.

한편 고주파 전자공학 분야에서도 꾸준한 발전에 의해 테라헤르츠 기술의 개발이 진행되고 있다. 이미 성숙된 단계에 도달해 있는 반도체 기술과 초전도체 논리회로 분야에서는 이미 100GHz 이상의 고주파 영역에서 작동하는 소자를 개발하고 있으며, 최근에 개발된 공명 터널링 다이오드(RTD)와 테라헤르츠 단일 광자 검출기 등의 전자소자는 쇼트키 다이오드(SBD) 등과 같은 종래의 전자소자와 함께 테라헤르츠 범위로 그 영역을 확장하고 있다.

이와 같이 테라헤르츠 기술은 현재 각각의 독립된 영역에서 매우 빠른 속도로 성장하고 있으며 그 역사적인 배경과 기본 원리 등은 여러 리뷰 논문을 통하여 알 수 있다[1]-[7]. 여기에서는 테라헤르츠 기술의 중요한 진전과정에 대하여 논의하고자 하며 그 내용은 테라헤르츠 광원, 검출기, 시스템과 응용 분야별 성공사례 등과 함께 미래기술로서의 전망에 대한 것이다.

II. 테라헤르츠 광원

(그림 1)은 테라헤르츠 발생출력을 주파수에 대해 나타낸 것이다. 테라헤르츠 광원의 개발에는 크게 세 가지 접근방법이 있어 왔다. 첫번째는 광학적 테라헤르츠 발생방법으로 지난 몇 십 년간 테라헤르츠 연구의 선봉적인 역할을 해왔다. 두번째는 최근에 개발된 THz QCL이며, 세번째는 전자소자를 이용한 방법으로, 이미 저주파수 영역에서는 기술이 확립되어 있는 분야이다.



(그림 1) (a) 전자기파 스펙트럼에서 테라헤르츠의 영역을 보인 그림으로 명확한 기준은 없지만 일반적으로 100GHz에서 30THz를 테라헤르츠 영역으로 보고 있다. (b) 테라헤르츠 출력을 주파수에 대해 나타낸 그림으로 실선은 종래의 기술에 의한 THz 광원을 나타낸다; 타원형 그림은 최근의 THz 광원을 보인 것이다.

1. 광학적인 방법

펄스 및 연속 레이저를 사용하는 광학적인 방법으로 테라헤르츠파를 발진시키는 경우는 크게 두 가지로 구분한다. 그 하나는 광전도 스위치(photoconductive switch) 또는 반도체를 이용한 것으로 전기장에 의한 캐리어 가속 또는 광-뎀버 효과에 의해 극히 빠른 광전류를 발생시킴으로써 이루어진다. 두번째는 광정류(optical rectification), 차주파수 발생(DFG) 또는 광 파라메트릭 발진(OPG) 등과 같은 비선형 광학현상을 이용하여 테라헤르츠파를 발생시키는 것이다. 현재 주목을 받고 있는 비선형 광학매체로는 GaAs, GaSe, GaP, ZnTe, CdTe 등의

결정체와 유기물질인 DAST, 그리고 잘 알려진 LiNbO₃ 등이 있으며, 아직도 더 효율적인 소재를 찾기 위하여 연구가 진행되고 있다.

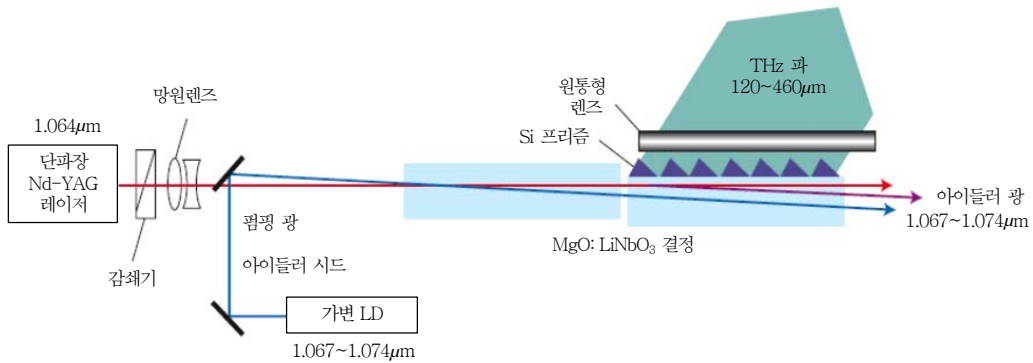
(그림 2)는 테라헤르츠 광원의 하나인 주입식 테라헤르츠 파라메트릭 발생장치(IS-TPG)[8]를 보인 것으로 피크 출력 1W, 선폭 100MHz 이하, 0.7~3.0THz의 주파수 가변이 가능하다. 기술개발의 진행방향 및 목표는 출력을 증강시키고, 시스템의 크기를 감소시키며, 데이터 수집과 주파수 스위칭을 고속으로 처리하는 데 집중되고 있다.

또 하나의 색다른 광학적 테라헤르츠 광원으로 대기-플라즈마 발생법(ambient air plasma)이 있는데 최근에 보안 검색분야에서 주목을 끌고 있다. 이

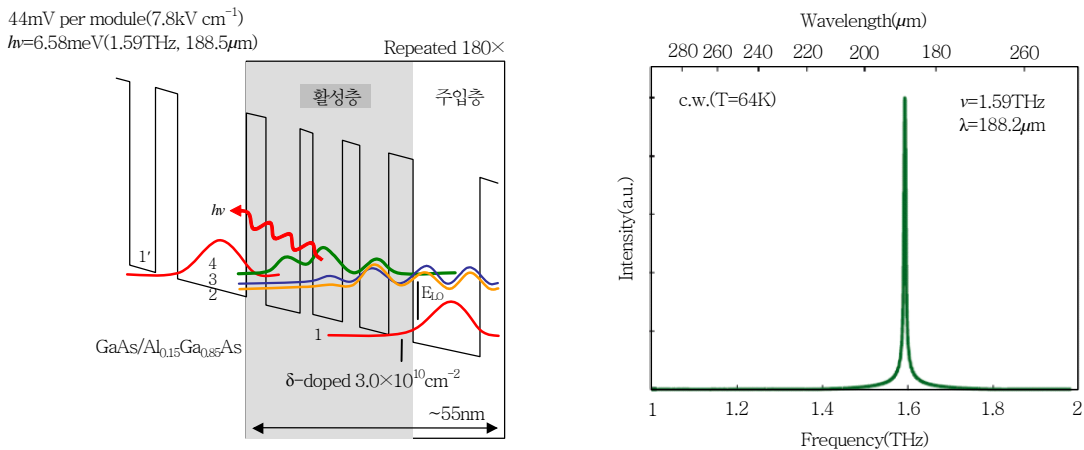
기술은 강한 펄스 레이저로 대기중에서 플라즈마를 생성하여 테라헤르츠파를 발생시키는 것으로 원거리에서 집속된 레이저로서 원격조정이 가능하다[9].

QCL과 같은 반도체 기반의 테라헤르츠 광원은 최근에 진보한 나노기술을 이용하여 개발이 가능해졌다. 최초의 THz QCL은 1994년에 개발되어 70 THz의 레이저 주파수를 기록했으며[10], 이어서 많은 연구를 거쳐 2002년에는 4.4THz가 발표되었다[11]. 테라헤르츠파의 발생은 양자우물 내의 서브

밴드 사이에서의 전자기완(electron relaxation)에 의해 일어난다. 예를 들면, $Al_xGa_{1-x}As$ 층에 의해 격리되어 있는 수 nm 두께의 GaAs 양자우물층이 서로 직렬로 연결되어 테라헤르츠파가 발생하는데 이들이 연속적으로 연결되어 마치 계단식 폭포와 같이 발생이 이루어지므로 양자폭포레이저라고 한다. 현재까지 발표된 QCL의 테라헤르츠파 발생방법은 주로 세 가지로 압축되는데 이는 “BTC”[12], “인터레이스(interlaced)”[13] 및 “공명 포논(resonant



(그림 2) 전형적인 주파수 가변형 고체 테라헤르츠 고체광원인 주입식 테라헤르츠 파라메트릭 발생장치(IS-TPG)의 설계구조이다. 펌핑레이저는 단일종속모드의 Q-스위칭 Nd-YAG(1.064 μ m)이고, 아이들러 광원은 연속 Yb-광섬유 레이저(1,070 μ m) 또는 가변형 다이오드 레이저(1,067~1,070 μ m)이다. LiNbO₃에서 발생한 테라헤르츠 빔은 실리콘 프리즘과 커플링된 후 실리더 렌즈를 통해 공간으로 방출된다.



(a) GaAs-AlGaAs 양자우물 구조에 의한 QCL의 전도대 밴드 프로파일. 테라헤르츠파는 활성층의 밴드 4에서 밴드 3로 전자가 이완되면서 발생하며, 다시 종속 광학포논에 의해 밴드 3에서 밴드 1로 모드 산란된다. (b) 문턱온도 64K 이상에서의 연속선 발광스펙트럼. 연속선 주파수는 1.59THz에 해당하며, 현재로서는 가장 낮은 주파수이다.

(그림 3) QCL 설계에 의거한 반도체 테라헤르츠 광원

phonon)”[14] 등이다. 이들은 레이저 발진을 위하여 요구되는 밀도 반전(population inversion)을 형성하는 과정에서 테라헤르츠 광자가 방출된 뒤 전자가 산란되는 메커니즘에 의해 구분된다. 연속파의 출력은 (그림 1)에서 보인 바와 같이 수십 mW에 달하고 있으며, 주파수는 공명 포논에 의한 QCL을 이용하여 1.59THz(Q. Hu)를 기록한 바 있으며(그림 3) 참조, 자기장을 가한 경우 1.39THz까지 발표되었다[15]. 최근의 기술 개발 목표는 문턱 전류(threshold current)와 레이저 주파수를 낮추고, 동작온도와 주파수 가변범위를 높이며, 고품위의 빔 모드를 얻고자 하는 데 모아지고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 새로운 설계의 구조 및 격자, 그리고 도파로가 집중적으로 연구되어야 한다.

2. 전자공학적인 방법

전자공학 부문에서는 테라헤르츠 영역의 저주파수에 해당하는 부분에 대하여 연구개발을 진행하고 있다. 그중에서 UTC-PD는 포토믹싱 방법으로 고품위의 서브 테라헤르츠파를 발생하는 소자로서 향후 미래가 기대되는 것들 중 하나이다. UTC-PD에서의 테라헤르츠파는 서로 다른 파장의 레이저를 혼합하여 그 주파수 차이만큼의 새로운 레이저를 생성하고 이로 인한 광학현상으로 발진한다. 그 발진주파수는 통상적으로 1.5THz까지 가변이 가능하며, 1.55 μ m 파장의 레이저를 사용해서 최대 20mW 및 10 μ W의 연속파 출력이 각각 100GHz 및 1THz에서 기록된 바 있다[16]. 이 레이저의 응용분야는 주로 서브 테라헤르츠 무선통신과 광의 국소발진이다.

이 외에도 다른 종류의 많은 광원에 대해 연구가 진행되고 있는데[17],[18], 공명 터널 다이오드(RTD), 테라헤르츠 플라즈마파 및 Bloch 발진기 등이 있다. 최근에는 342GHz 발진기의 3차 조화파를 이용한 RTD에서 1.0THz를 성공적으로 입증한 사례가 발표되었다[19]. 종래의 SBD 멀티플렉서는 서브 테라헤르츠 영역에서 천문학 분야의 국소 발진기로 활용되어 오고 있다. SBD에서 취약했던 접촉 부분은 개선된 반도체기술을 적용하여 모두 에어-

브리지 형태의 다이오드로 대체되었다[20].

고출력 테라헤르츠 빔의 발생을 위해서 거대한 시설이 사용되기도 하는데, 자유전자 레이저(free electron laser)[21] 등이 기초과학 분야에 중요하게 활용되고 있다. 이 중에는 p-Ge 레이저가 1~4 THz 범위에서 10W 이상의 출력을 낼 수 있어 분광학 광원으로서 특별히 활용된다[22].

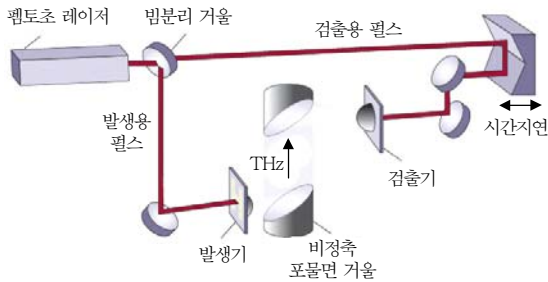
Ⅲ. 테라헤르츠 검출기술

시간영역 테라헤르츠 분광기(THz-TDS)의 검출기는 1990년대에 매우 집중적으로 연구 개발되었으며, 현재에는 저온에서 성장된 GaAs를 광전도 안테나에 가장 많이 사용한다. 그 외에는 전광 샘플링(electro-optic sampling) 기술이 초광대역 시간영역 검출기로서 유용하다. 일반적으로 GaSe과 같은 박막의 비선형 결정체와 10fs 정도의 극초단 레이저를 이용하여 100THz 이상의 발진이 가능하다[23]. 시간영역 분광방법은 차후에 설명하기로 한다.

DTGS 결정, 볼로미터, SBD와 SIS 접합 등이 종래의 테라헤르츠 검출기로서 널리 이용되어 왔으며 현재에도 사용된다[24]-[26]. 또한, 테라헤르츠 단일광자 검출기(single photon detector)가 단일전자 트랜지스터를 이용하여 개발된 바 있다[27].

Ⅳ. 테라헤르츠 분광(Spectroscopy)과 영상(Imaging)

1990년대 이후, 모드잠금 펨토초 레이저(mode-locked femtosecond laser)가 개발되면서 소재연구를 위한 시간영역 분광학이 널리 활용되기 시작하였다[28]. THz-TDS의 기본원리는 (그림 4)에 보인 바와 같이 펨토초 레이저가 광 펄스 대열(pulse train)을 생성하는 것에서 시작한다. 각 펄스는 두 개의 경로로 나누어지고, 하나는 테라헤르츠 발생기(emitter)로 가는데 이것은 광전도안테나 등의 발진 소자로 구성되어 있으며, 반도체 기판이나 비선형



(그림 4) THz-TDS의 전형적인 형태. 펨토초 레이저를 사용한 테라헤르츠파 발생 및 검출 시스템의 개략도. 발생기는 일반적으로 GaAs 광전도 스위칭, 반도체(InAs, ZnTe, GaSe) 및 비선형 결정(DAST, GaP)을 사용하며 검출기는 GaAs 광전도 스위칭 또는 전광결정체(ZnTe, GaSe, GaAs, DAST)를 사용한다.

소재로 이루어진 발진소자에서 극초단 광펄스가 극초단 전자기파인 테라헤르츠파로 변환된다. 이 테라헤르츠파는 공기중으로 전파되어 포물면 거울 등의 광집속 소자를 거쳐 다시 저온 성장된 GaAs 광전도 스위치 또는 전광 결정(electro-optic crystal) 등으로 구성된 초고속 검출기(detector)로 집속된다. 이 검출기에는 초기 광원인 펨토초 레이저에서 분리된 일부의 펄스가 시간지연 스테이지를 거쳐서 도달한다. 검출기에서는 발생한 테라헤르츠파의 전기장 세기를 측정한다. 10fs 레이저를 사용하면 전광 샘플링[23]이나 광전도 스위칭 방식[29]을 이용해서 100THz 이상의 주파수까지 검출할 수 있다.

투과분광학(transmission spectroscopy)의 경우에는 시편을 테라헤르츠 빔의 중간에 놓고 파형의 변화를 측정하게 된다. 일반적으로 시간영역 상에서는 시편 통과 후 진폭은 감소하고 파형은 지연된다. 이러한 시편의 유무에 대한 파형의 차이를 비교하여 측정하고자 하는 재료의 복합 굴절률을 측정할 수 있는데, 이를 이용하여 유전상수, 전도율 및 표면 임피던스에 대한 매개변수를 알 수 있다. TDS의 강점은 Kramers-Kronig 해석에 의한 위상 측정시 수반되는 불확실성을 배제할 수 있다는 것이다. THz-FDS(테라헤르츠 주파수 영역 분광학) 시스템은 기존의 Martin-Puplet 간섭계 등과 같은 종래의 분광학에서 고효율 테라헤르츠 광원을 이용하여 유사하

게 구축할 수 있으며, 일부 분광학 응용분야에서는 간단한 투과형 구성으로 유용하게 사용된다[30].

테라헤르츠 영상[31]-[36]은 실제 많은 분야에서 응용된다. 테라헤르츠파는 가시광선이 투과하지 못하는 많은 소재를 투과하며, 마이크로웨이브보다 훨씬 높은 해상력을 가진다. 또한 테라헤르츠 빔은 거울이나 렌즈를 이용하여 초점을 맺을 수도 있으며, 영상은 빔을 스캔하여 얻을 수도 있다. 영상의 해상도는 테라헤르츠 파장의 빔 직경에 의해 결정된다. 주파수가 증가할수록 해상도는 높아지지만, 나노수준의 해상도를 기대하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있는데, 주사근접장 현미경(SNOM)이 그 중의 한 가지로, 변환된 테라헤르츠 빔을 사용하며 나노 수준의 해상도가 기대되는 분야이다[37],[38].

레이저 테라헤르츠 발광현미경(LTEM)은 소재와 소자의 역동적인 현상을 직접 영상화하는 장치로서 매우 각광을 받고 있는 분야이다[39],[40]. 일부의 전자소재들은 레이저 빔 조사 시에 캐리어를 발생하면서 테라헤르츠파를 방사시키는데 이것을 검출하여 2차원 이미지를 형성하는 것이다. 이때 공간 분해능은 레이저빔의 직경에 의해 결정되므로 서브 마이크로미터 수준까지는 쉽게 얻어지며 근접장을 이용하는 경우 더욱 개선될 수 있다. LTEM의 응용 분야는 초전류 분포(supercurrent distribution), 강유전체 도메인과 마이크로프로세서 등이다. 최근에는 주사탐침형의 LTEM이 개발되었으며[41], 여러 가지 형태의 수동형 LTEM 카메라가 동시에 개발중에 있는데 예를 들면, 광자결정[42], 초전도 터널링 접합[26] 등을 광전도 어레이, 볼로미터, SBD 등에 함께 사용하는 것이다. 각각에는 모두 장단점이 있는데 상용화를 위해서는 아직 개선의 여지가 많은 분야이다.

V. 테라헤르츠 융합기술

테라헤르츠 기술의 주요 융합기술은 크게 두 분야로 나누어지는데 센싱과 통신이 그것이다. THz-

TDS와 FDS는 다양한 소재에 적용할 수 있는 첨단 분석방법으로서 이 도구를 이용하여 생물, 제약, 의과학, 산업용 비파괴분석, 재료과학, 환경 모니터링, 보안감시, 천문학 및 기초과학 등의 연구분야에 센싱기능을 적용할 수 있다. 각 분야에는 DNA 칩, 피부암 진단, LSI 회로검사, 폭발물 탐지 등 많은 응용사례들이 있다[43],[44].

정보와 통신기술에서도 또한 다양한 영역에서 테라헤르츠의 장점을 이용할 수 있는데, 무선통신, 고속 데이터 처리와 위성통신 등이 있다. 이러한 연구분야의 시너지효과는 새로운 응용분야를 창출하며 테라헤르츠 카메라, 대용량 센서 네트워크, 선택적 통신기술 등을 활용한 바이오메트릭스(인간의 물리적 행동양식에 기인한 인식기술의 개발)가 이에 해당한다.

1. 생의학 및 제약분야

1990년대에 처음 개발된 이후 THz-TDS 기술은 생물분자, 의료진단, 암세포, DNA, 단백질과 박테리아 등 다양한 분야의 재료들에 적용되어 왔다 [45]-[48]. 그런데 자주 받는 질문 중의 하나는 이 테라헤르츠 분광에 의해 얻어진 정보가 적외선 분광으로 얻은 것과 무엇이 다른가 하는 것이다. 하나의 명백한 예는, 테라헤르츠 분광으로는 일부 유·무기 물질에서 분자간의 진동[49] 정보를 관찰할 수 있다는 것이다. 반면에 적외선 분광으로는 분자내부의 진동정보 밖에 얻을 수 없다. 분자간의 진동 정보는 거대 생물분자의 동력학 및 인체에 대한 다양하고 많은 정보를 제공할 수 있을 것이다.

단백질, DNA 및 다른 생물분자와 여러 가지 암에 대한 연구는 중대한 관심을 불러 일으키고 있다. 현재로서는 아직 실제 적용에 어려움이 예상되지만 교배에 의한 DNA와 변형에 의한 DNA를 구분하여 라벨-프리 DNA 칩을 개발하는 연구에 진전을 보이고 있으며 이 외에도 많은 생물 분자학에 적용되고 있다.

그동안 테라헤르츠 분광 및 영상을 이용한 암진단 사례가 수 차례 있었다[44]. 테라헤르츠파의 흡

수는 물과 같은 극성 분자에 민감하여 정상 세포에 비해 수화수준(hydration level)이 다른 암세포에서 비정상적인 반사특성을 보이므로 이 차이를 검출하는 것이다. 피부암의 경우는 THz-TDS의 반사에 의해 영상을 만드는데 수평 및 수직 해상도가 각각 $350\mu\text{m}$ 및 $40\mu\text{m}$ 에 달하며 피부 침투깊이는 밀리미터 수준까지 영상화 할 수 있다. 얼음의 경우는 물보다 테라헤르츠파의 투과율이 높으므로 암의 진단에서 시편을 동결시키는 수도 있다.

생의학 분야의 응용에 있어서 가장 큰 장애요인 이자 장점은 물과 같은 극성액체에 대한 투과율이 낮은 점이다. 이로 인해 용액 내의 용질(solute)에 대한 정보를 얻는데 많은 어려움을 준다. 이를 해결하는 방안으로 개발된 것에는 테라헤르츠 시간영역 감쇄 전반사 분광학(THz TD-ATR)이 있다[50]. 도브 프리즘(dove prism)을 테라헤르츠빔의 경로에 두어 프리즘 표면에 에바네스츠파를 형성시킨다. 테라헤르츠파와 시편 간의 상호작용으로 인하여 발생한 이 반사 및 위상의 변화는 TDS 신호를 이용하여 감지되고 분석된다. 이 방법으로 수화물 등에서 용질분자의 동적인 특성을 연구할 수 있게 된다[51]. 수화 물분자(hydrated water molecule)는 생물분자의 표면에서 10^{-7} 초 수준의 이완시간(relaxation time)을 가지며 존재하는데, 내부에서의 이완시간은 수 피코초($\sim 10^{-12}$) 수준에 이른다. 그러므로 테라헤르츠 주파수 범위에서 유전율을 측정하면 수화 수(hydration number)를 측정할 수 있으며, 이는 TD-ATR이 생의학분야의 연구에 매우 필요한 것임을 알 수 있다.

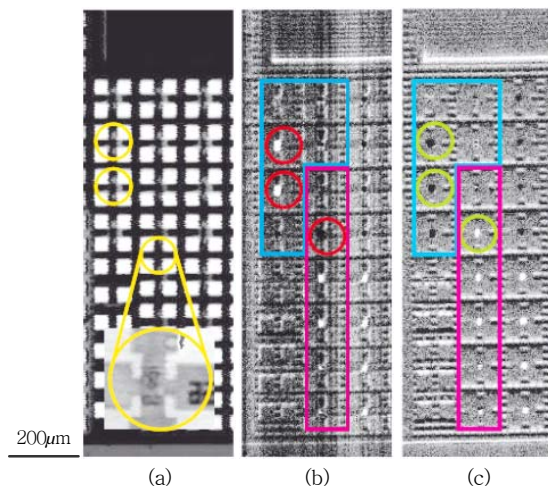
2. 반도체 및 산업응용 분야

소재분석에 대해서는 실리콘 태양전지, 나노복합 재료, 폴리머 및 유전체 박막 등의 매우 많은 사례 [52]-[55]가 있으며, 이는 곧 새로운 산업의 응용을 선도한다. 테라헤르츠 기술은 반도체산업에 응용될 경우 더욱 그 가치를 발하는데, THz-TDS는 이미 반도체 웨이퍼에서 전하이동도, 전도도, 캐리어 밀도 및 플라즈마 진동 등의 여러 가지 특성을 분석

[56],[57]하는 데에 적용되고 있다. 또한 영상기능은 이온주입된 실리콘의 도핑농도 분포를 영상화하는 등의 독특한 분야에서 기능을 발휘한다.

반도체 산업에서 불량분석은 차세대의 집적회로를 개발하는 데 가장 중요한 요소기술 중의 하나이다. LTEM은 불량이 일어난 부분을 감지하는 데 새로운 돌파구를 제공할 수도 있다. (그림 5)는 금속-산화물 반도체 전계 트랜지스터(MOSFET)의 사례를 보인 것이다[58]. 세 개의 그림에서 원으로 표시한 것은 의도적으로 집속 이온빔(FIB)을 이용하여 손상을 입힌 부분이며, 일반적인 MOSFET의 영상(b)과 테라헤르츠 발광에 의한 영상(c)을 비교하면 손상된 MOSFET에서 결함 부분이 확연히 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

테라헤르츠 영상은 또한 비파괴분석에서 현재까지의 최적의 기술로 손꼽히며 우주왕복선 표면 절연체의 분석 등에도 적용되었다. 이 기술로는 단일 패턴의 공극과 같은 결함[59]을 감지해 낼 수 있으며



(그림 5) LTEM으로 검출한 MOSFET의 손상. (a) 여러 개의 MOSFET에 대한 레이저 반사영상. 원으로 표시한 세 개의 MOSFET 소자에 FIB를 이용하여 의도적으로 선을 단락시킨 것. 하나의 소자를 확대하였다. (b),(c) 정상적인 것과 손상된 MOSFET 소자에 대한 LTEM 영상으로, 테라헤르츠파의 최대치에서 지연시간을 고정하고 진폭의 음과 양으로써 영상의 흑백을 나타내었으며 p-형 및 n-형에 대해 각각 보인 것이다.

로 단순 검사도구로서도 활용이 가능하다. 테라헤르츠파가 수분에 매우 민감한 특성을 이용하면 과일, 신선도나 야채류의 수분 함유량 등 음식이나 농산물 등을 검사할 때에도 유용하게 사용할 수 있다.

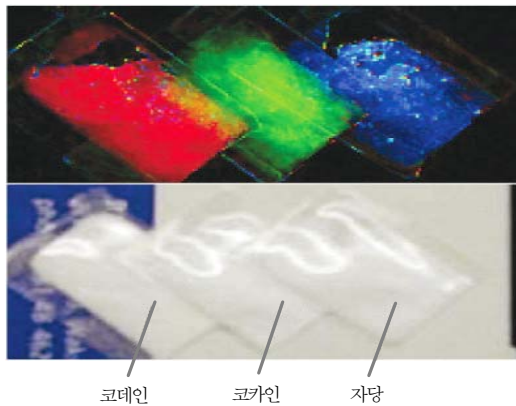
3. 감시 및 보안

모든 폭발물이나 마약은 테라헤르츠 영역에서 독특한 신호특성을 보이므로 감시 및 보안 분야에 가치있게 사용할 수 있다. 이러한 신호특성은 투과 스펙트럼을 통하여 수많은 화학물질로부터 식별을 가능하게 한다. 특히, 불법 마약이나 폭발물 등을 무해한 물질로부터 구분해 낼 수 있다. 3.0THz의 주파수를 가진 테라헤르츠파는 종이봉투를 쉽게 투과하므로 테라헤르츠 다중 스펙트럼 영상 및 성분 패턴 인식 영상 등을 이용하면 봉투를 열지 않고도 쉽게 내용물을 확인할 수 있다(그림 6a) 참조[60].

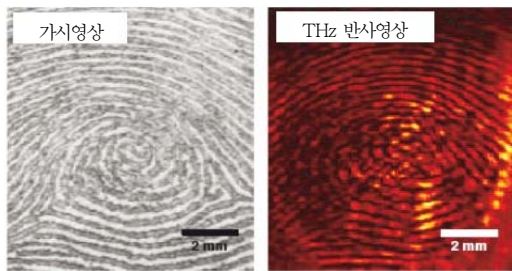
THz QCL은 또한 실시간 영상을 가능하게 할 수 있다. (그림 6b)는 폴리에틸렌 조각에서 추출한 지문(finger print)에 대한 영상분석 사례이다. 지문의 골과 골 사이 간격은 약 $500\mu\text{m}$ 이며 이 정도의 해상도로는 봉투 내부의 편지글씨도 읽을 수 있다. 자세한 실시간 모니터링에 대한 사례에 대해서는 참고문헌 [35]를 참조하면 된다.

테라헤르츠 카메라의 초점배열(FPA) 기술개발 또한 커다란 기술적 의미를 가진다. 테라헤르츠 카메라는 안개와 연기 속에서도 배경 조명 없이 상을 얻을 수 있다. 즉, 수동형의 서브 테라헤르츠 카메라는 실리콘 광자결정으로 구성된 SBD 어레이와 헤테로다인 검출기를 이용하여 500GHz 주파수에서 작동하며 공항의 검색장치에 적용될 예정이다. 능동형의 테라헤르츠 카메라는 바이오메트릭스를 포함한 더욱 많은 분야에 적용이 가능할 것이다.

일부 보안감시 응용분야에서는 상당한 거리에서의 원격 감지 기능을 요구한다. 그러나 테라헤르츠파는 환경에 민감하기 때문에 원거리에서의 능동형 센싱 방식은 적합하지 않다. 최근에는 에어 플라스마를 이용한 원격조정 테라헤르츠 발생장치가 관심을 모으고 있다. 강력한 펄스 레이저 빔이 물체에



(a) 검사중인 시편의 THz 영상(위)과 일반 사진(아래)으로, 세 가지의 분말 약품(코데인, 코카인, 자당(sucrose))이 봉투 안에 감추어져 있으며 THz 영상을 통하여 구분하였다.



(b) 가시광선 영역 및 THz 반사모드를 이용한 엄지손가락 지문의 영상. 실시간 THz 영상은 4.3THz QCL과 320×240 볼로미터 초점 어레이로서 초당 20프레임으로 얻어낸 것이다.

(그림 6) 테라헤르츠를 이용한 마취약 감지결과

조사되어 에어 플라즈마를 일으켜서 테라헤르츠파를 발생시키고, 시편으로부터의 반사파를 THz-TDS와 유사한 방법으로 검출한다[61].

테라헤르츠 센싱을 이용한 유해한 기체의 검출기능을 요구하는 곳이 증가하고 있다. 예를 들면 지진, 해일 등 천재지변에 의한 재해 또는 콘크리트 벽 등 막힌 곳에서 발생한 화재와 같이 적외선 기체센서가 작동할 수 없는 경우에 일산화탄소 등을 감지할 수 있는 새로운 센싱 방식이 필요하며, 이 경우 테라헤르츠 기술이 유용할 것이다.

4. 정보와 통신기술

ICT 분야에는 테라헤르츠 기술의 응용분야가 매우 큰 시장을 형성할 수 있다. 현대사회에서 정보의

흐름은 급격히 증대하고 있고, 신호 전달 주파수 또한 계속적으로 증가하는 추세에 있다. 광섬유와 연계한 유선 광통신은 성공적으로 성장하여 초당 테라바이트 수준의 데이터 전송속도를 실현하고 있으나, 이에 비하여 무선통신 데이터 전송속도는 상대적으로 많이 뒤떨어져 있다. THz-ICT의 구현은 테라헤르츠파와 무선통신 기술을 다음과 같은 분야에 접목하여 커다란 효과를 거둘 수 있을 것이다. 비도심 지역에서의 통신, 재난 시에 빌딩과 빌딩 간의 통신, 원격의료 및 야외 행사에서의 고품위 영상 데이터통신, 고화질 영화전송, 포물러 1 경기에서 고속으로 주행하는 자동차와 지원자 간의 통신 등이 그것이다.

UTC-PD에 의한 서브 테라헤르츠파의 발전에서 기술적인 돌파구가 마련됨으로써 그러한 가능성을 현실화하고 있다. 이미 120GHz 영역의 밀리미터파 무선링크가 개발되어 필드테스트 과정에 있으며, 이들은 10Gbps 대역[62]으로써 대부분의 영화를 수 초 내에 다운로드 받을 수 있는 속도이다. 가까운 미래에는 캐리어 주파수가 두 배로 증가하여 40Gbps가 달성될 것으로 전망된다. 주파수가 증가하면 건물 내부의 무선통신용으로도 유용하게 사용될 수 있다.

THz-ICT를 위한 여러 가지의 기본적인 회로기술 또한 빠른 속도로 개발되고 있다. 집적된 단일 플럭스 양자회로가 8비트 시프트 레지스터로 현실화되어 120GHz에서 작동하고 있으며[63], InGaAs-AlAs-AlSb 양자우물에 의한 전광 스위치(all optical switch)가 1.0THz에서 작동함이 증명되었다[64]. 그리고, 고전자이동도 트랜지스터(HEMT)와 헤테로접합 바이폴라 트랜지스터(HBT)를 이용한 전통적 방식의 접근도 계속 이루어지고 있다[65].

테라헤르츠 거울, 모듈레이터와 도파로 등 요소 기술을 개발하는 것도 중요하지만 이러한 연구활동은 사실상 한계를 가지고 있다. 최근에 전방향성(omnidirectional) 거울이 폴리프로필렌과 고저항 실리콘을 이용하여[66] 제작되었고, 테라헤르츠파의 모듈레이션이 소개되었다[67]. 이러한 부품소재들은 실제 THz-ICT에 응용하기 위해서 더욱 많은 연구가 필요하다.

테라헤르츠파의 전달은 ICT와 센싱을 위하여 모두 중요한 요소이다. 그동안에는 플라스틱 섬유와 폴리카보네이트 도파로를 이용한 많은 연구가 있어 왔다. 흥미로운 것은 순수한 금속이 그 표면을 따라 분산없이 적은 감쇄율로 테라헤르츠파를 전달한다는 사실이다[68]. 이것은 원통형 전도체의 표면을 따라 전달되는 전자기파의 특성으로 Sommerfeld 이론으로 설명된다. 이에 따라 빔 분리기 등을 제작할 수 있는 가능성이 있다. 최근에는 방사대칭형으로 특수하게 제작된 광전도 안테나가 개발되어 테라헤르츠파와 원통형 유선 도파로 간의 커플링 효율을 향상시킨 결과가 발표되었다[69].

5. 지구 및 우주과학

테라헤르츠 기술은 이제 지구환경의 모니터링에도 매우 중요한 역할을 한다. 지구관측 시스템 마이 크로웨이브 측정장치(EOS-MLS)가 NASA의 Aura 위성 탑재되어 2004년 7월에 발사되었다. 이것은 대기중의 화학물질(O, HO₂, H₂O, O₃, HCl, ClO, HOI, BrO, HNO₃, N₂O, CO, HCN, CH₃CN, 화산 SO₂), 구름과 얼음층에 대해 온도 및 여러 가지 상태를 측정한다[70]. 헤테로다인 방사량계로는 118, 190, 240 및 640Hz와 2.5THz 주파수의 열방사량을 측정한다. 주요 목적은 지구온난화를 연구하기 위한 오존층의 화학적인 특성, 대기의 구성성분이 기상상태에 미치는 영향 및 대류권 상층부의 오염 등에 대한 정보를 얻기 위함이다.

국제적 천문학 시설인 아타카마 대구경 어레이안테나(ALMA)가 현재 5,000미터 고도의 칠레 북부 아타카마 사막에 건설중에 있다. ALMA는 12미터 높이의 고정밀 안테나 64개와 16개의 초정밀 안테나로 이루어져 있으며 최대 14km의 직경을 가지는 거대한 구조로 되어 있다. 이를 이용하여 대기를 뚫고 지구에 유입되는 30~950GHz 영역의 전자기파를 검출한다. 이 결과는 흑색 우주공간의 130억 광년 떨어진 곳에서 새로 탄생한 은하, 새로운 태양계의 탄생 또는 외계 유기 분자 등을 포함한 비가시 영역의 정보를 제공한다.

적외선 천문위성인 AKARI는 2006년 2월에 발사되었다. 6K로 초냉각된 직경 68.5cm의 망원경을 탑재하고 1.7~180 μ m 영역의 파장 범위를 모니터링 한다[71],[72]. 이 위성의 임무는 은하계의 형성과 진화에 대한 정보를 획득하고 별들과 행성 시스템의 형성과정을 조사하는 데 있다. AKARI는 두 개의 장치가 장착되어 있는데, 원적외선 관측을 위한 FIS와 근적외선 및 중적외선 관찰을 위한 IRC가 그것이다. IRC와 FIS는 1.7~14.1 μ m 및 50~180 μ m 범위의 파장을 각각 커버한다.

6. 기초과학 분야

테라헤르츠파는 수 meV에서 수백 meV 사이의 에너지를 가지므로 분광의 경우, 초전도체와 같이 다양한 소재의 저에너지 캐리어 동역학(low energy carrier dynamics) 등을 다룰 때에는 광학적인 해석을 따른다[73]. 뿐만 아니라 여러 가지의 전자소재들은 극초단 레이저의 조사에 의해 광-여기 캐리어로부터 테라헤르츠파를 발광하므로 그 자체로 분광에 적용될 수 있다. 고온 초전도체, 망간화합물, 강자성체와 다중강성체(강자성, 강유전, 강탄성 등이 복합된 소재; multiferroic) 등이 주로 테라헤르츠 발광용 소재로 시험되어 왔다[74]-[77]. 이러한 연구동향은 재료과학에 있어서 THz-TDS가 매우 중요한 위치에 있다는 것을 지적하고 있다.

THz-TDS의 가장 큰 진보는 광-여기된 캐리어들의 거동이 10fs의 시간 해상도를 가지고 동력학적으로 해석될 수 있다는 점으로써, 이 시간은 일반적인 반도체에서 전자-전자 산란시간[78] 보다 훨씬 빠른 것이다. 반도체 내에서 광-여기 직후의 유전함수(dielectric function)에 대해서도 THz-TDS를 이용하여 평가할 수 있다. 예를 들면, 유전 스펙트럼(dielectric spectra)의 변화로부터 고체 내에서 전자-정공 쌍이 어떻게 축적되는지를 100fs 이하의 시간 내에서 분석할 수 있다. 이러한 종류의 측정은 화학 및 생명과학 분야의 동력학적 진단이나 순간적인 양자물리학 현상 등의 새로운 극고속 과학(ult-

rafast science)의 한 분야를 열 수 있는 계기가 될 것이다.

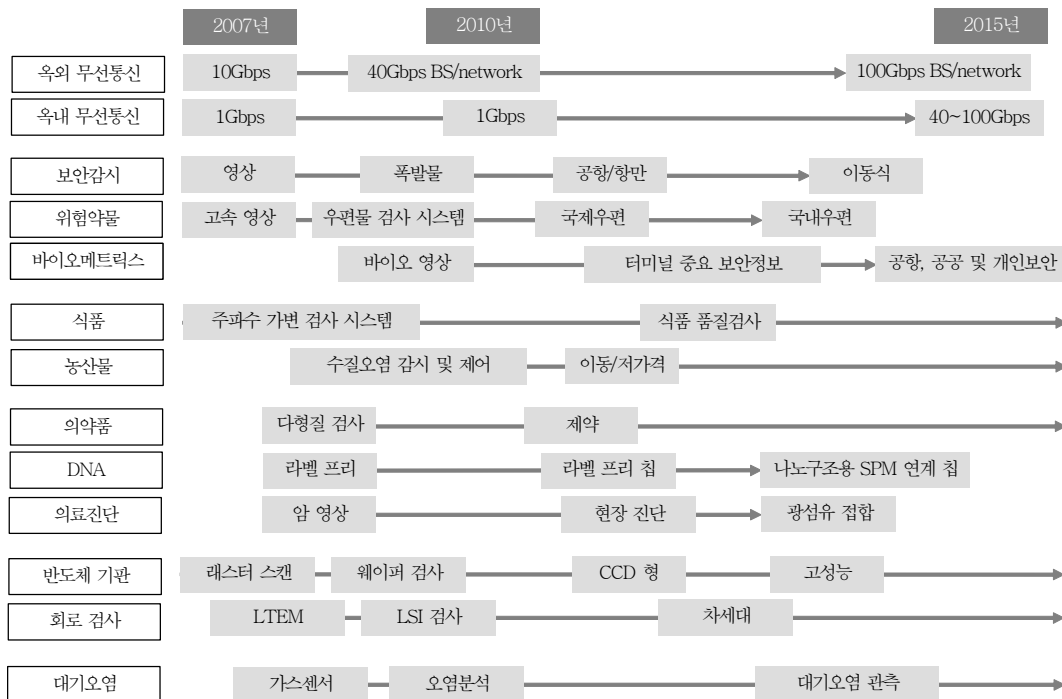
테라헤르츠 펄스를 이용해서는 빛의 자연적인 특성을 연구하는 기회를 얻을 수 있다. 모델을 이용한 규모의 연구를 통하여 보다 긴 파장 영역에서의 거동을 연구하는 발판을 제공한다. 그 예로써는 임의의 소재(random media)에서 나타나는 다중회절이나 전달에 대한 연구[79],[80]와 전달되는 빛의 군속도 해석 등이 있다. 테라헤르츠 주파수 영역의 전자기 준소재(electromagnetic metamaterial)에 대한 연구개발도 많은 관심을 끌고 있다[81]-[83].

테라헤르츠 소자의 다른 응용분야는 고체 과학이다. 주사 테라헤르츠 단일광자 계수기(scanning THz single-photon counter)는 양자 홀(quantum hall) 시스템에서 국부적인 동력학을 연구하기 위해 테라헤르츠 발광 영상을 이용하고[84], THz-QCL은 반도체 사이클로트론 공명에서의 분광 연구를 위해 사용된다[85]. 이러한 응용은 연구의 초기단계에 있

으며, 전반적인 테라헤르츠 기술은 가까운 미래에 새로운 과학분야로서 막대한 재원을 기대한다.

VI. 전망과 전략

(그림 7)은 테라헤르츠 기술과의 융합을 통한 주요 응용분야에서의 로드맵을 보인 것이다[86]. 옥외 무선통신은 머지않아 40Gbps의 전송속도를 어렵지 않게 실현할 것이고, 머지않아 100Gbps급에 이를 것이다. 실내의 경우에는 기술적으로 옥외의 경우보다 쉬우며, 새로운 응용분야의 창출 및 시장 규모에 의해 수요가 결정된다. 유해물질이나 마약 등의 검출에는 고속, 저가격 시스템을 개발하기에 아직 시간이 요구된다. 바이오메트릭스를 위한 고품위의 테라헤르츠 카메라는 이미 개발중에 있다. 식품 및 농산물에의 응용은 저가격화가 필수적이며, 파라메트릭 테라헤르츠 시스템으로서 실현될 것으로 보인다. 생의학 분야에서는 어떠한 소재가 테라



(그림 7) 테라헤르츠 응용기술 로드맵. BS/네트워크는 방송 스테이션, 고정 무선접속 네트워크, 스토리지 스테이션을 뜻하며, SPM은 주사탐침현미경, NANO/minim은 DNA의 나노크기 및 극미량을 뜻한다.

헤르츠파로서 분석되어지는가를 결정하는 것이 중요하며, 이 연구는 분자간 반응 등의 이론적인 연구에 의해 초점이 맞추어질 것이다. 테라헤르츠 센싱을 위한 특별한 도구로서 DNA 칩 등이 필요할 수도 있다. 산업용 반도체에 응용하기 위해서는 고속, 저가격 시스템이 반드시 필요하며, 또한 LTEM의 해상력이 LSI 검사를 위한 수준까지 개선되어야 한다. THz-QCL은 기체 감지에도 적용될 수 있는데, 대기 오염의 관측기술을 선도할 수 있다.

테라헤르츠의 응용을 위한 연구와 노력은 계속 상호 맞물려서 진행될 것이다. 예를 들어, 테라헤르츠 센서 네트워크, 기상방지 교통과 도로 모니터링 시스템, 정보보호용 위성통신(테라헤르츠파는 대기를 통과할 수 없으므로), 그리고 의학, 식품, 농업 및 산업응용이 중요한 목표이다.

이러한 응용기술을 실현하기 위하여 고효율 테라헤르츠 광원, 보다 민감한 테라헤르츠 검출기와 보다 기능적인 소자와 소재가 필요하다. 더 확실한 목표는 여러 가지 다양한 소재에 대해 테라헤르츠 주파수 대역에서의 데이터베이스를 구축하는 일이다. 다른 해결해야 할 과제는 테라헤르츠 측정시스템, 테라헤르츠 표준 및 전자기 호환성 등이다. 이러한 개척적인 업무를 수행하기 위하여 해야 할 많은 일들이 있지만 모두 가능한 것들이며 테라헤르츠의 연구를 위한 과학기술적인 돌파구들을 예측할 수 있다. 테라헤르츠의 연구는 여러 분야의 과학기술 토대 위에 구축되며, 그러한 상호 협력의 바탕 위에 새로운 과학으로 탄생하게 될 것이다.

약어 정리

BTC	Bound to Continuum
DAST	diethylaminosulfurtetrafluoride
DFG	Differential Frequency Generation
DTGS	Deuterated Triglycine Sulphate
EOS-MLS	The Earth Observing System Microwave Limb Sounder
FIB	Focused Ion Beam
FIS	Far Infrared Surveyor

FPA	Focal Plane Array
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
ICT	Information and Communication Technology
IRC	InfraRed Camera
IS-TPG	Injection Seeded THz wave Parametric Generator
LMA	Atacama Large Millimeter Array
LTEM	Laser THz Emission Microscopy
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effects Transistor
OPG	Optical Parametric Oscillation
QCL	Quantum Cascade Laser
RTD	Resonant Tunnelling Diode
SBD	Shotky Barrier Diode
SIS	Superconductor-Insulator-Superconductor
SNOM	Scanning Near-field Optical Microscopy
TD-ATR	Time Domain Attenuated Total Reflection Spectroscopy
UTC-PD	Uni-Travelling Carrier Photo Diode

참고 문헌

- [1] B. Ferguson and X.C. Zhang, "Materials for Terahertz Science and Technology," *Nature Mater.*, Vol.1, 2002, pp.26-33.
- [2] P.H. Siegel, "Terahertz Technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.50, 2002, pp.910-928.
- [3] C.A. Schmuttenmaer, "Exploring Dynamics in the Far-infrared with Terahertz Spectroscopy," *Chem. Rev.*, Vol.104, 2004, pp.1759-1779.
- [4] P.H. Siegel, "Terahertz Technology in Biology and Medicine," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.52, 2004, pp.2438-2446.
- [5] D. Mittleman, "Sensing with Terahertz Radiation," Springer, Berlin, 2003.
- [6] K. Sakai, "Terahertz Optoelectronics," Springer, Berlin, 2005.
- [7] M. Tonouchi, "Terahertz Technology" Ohmsha, Tokyo, 2006.
- [8] K. Kawase, J. Shikata, and I. Ito, "Terahertz Wave Parametric Source," *J. Phys. D.*, Vol.34, 2001, pp. R1-R14.
- [9] D.J. Cook and R.M. Hochstrasser, "Intense Rerahertz Pulses by Four-wave Rectification in Air," *Opt. Lett.*, Vol.25, 2000, pp.1210-1212.

- [10] J. Faist et al., "Quantum Cascade Laser," *Science*, Vol.264, 1994, pp.553-556.
- [11] R. Kohler et al., "Terahertz Semiconductor-heterostructure Laser," *Nature*, Vol.417, 2002, pp.156-159.
- [12] M.S. Vitiello et al., "Electron-lattice Coupling in Bound-to-continuum THz Quantum-cascade Lasers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, 2006, p.241109.
- [13] A. Straub et al., "Threshold Reduction in Quantum Cascade Lasers with Partially Undoped, Ualwave-length Interdigitated Cascades," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.80, 2002, pp.2845-2847.
- [14] Q. Hu et al., "Resonant-phonon-assisted THz Quantum-cascade Lasers with Metal-metal Waveguides," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.20, 2005, pp.S228-S236.
- [15] G. Scalari, C. Walther, J. Faist, H. Beere, and D. Ritchie, "Electrically Switchable, Two-color Quantum Cascade Laser Emitting at 1.39 and 2.3THz," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, 2006, p.141102.
- [16] H. Ito, F. Nakajima, T. Furuta, and T. Ishibashi, "Continuous THz-wave Generation Using Antenna-integrated Uni-travelling-carrier Photodiodes," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.20, 2005, pp.S191-S198.
- [17] T. Otsuji, M. Hanabe, and T. Nishimura, "A Granting-bicoupled Plasma-wave Photomixer with Resonant-cavity Enhanced Structure," *Opt. Express*, Vol.14, 2006, pp.4815-4825.
- [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] N. Orihashi, S. Suzuki, and M. Asada, "One THz Harmonic Oscillation of Resonant Tunneling Diodes," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.87, 2005, p.233501.
- [20] T.W. Crowe, W.L. Bishop, D.W. Perterfeld, J.L. Hesler, and R.M. Weikle, "Opening the Terahertz Window with Integrated Diode Circuits," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol.40, 2005, pp.2104-2110.
- [21] G.P. Williams, "Far-IR/THz Radiation from the Jefferson Laboratory, Energy Recovered Linac, Free Electron Laser," *Rev. Sci. Instr.*, Vol.73, 2002, pp.1461-1463.
- [22] A. Bergne et al., "New p-Ge THz Laser Spectrometer for the Study of Solutions: THz Absorption Spectroscopy of Water," *Rev. Sci. Instr.*, Vol.76, 2005, p.063110.
- [23] C. Kübler, R. Huber, and A. Leitenstorfer, "Ultrabroadband Terahertz Pulses: Generation and Field-resolved Detection. *Semicond.*" *Sci. Technol.*, Vol.20, 2005, pp.S128-S133.
- [24] A.J. Miller, A. Luukanen, and E.N. Grossman, "Micromachined Antenna-coupled Uncooled Microbolometers for Terahertz Imaging Arrays," *Proc. SPIE*, Vol.5411, 2004, pp.8-24.
- [25] T. Yasui, A. Nishimura, T. Suzuki, K. Nakayama, and S. Okajima, "Detection System Operating at Up to 7THz Using Quasioptics and Schottky Barrier Diodes," *Rev. Sci. Instr.*, Vol.77, 2006, p.066102.
- [26] S. Ariyoshi, "Terahertz Imaging with a Direct Detector Based on Superconducting Tunnel Junctions," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, 2006, p.203503.
- [27] S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa, and H. Hirai, "A Single-photon Detector in the Far-infrared Range," *Nature*, Vol.403, 2000, pp.405-407.
- [28] P.Y. Han and X.C. Zhang, "Free-space Coherent Broadband Terahertz Time-domain Spectroscopy," *Meas. Sci. Technol.*, Vol.12, 2001, pp.1747-1756.
- [29] M. Ashida et al., "Sensitivity of Photoconductive Antenna for Ultrabroadband Terahertz Radiation: Feasibility of Detection over 100THz," JFH1-2, *Tech. Dig. IQEC/CLEO-PR*, 2005.
- [30] K. Suto and J. Nishizawa, "Widely Frequency-tunable Terahertz Wave Generation and Spectroscopic Application," *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, Vol.26, 2005, pp.937-952.
- [31] Q. Wu, T.D. Hewitt, and X.C. Zhang, "Two-dimensional Electrooptic Imaging of THz Beams," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, 1996, pp.1026-1028.
- [32] D.M. Mittleman, R.H. Jacobsen, and M.C. Nuss, "T-ray Imaging," *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, Vol.2, 1996, pp.679-692.
- [33] D.M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M.C. Nuss, "T-ray Tomography," *Opt. Lett.*, Vol.22, 1997, pp.904-906.
- [34] T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time Two-dimensional Terahertz Tomography of Moving Objects," *Opt. Comm.*, in the press.
- [35] A.W.M. Lee, B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J.L. Reno, "Real-time Imaging Using a 4.3THz Quantum Cascade Laser and a 320×240 Microbolometer Focal-Plane Array," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, 2006, pp.1415-1417.
- [36] S.M. Kim et al., "Biomedical Terahertz Imaging with a Quantum Cascade Laser," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, 2006, p.153903.

- [37] K. Wang, D.M. Mittleman, van der N.C.J. Valk, and P.C. Planken, "Antenna Effects in Terahertz Apertureless Near-field Optical Microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.85, 2004, pp.2715-2717.
- [38] H.T. Chen, R. Kersting, and G. Cho, "Terahertz Imaging with Nanometer Resolution" *Appl. Phys. Lett.*, Vol.83, 2003, pp.3009-3011.
- [39] M. Tonouchi, M. Yamashita, and M. Hangyo, "Terahertz Radiation Imaging of Supercurrent Distribution in Vortex-penetrated YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Film Strips," *J. Appl. Phys.*, Vol.87, 2000, pp.7366-7375.
- [40] 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, pp.2058-2060.
- [41] R. Inoue, N. Uchida, and M. Tonouchi, "Scanning Probe Laser Terahertz Emission Microscopy System," *Jpn J. Appl. Phys.*, Vol.45, 2006, pp.L824-L826.
- [42] D. Clery, "Terahertz on a Chip," *Science*, Vol.297, 2002, p.763.
- [43] M. Nagel, P. Haring Bolivar, M. Brucherseifer, and H. Kurz, "Integrated THz Technology for Label-free Genetic Diagnostics," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.80, 2002, pp.154-156.
- [44] R.M. Woodward et al., "Terahertz Pulse Imaging in Reflection Geometry of Human Skin Cancer and Skin Tissue," *Phys. Med. Biol.*, Vol.47, 2002, pp.3853-3863.
- [45] B.M. Fischer et al., "Terahertz Time-domain Spectroscopy and Imaging of Artificial RNA," *Opt. Express*, Vol.13, 2005, pp.5205-5215.
- [46] M. Walther, B.M. Fischer, and P.U. Jepsen, "Noncovalent Intermolecular Forces in Polycrystalline and Amorphous Saccharides in the Far Infrared," *Chem. Phys.*, Vol.288, 2003, pp.261-268.
- [47] S.E. Whitmire et al., "Protein Flexibility and Conformational State: A Comparison of Collective Vibrational Modes of Wild-type and D96N Bacteriorhodopsin," *Biophys. J.*, Vol.85, 2003, pp.1269-1277.
- [48] J.Y. Chen, J.R. Knab, J. Cerne, and A.G. Markelz, "Large Oxidation Dependence Observed in Terahertz Dielectric Response for Cytochrome c," *Phys. Rev.*, Vol.E72, 2005, p.040901.
- [49] N. Nagai, R. Kumazawa, and R. Fukasawa, "Direct Evidence of Inter-molecular Vibrations by THz Spectroscopy," *Chem. Phys. Lett.*, Vol.413, 2005, pp.495-500.
- [50] 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, pp.L1287-L1289.
- [51] M. Nagai, H. Yada, T. Arikawa, and K. Tanaka, "Terahertz Time-domain Attenuated Total Reflection Spectroscopy in Water and Biological Solution," *Int. J. Infrared Milli. Waves*, Vol.27, 2006, pp.505-515.
- [52] N. Nagai, M. Sumitomo, M. Imaizumi, and R. Fukasawa, "Characterization of Electron or Proton Irradiated Si Space Solar Cells by THz Spectroscopy," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.21, 2006, pp.201-209.
- [53] N. Nagai, T. Imai, R. Fukasawa, K. Kato, and K. Yamachi, "Analysis of the Intermolecular Interaction of Nanocomposites by THz Spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.85, 2004, pp.4010-4012.
- [54] N. Nagai and R. Fukasawa, "Abnormal Dispersion of Polymer Films in the THz Frequency," *Chem. Phys. Lett.*, Vol.388, 2004, pp.479-482.
- [55] M. Misra, K. Kotani, I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi, "Observation of TO1 Soft Mode in SrTiO₃ Films by Terahertz Time Domain Spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.87, 2004, p.182909.
- [56] S. Nashima, O. Morikawa, K. Takata, and M. Hangyo, "Temperature Dependence of Optical and Electronic Properties of Moderately Doped Silicon at Terahertz Frequencies," *J. Appl. Phys.*, Vol.90, 2001, pp.837-842.
- [57] D.M. Mittleman, J. Cunningham, M.C. Nuss, and M. Geva, "Noncontact Semiconductor Wafer Characterization with the Hall Effect," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, 1997, pp.16-18.
- [58] M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, K. Nikawa, and M. Tonouchi, in *Conf. Optical Terahertz Science and Technology*, doc ID: TuC4, Florida, USA, 2005.
- [59] H. Zhong et al., "Nondestructive Defect Identification with Terahertz Time-of-flight Tomography," *IEEE Sensors J.*, Vol.5, 2005, pp.203-208.
- [60] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Non-destructive Terahertz Imaging of Illicit Drugs Using Spectral Fingerprints," *Opt. Express*, Vol.11, 2003, pp.2549-2554.
- [61] H. Zhong, N. Karpowicz, and X.C. Zhang, "Terahertz Emission Profile from Laser-induced Air Plasma,"

- Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, 2006, p.261103.
- [62] A. Hirata et al., "120-GHz-band Millimeter-wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission," *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, Vol.54, 2006, pp.1937-1944.
- [63] H. Akaike et al., "Demonstration of a 129GHz Single-flux-quantum Shift Register Circuit Based on a 10kA cm-Nb Process," *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.19, 2006, pp.S320-S324.
- [64] T. Akiyama et al., "1.55- μ m Picosecond All-optical Switching by Using Intersubband Absorption in In-GaAs-IAsSb Coupled Quantum Wells," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol.14, 2002, pp.495-497.
- [65] T. Kosugi, M. Tokumitsu, T. Enoki, M. Muraguchi, A. Hirata, and T. Nagatsuma, in *Tech. Dig. IEEE Comp. Semicond. Integ. Circuit Symp.*, 2004, pp.171-174.
- [66] N. Krumbholz et al., "Omnidirectional Terahertz Mirrors: A Key Element for Future Terahertz Communication Systems," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, 2006, p.202905.
- [67] T. Kleine-Ostmann, P. Dawson, K. Pierz, G. Hein, and M. Koch, "Room-temperature Operation of an Electrically Driven Terahertz Modulator," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.84, 2004, pp.3555-3557.
- [68] K. Wang and D.M. Mittleman, "Metal Wires for Terahertz Wave Guiding," *Nature*, Vol.432, 2004, pp.376-379.
- [69] J.A. Deibel, K. Wang, M.D. Escarra, and D.M. Mittleman, "Enhanced Coupling of Terahertz Radiation to Cylindrical Wire Waveguides," *Opt. Express*, Vol.14, 2006, pp.279-290.
- [70] J.W. Waters et al., "The Earth Observing System Microwave Limb Sounder(EOS MLS) on the Aura Satellite," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.44, 2006, pp.1075-1092.
- [71] Y. Doi et al., "Large-format and Compact Stressed Ge:Ga Array for the ASTRO-F(IRIS) Mission," *Adv. Space Res.*, Vol.30, 2002, pp.2099-2104.
- [72] M. Fujiwara et al., "Development of Ge:Ga Far-infrared Photoconductor Direct Hybrid 2D Array," *Appl. Opt.*, Vol.42, 2003, pp.2166-2173.
- [73] J. Orenstein, J. Corson, S. Oh, and J.N. Eckstein, "Superconducting Fluctuations in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ as Seen by Terahertz Spectroscopy," *Ann. Phys.*, Vol.15, 2006, pp.596-605.
- [74] N. Kida, H. Murakami, and M. Tonouchi, "Terahertz Optics in Strongly Correlated Electron Systems in Terahertz Optoelectronics," ed. K. Sakai, Springer, Berlin, 2003, pp.271-330.
- [75] K. Takahashi, N. Kida, and M. Tonouchi, "Terahertz Radiation by an Ultrafast Spontaneous Polarization Modulation of Multiferroic BiFeO_3 Thin Films," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.96, 2006, p.117402.
- [76] E. Beaurepaire et al., "Coherent Terahertz Emission from Ferromagnetic Films Excited by Femtosecond Laser Pulses," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.84, 2004, pp.3465-3467.
- [77] J. Tilborg et al., "Temporal Characterization of Femtosecond Laser-plasma-accelerated Electron Bunches Using Terahertz Radiation," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.96, 2006, p.014801.
- [78] R. Huber et al., "Femtosecond Formation of Coupled Phonon-plasmon Modes in InP: Ultrabroadband THz Experiment and Quantum Kinetic Theory," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.94, 2005, p.027401.
- [79] Z. Jian, J. Pearce, and D.M. Mittleman, "Characterizing Individual Scattering Events by Measuring the Amplitude and Phase of the Electric Field Diffusing through a Random Medium," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.91, 2003, p.033903.
- [80] Z. Jian and D.M. Mittleman, "Broadband Group-velocity Anomaly in Transmission through a Terahertz Photonic Crystal Slab," *Phys. Rev.*, Vol.B73, 2006, p.115118.
- [81] A. Agrawal and A. Nahata, "Time-domain Radiative Properties of a Single Subwavelength Aperture Surrounded by an Exit Side Surface Corrugation," *Opt. Express*, Vol.14, 2006, pp.1973-1981.
- [82] Y. Zhao and D. Grischkowsky, "Terahertz Demonstrations of Effectively Two Dimensional Photonic Bandgap Structures," *Opt. Lett.*, Vol.31, 2006, pp.1534-1536.
- [83] W.J. Padilla, A.J. Taylor, C. Highstrete, M. Lee, and R.D. Averitt, "Dynamical Electric and Magnetic Metamaterial Response at Terahertz Frequencies," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.96, 2006, p.107401.
- [84] K. Ikushima et al., "Photon-counting Microscopy of Terahertz Radiation," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, 2006, p.152110.
- [85] D.C. Larrabee et al., "Application of Terahertz Quantum-cascade Lasers to Semiconductor Cyclotron Resonance," *Opt. Lett.*, Vol.29, 2004, pp.122-124.
- [86] M. Tonouchi, "Cutting Edge Terahertz Technology," *Nature Photonics*, Vol.1, 2007, pp.97-105.