

안심 · 안전 사회를 실현하기 위한 테라헤르츠 기술

Terahertz Technologies for Realizing Safe and Secure Society

스마트 & 그린 융합부품소재기술 특집

강광용 (K.Y. Kang)	에너지응용기술연구팀 팀장
전동석 (D. S. Jun)	에너지응용기술연구팀 책임기술원
김성일 (S. Kim)	에너지응용기술연구팀 선임연구원
곽민환 (M.H. Kwak)	에너지응용기술연구팀 선임연구원
김태용 (T. Kim)	에너지응용기술연구팀 선임연구원

목 차

-
- I . 서론
 - II . 테라헤르츠(THz)파를 이용한 응용연구 사례
 - III . 원격 가스 센싱
 - IV . 테라헤르츠 이미징 시스템
 - V . 결론

미사용 주파수 대역의 전파 자원인 테라헤르츠(THz)파의 특징을 살려서 고속·대용량·고신뢰 무선 네트워크(인프라)의 구축, 끊임없는(seamless) 접속과 비압축 무선전송 기술 확보, 고도의 사회 보안·감시 기술을 확보하면, 비상사태(재해 및 재난) 시 안전·안심 사회를 실현하는 데 기여할 수 있는 새로운 THz 기술 및 서비스를 제공할 수 있다. 특히, 재해 및 재난 현장에서 확산되는 유독성 가스의 센싱이나 인명(생명체) 탐색용 이미지 확보에 THz 기술을 활용하여, 재난자 구조와 2차 재해 방지에서 중요한 역할을 하는 등, 재해 및 재난 현장에서 발생하는 피해를 최소화시키는 데에 공헌할 수 있다. 테라헤르츠 대역용 원격(remote) 분광·센싱 시스템과 이미징 시스템의 연구 결과(사례)와 이러한 THz 응용 시스템을 구성하는 중요한 요소기술들을 소개하고, 향후의 연구개발 내용 및 기술전망에 대해서 리뷰(평설)한다.

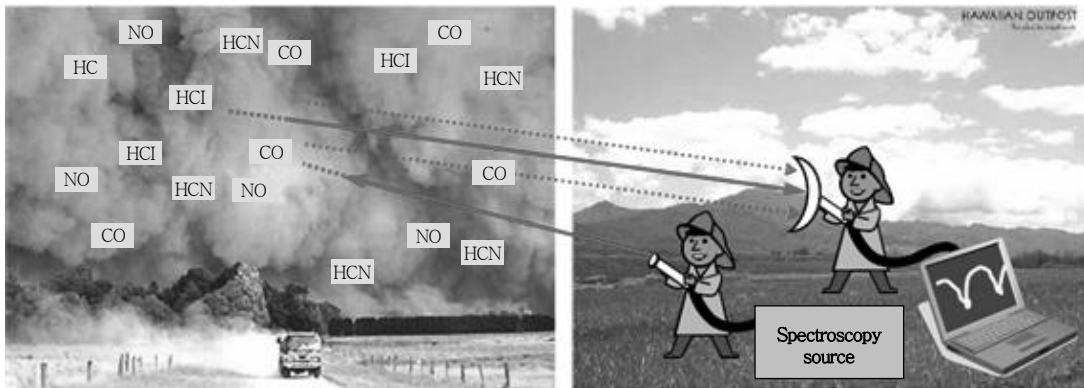
1. 서론

재해 및 재난 현장에서 재해 복구를 할 경우, 고속 무선에 의한 일시적인 네트워크 인프라의 구축이 절대적이다. 이는 10여년 전 미국에서 발생한 대규모 9.11 테러 시에 광기술 기반의 고속무선 기술이 등장하여 크게 기여한 사실이 이를 잘 말해주고 있다. 그리고 광케이블은 대규모 재난사건(지진, 쓰나미, 대형 화재, 홍수 등)에 의하여 빌딩, 도로 기간 시설 등의 붕괴 및 폭발과 함께 불통(단선, 합선, 시설 파괴 등)을 면할 길이 없다. 따라서 재해 및 재난 시 광통신이 무용지물이 될 수 있는 현실을 생각하여(대규모 재해 및 재난의 수요가 해를 거듭할수록 증가 추세임), THz 기술 기반의 대체 기술을 적극적으로 검토하고 핵심기술 및 시스템 개발에 진력해야 한다.

참고로, 향후 THz 통신은 기존 또는 미래의 광통신과 끊임없이 접속하는 기술로써 중요하다. 특히, 차세대 정보처리시스템의 동작원리로는 2차원 전자플라즈몬이나 전자핵 스핀, 그리고 물질의 양자(quantum)를 최대한 활용하는 “양자비트”가 가능하고, 생체 관련 고분자 기능성을 이용하는 분자소자가 가능하지만 일반적으로 원자, 분자 및 고체 중에는 양자준위(quantum level)의 에너지 차이가 수 meV인 것

이 많아 정확히 THz-파의 포톤 에너지에 맞추어 이용한다. 따라서 차세대 정보처리 소자의 제어기법과 정보전달 방법으로서 THz-파의 활용기술이 가능할 것이고, 이를 위하여 THz-파 무선전송 및 제어기술 그리고 이종접합소자의 집적기술 등이 요구된다[1].

이제, 검은 연기가 발생하는 재해 및 재난 현장에 도착하여, 인명을 구조하고 소화(화재진압) 활동을 시작하는 상황에 대하여 생각해보자. 대체로 2차 재해를 방지하기 위하여 유독가스 및 가연성 가스의 발생 유무나 피해자의 소재 확인 등을 신속하게 점검하고, 정확한 상황판단에 기초하여 인명구조 및 소화 활동을 하게 된다. 불꽃, 그을음, 연기 그리고 먼지 등으로 가득 찬 화재 현장에서는 안전한 장소로부터 상황판단에 필요한 정보를 신속하게 획득할 수단이 필요하게 된다. 테라헤르츠파(THz-파)를 가스 센싱 및 이미징 시스템에 응용하면, 재난자 구조와 2차 재해 방지 등의 역할을 하여, 피해를 최소화시키는 데에 공헌할 수 있을 것으로 생각한다. 그 구체적인 응용을 (그림 1)에 나타내었다. 거치형(stand-off type) 또는 휴대형(handy type) 원격 분광·센싱 시스템은 불타고 있는 건물/산림 등의 대상물에 THz-파를 조사(照射)하고, 반사되어 돌아오는 THz-파를 분광분석하여 위험가스를 검지하고 가스의 농도를 측정한



(그림 1) 재해/재난 현장에서의 THz 센싱 및 이미징 기술의 응용 사례

〈표 1〉 THz 기술과 연관된 응용 대상 분야와 기대 정보

대상 분야 재료		기대되는 핵심 정보
공업 재료	소재 분석	유전체(soft phonon), 초전도체(초전도 gap), 광자결정(밴드 구조), 나노컴포지트(Matrix, 나노 미립자 상호작용, 고분자)
	반도체	재료(배향, 분자시슬 간 상호작용)
시큐리티	위험물 탐지	폭발물(플라스틱 폭탄), 흥기 탐지(나이프), 인화성 액체
	약물 탐지	불법약물 탐지(마약, 각성제)
	원격 감시	인물 감시(인포매틱스), 은닉물 감시, 부상 감시
농업·식품	식품 검사	성분 분석(수분, 알코올, 단백질, 아미노산, 지방, 당), 판별·분류, 시간변화 추적, 이물질 검사, 손상 검사
	농작물 검사	성분 분석(수분, 당도), 시간변화 추적, 이물질 검사, 손상 검사
제약·신약	의약품 검사	결정다형, 구조 해석, 알약 코팅 두께, 약제 분석, 의약품 식별
바이오·의학	바이오	생체분자 구조, 수소 결합, 형광 label-free 검출, 수화 상태, DNA
	임상진단	암세포 진단
비파괴검사	제품 검사	도장막 두께, 건조공정 평가, 종이의 수분량, 불량품 검사, 단열타일 검사
	예술·문화재	수리·복원 이력규명, 물감 판별, 화학 단면 구조, 위작 미술품 판명, 진자재 검사
	LSI 불량 검사	배선고장 해석, 초고속 소자의 cut-off 주파수 평가, 태양광 박막용 웨이퍼 검사
환경 측정	환경 감시	유해 가스 검지(추적), 대기(수증기) 감시, 폐기물, 오염물질 검지

다. (그림 1)에서 HCN, CO, NO, HC는 각각 시안화 수소, 일산화탄소, 산화질소 및 탄화수소를 나타내며 유독가스이다. 그리고 휴대형/거치형 THz 신호원과 반사파의 분광분석 장비 등이 구비되어 있다.

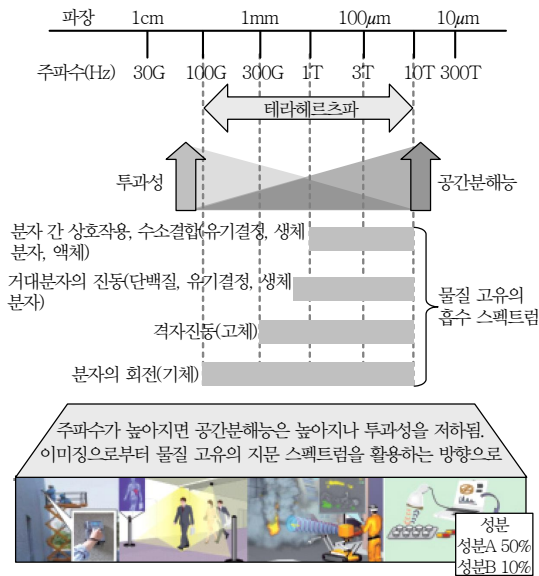
원격 이미징 시스템은 연기나 분진을 통하여 재해 현장에 있는 인명(생명체)의 검색과 정확한 상황 파악에 기여하는 것을 목적으로 한다.

본고는 먼저, THz-파의 고유한 특징을 이용하여 안전·안심 사회 구현과 삶의 질 향상과 직결된 건강을 지킨다는 관점에서 THz-파를 논의하고, 다음에는 THz-파를 이용한 원격 가스 분광·센싱(0.2~0.5THz)과 원격 이미징·센싱(수 THz~10THz)의 성과 그리고 시스템과 관련된 중요한 핵심 요소기술에 대하여 설명한다. 끝으로 현재까지의 연구 결과와 향후 기술전망에 대하여 논의한다.

참고로 <표 1>에 THz 기술의 산업응용 사례(전망)를 도표화하였다[2].

II. 테라헤르츠(THz)파를 이용한 응용연구 사례

0.1~10THz 대역은 아직 산업적으로 개발되지 않은 주파수 대역으로 정의되는 경우가 많다. 이 주파수 범위의 전자파는 광파가 지니고 있는 높은 공간분해능과 전파가 지니고 있는 물질투과성 그리고 인체에 대한 안전성을 구비하고 있다. 또한, 이 주파수 범위에서는 물질 고유의 여러 가지 지문(finger print) 흡수 스펙트럼이 나타난다(그림 2) 참조[2]. 최근 적절한 THz-파 신호원(광원) 및 검출기 기술이 크게 발전하였다[3]. THz-파 발생에서는 1THz 대역 이상은 주로 광기술이 이용되고, 펨토초 레이저 기반의 THz 펄스파/연속파 발생과 비선형 광학을 이용한 단색 THz-파 발생이 주류를 이룬다. 또한 1THz 대역 이하는 공명터널다이오드(RTD)와 쇼트키 다이오드와 같은 반도체 소자(일렉트로닉스) 기술이 중요시되고 있다.



(그림 2) THz파의 특징과 안심·안전·건강을 지키는 응용 연구 사례

이로 인하여 THz 대역의 전자파 특징을 활용하여 국민의 안심·안전을 지키기 위함은 물론 건강유지에 기여함을 목적으로 하는 센싱 및 이미징 기술 기반의 응용연구가 활발히 수행되고 있다[4]. 0.1THz 이하 주파수 대역의 전파는 사람과 무기류(예, 칼 및 총)를 든 사람 등을 인지할 수 있는 정도의 공간분해능(투과성)을 보유하므로, 일본의 경우, 이러한 결과를 이용하여 화염을 통과시켜 사람의 소재여부를 확인하는 연구성과도 올렸다[5].

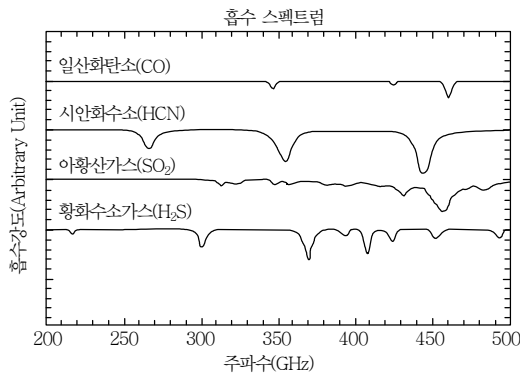
한편, 0.1THz 대역 부근의 THz-파를 이용하여 가옥의 안전관점에서 무너진 벽지 및 타일의 콘크리트 표면에 있는 0.2mm 정도의 균열을 검출한 연구사례도 있다[6]. 그 외의 안전운전을 지원하기 위한 차간거리 계측 등이 있고, 야간에서 전방의 보행자를 검지한 연구사례도 있다. 0.1THz 이상의 주파수 대역에서는 기체분자의 회전여기(回轉勵起)에 기인하는 비교적 큰 흡수 스펙트럼이 관측되기 때문에 원격을 통해서도 유독가스의 존재 여부와 농도를 검출하는

연구가 수행되고 있으며[7],[8], 0.5THz 이상의 주파수 대역에서는 거대분자의 진동여기(振動勵起), 분자 간 상호작용, 수소결합 상태에 기인된 흡수 피크를 관측할 수 있기 때문에, 이 대역과 관련하여 THz-파는 우편물 내부에 있는 마약 및 폭약의 투시검사 기술개발이나 제약의 결정다형(polymorphism) 존재 여부를 검출하는데 이용되고 있으며[9]-[11], 덧붙여 약물의 체내 흡수 현상을 해명하려는 도전이 진행되고 있다[12]. 3~10THz 주파수 대역은 연기로 뒤덮인 재해 현장에서 인명(생명체)의 소재 유무를 확인하는 휴대용 이미징 시스템의 개발 연구가 전 세계 우수기관에서 진행되고 있다[13].

구체적인 테라헤르츠파 응용연구를 소개하기에 앞서, 전자파를 이용한 센싱 기술과 이미징 기술을 요약 정리 하고자 한다. 전자파 기반의 센싱 및 영상 기술은 특정 파장(주파수)의 전자파를 물체에 조사한 후, 투과파 혹은 반사파를 검출하여 분광분석하고 화상화(imaging)하는 능동형(active) 기술과 물체 및 생명체 자체가 복사하고 있는 전자파를 검출하여 분광 분석하고 화상화하는 수동형(passive) 기술로 분류할 수 있다. 이러한 기술을 기초로 THz 응용 시스템으로 개발하기 위한 4개의 주요 공통 핵심 아이টেম은 ① 고출력, 고안정, 광대역이 가능한 테라헤르츠파 발생기(emitter), ② 고감도, 광대역, 검출기(detector), ③ 저손실, 고신뢰의 THz 광학계 및 패키지와 최종적으로는 소형화·저비용화 및 조작성의 간편성을 구현한 테라헤르츠파 응용 시스템이다. 염두에 두어야 할 중요한 특징은 THz-파의 경우, 측정 대상과 발생기 및 검출기의 사이, 바꿔 말해 전파되는 자유공간에 화염, 연기, 그을음, 종이 및 의복 등이 산재하고 있다 하더라도 전파(propagation)하는 신호의 강도가 줄어들지 않으며 인체에 무해한 특성도 지니고 있다.

III. 원격 가스 센싱

연간 수만 건 이상 발생하고 있는 화재 현장에서 일산화탄소(CO의 치사농도: 약 0.4%) 및 피부흡수가 가능한 시안화수소(HCN의 치사농도: 약 270 ppm, 1%=10,000ppm)는 목숨을 위협할 수 있는 전형적인 유독가스에 속한다. 시안화수소(靑酸) 가스는 질소를 함유한 우레탄, 아크릴 및 나일론 등의 재료가 연소할 때 발생하며 치사농도가 낮다. 또한 유화(硫化)수소 가스(치사농도: 약 2,000ppm)로 절명하는 사건도 있고, 화산 지역에 많은 아유산(亞硫酸) 가스(치사농도: 약 2,000 ppm)의 발생 또는 누설도 큰 사회적 문제이다. 따라서 이와 같은 유독가스의 농도검출에는 0.2~0.5THz의 주파수 범위로 관측되는 상술한 분자들의 회전여기에 의한 흡수 스펙트럼을 활용하는 것이 가능하다. (그림 3)에 표시한 것은 CO, HCN 등의 분자흡수 스펙트럼에 대한 데이터베이스(HITRAN)[14]을 이용하여 계산한 예로써, 시안화수소는 치사농도의 1/10 정도로, 그 이외의 가스에 대해서는 치사농도가 존재하는 것으로 계산하였다. 치사농도 수준의 유독가스가 존재한다면, 각각의 가스가 갖는 고유의 흡수 피크를 명확히 관찰할 수 있을 것으로 기대된다.

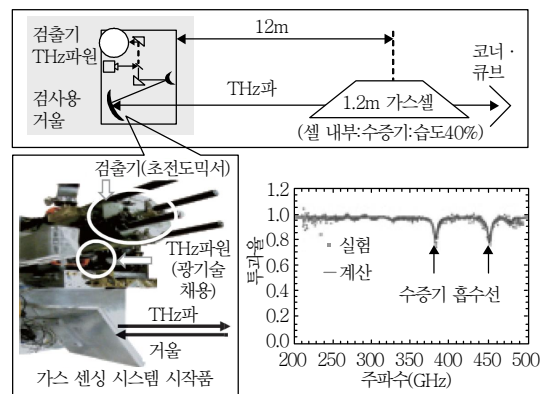


(그림 3) 재해현장에서 측정된 유해가스 흡수 스펙트럼의 예 (HITRAN 데이터베이스에 의한 계산 예)

1. 센싱 시스템

재해 현장에 설치하여, 유독가스의 존재 및 농도를 실시간으로 검출하기 위하여 0.2~0.5THz 대역의 테라헤르츠파 발생기(신호원)와 초저잡음·광대역 초전도(超傳導) 터널형 믹서(mixer)를 이용한 검출기를 개발 및 결합하여 구축한 센싱 시스템을 (그림 4)에 나타내었다[15].

본 센싱 시스템의 동작원리는 다음과 같다. 즉, 발생기로부터 생성한 THz-파를 방사거울을 통하여 평행빔으로 만들고, 12m 떨어진 가스셀(cell)에 조사한다. 가스셀을 투과한 THz-파는 콘크리트로 제작한 코너·큐브(corner-cube)에서 반사하여 입사파와 평행한 빔이 되어 검출기로 되돌아 온다. 안전을 위해 최초 실험에서는 가스셀을 수증기로 채우고(습도는 5~43% 사이를 변화시킴), 수증기가 갖는 0.38 및 0.45THz 부근의 흡수 피크를 검출할 수 있는지를 검증하였다. 실험결과 12m 앞에 있는 셀 내의 수증기에 대한 흡수선을 관측할 수 있었고, 실험으로 얻어진 흡수 피크 강도는 HITRAN 데이터베이스[14]와 기초한 스펙트럼 계산치와 잘 일치함을 보여준다. 동시에 본 시스템은 0.2~0.5THz 범위의 흡수 스펙트럼을 4초 이내에 디스플레이에 표시할 수 있고, 실시간



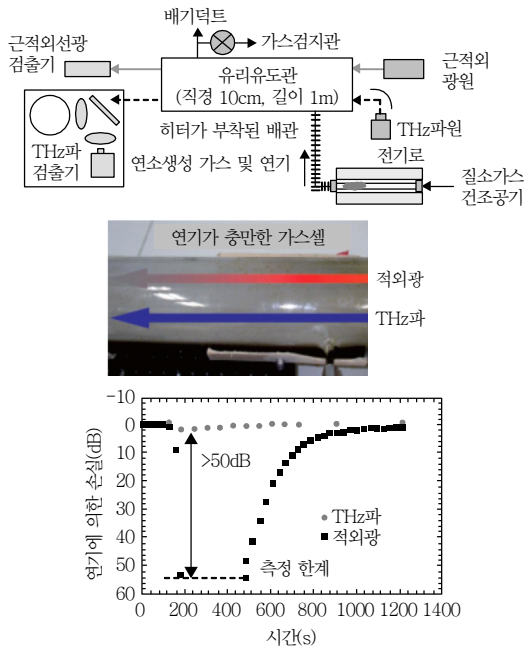
(그림 4) 능동형 THz 분광센싱 시스템 및 반사파 분광실험

으로 가스농도의 변화를 측정하는 것도 가능하였다.

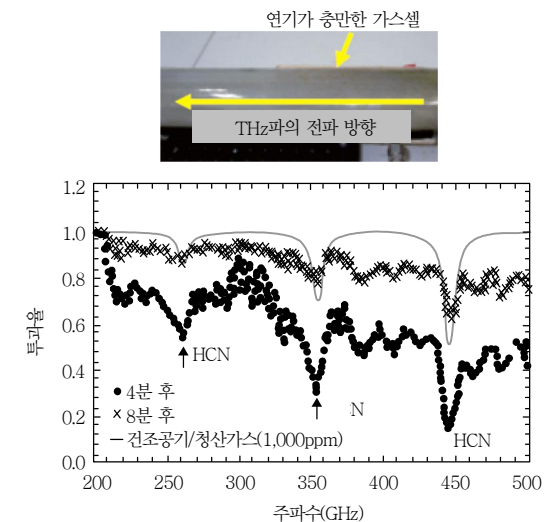
다음으로, THz-파를 이용한 원격 가스센싱이 재난/재해 현장에서의 유효성 여부를 검증하기 위한 실험 예를 나타내었다[16]. 원격 가스센싱 시스템으로는 근적외선(파장 1.65mm)을 사용한 메탄가스 검출 기술이 이미 실용화되어 있다. 따라서 기존 시스템과의 비교를 위해, 근적외선 및 THz-파를 이용하여 연기에 의한 감쇠 특성을 살펴보았다. 먼저, 전기로를 이용하여 나뭇조각 및 나일론 등을 태워서 발생한 연기를 유리관에 흘려보내서 가득 채우고 이어서 배기되는 실험 상황을 구축한 후 유리관의 양단에 근적외선 및 THz-파의 발생기 및 검출기들을 마주보게 하여 도관 내를 이동하는 근적외선 및 THz-파의 시간에 따른 감쇠변화를 관찰한다(그림 5) 참조. THz-파의 감쇠는 0.2~0.5THz 대역에서의 평균치로 계산하였다. 근적외선의 경우는 연소에 의한 연기가 발생하기 시작되면 즉시 감쇠하며 그 감쇠량은 50dB 이상에 이른다. 연소가 끝나고 연기의 배기가 진행되면

감쇠는 점점 작아진다. 반면에 THz-파는 최대 2.2dB 정도의 감쇠가 발생하는 것에 지나지 않는다. 이 결과는 화재현장에서 통상적으로 사용하는 근적외선 분광시스템의 경우, 연기의 영향을 많이 받기 때문에 THz-파를 기반으로 하는 원격 가스센싱 시스템의 잠재능력이 매우 높다는 것을 잘 보여준다.

동일한 실험 셋업(setup)을 이용하고, 나일론을 연소하여 발생하는 연기 및 가스를 유리관 내에 통과시켜 가득 채운 후, THz-파를 전파시켜 투과파를 분광분석하였다. 발생한 연기가 가득 채워진 유리관 내에서, 연소개시로부터 4분 후와 8분 후에 측정된 투과파의 스펙트럼과 건조공기에 1,000ppm의 시안화수소(靑酸) 가스를 혼합한 경우에 대한 흡수 스펙트럼의 계산결과를(그림 6)에 나타내었다. 시안화수소 가스의 스펙트럼에서는 고유한 0.265, 0.354 및 0.444THz 대역과 관련된 주기적인 흡수 피크가 관찰되었다. 이러한 흡수 피크의 크기를 계산치와 실험치로서 비교하여 농도를 추정하였는 바, 4분 후에는 그 농도가 최대 1,760ppm에 이르렀다. 실제로 산소공급이 충분하지 않은 연소조건에서 나일론을 연소시킬 경우, 고농도의 시안화수소 가스가 발생하는 것으로 알려져



(그림 5) 연기에 의한 감쇠 비교(적외선광과 THz-파의 비교)



(그림 6) 연기에 포함된 시안화수소의 흡수 스펙트럼 검지 실험

있다. 이 실험을 통하여, 고유의 흡수 피크를 명확하게 관측할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 근적외선에 의한 기술로는 실현할 수 없었던, 연기가 가득 채워진 공간 내에 존재하는 시안화수소 가스의 검출에도 성공하였다. 시안화수소의 존재 및 농도는 연소가스를 샘플링하여 검출관에 의해서도 확인할 수 있다.

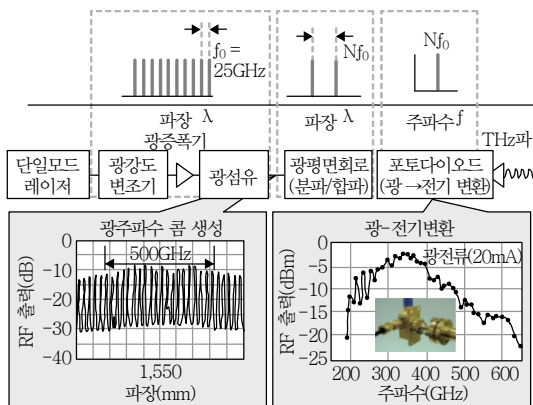
2. 능동 센싱용 발생기 및 검출기

앞에서 기술한 바와 같이 능동형(active) 센싱 시스템을 구현하기 위해서는 고출력·고안정·광대역 THz-파 발생기(신호원)와 고감도·광대역 검출기의 개발이 핵심과제이다. 가스의 흡수 스펙트럼으로부터 종류 및 농도를 측정할 경우에는 신호원의 발진 주파수 범위가 넓어야 하고, 안정한 선폭이 좁은(narrow) 소자가 유리하다. 여기에, 광통신에서 개발되었던 고신뢰성의 광대역 광부품 및 광기술을 이용하여 발생기를 구성하였다(그림 7 참조)[17]. 단일 모드 레이저의 출력광을 강도(強度)변조하면 여러 개의 측대파(side-band wave)가 발생한다(참고로, 25GHz에서 강도변조한 예가(그림 7)에 나타나 있음. 그리고 ETRI에서도 유사한 실험을 통하여 측대파를 얻는데 성공하였음). 이 신호를 증폭하여 광섬

유에 입사하면, 그것의 비선형효과에 의해 측대파의 숫자와 세기(강도)가 증가하여 측대파 무리(群)가 넓은 주파수 대역에 걸쳐 빗살처럼 생성된다(광주파수 빗살(comb)로 알려져 있음)[18]. (그림 7)에 나타낸 것과 같이, 25GHz 간격으로 500GHz 이상에 걸쳐 광주파수 빗살이 생성되어 있다. 이 측대파 무리를 광평면회로에 입력한다. 광평면회로는 분파 기능(프리즘 기능)과 합파 기능을 지니고 있어, 입력된 측대파 무리로부터 임의의 두 개의 측대파를 추출할 수 있다. 이를 고속의 포토다이오드(photodiode: PD)에 입력하여 광전변환을 시행한다. 포토다이오드로부터 2가지 측대파의 주파수차에 대응하는 주파수 즉, 최초의 강도변조주파수의 정수배에 해당하는 주파수의 THz-파를 얻는 것이 가능하다. 이 방법을 가능하게 하는 포토다이오드에는 단일주행 캐리어(unitraveling carrier) 포토다이오드(UTC-PD)를 사용하였다[19]. 이 소자는 반도체 PIN 포토다이오드의 일종이지만, 반도체 내부를 고속으로 이동하는 전자 자체만 능동 캐리어로 움직일 수 있도록 만든 구조로서, 광신호로부터 효율이 좋은 THz-파를 발생시킨다. 이 포토다이오드를 이용한 모듈은 0.2~0.5THz 대역에서 원격 센싱에 필요한 수준(-20dBm) 이상의 출력 수준을 지니고 있다(그림 7 참조).

지금까지 설명한, 광기술을 이용한 발생기는 광대역에서 안전한 THz-파 발생원이지만, 다음에서 설명하는 헤테로다인 방식에 의하면 THz-파 신호검출기의 국부발진기로 활용되기도 한다.

검출기의 경우, THz-파를 이용하여 위험한 가스의 농도를 측정하기 위해 가스분자 자체가 방출하는 미약한 THz-파를 검출하고, 수동(passive) 센싱에도 적용될 수 있도록 고감도 및 저잡음 특성을 목표로 하고 있다. 따라서 초전도 기술을 이용한 저잡음·



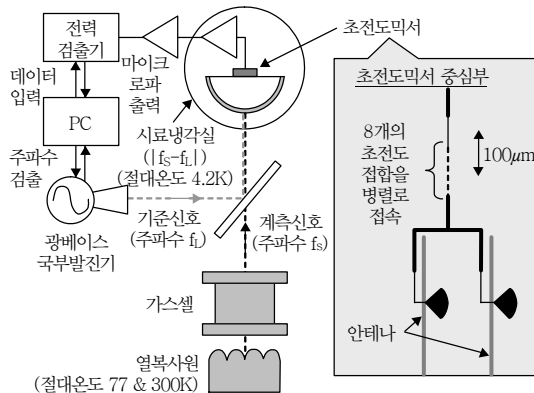
(그림 7) 광기술에 의한 THz파원 구성(광주파수 콤의 생성)

광대역형 믹서와 광기술을 이용한 광대역·고출력형 국부발진기(Local Oscillator: LO)를 조합한 헤테로 다인 방식을 채택하였다(그림 8) 참조[20]. 이 방식에 의하여 THz-파 대역의 신호는 마이크로파 대역의 신호로 변환되고, 분자가 방출하고 있는 미약한 신호를 검출한다. 기존의 주파수 대역이 상이한 복수개의 헤테로다인 수신기를 통해서도 얻을 수 없었던 중심주파수 86%에 상당하는 넓은 대역(0.2~0.5THz)을 단일수신기로서 얻을 수 있다는 것이 중요하다. 그 뿐만 아니라 74%에 이르는 대역에서 양자잡음(quantum noise) 한계의 20배 이하가 되는 초저잡음 특성을 얻는 데에도 성공하였다. (그림 9)에 나타낸 것과 같이 아산화질소(NOx) 가스 분자가 방출하고 있

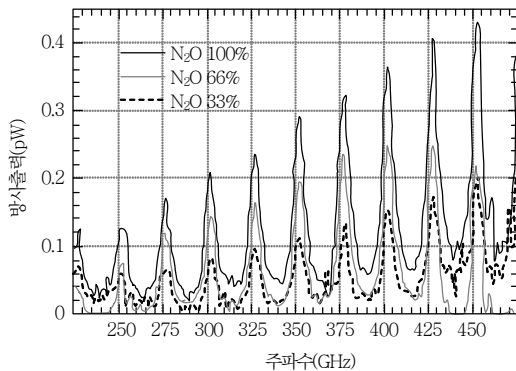
는 수 pW 수준의 미약한 THz-파를 분광분석하여 가스 분자의 회전여기에 기인하는 방사스펙트럼 및 그 농도에 대응하는 피크 강도의 변화를 관측하였다. 이러한 연구 결과는 저잡음의 초전도 믹서와 광대역·고안정 광기술에 의한 국부발진기와의 조합으로만 얻을 수 있는 성과로 볼 수 있으며, 이 검출기는 수동형 및 능동형 분광·센싱 응용 양쪽에 활용할 수 있는 감도를 지니고 있다는 것이 실증되었다.

IV. 테라헤르츠 이미징 시스템

THz-파는 가시광 및 적외선에 비하여 파장이 길기 때문에 먼지와 티끌에 의한 산란 감쇠가 적고 재해/재난 현장에서의 인체(생명체) 탐색 등의 상황 파악에 충분히 기여할 것으로 판단된다. 상황 파악을 신속하게 진행시켜야 하기 때문에, 실시간 이미징 기술이 반드시 필요하다. 그러나 실온 동작과 실시간 영상(이미징)이 가능한 고감도 THz 어레이 센서 자체가 존재하지 않아서 여러 가지로 어려움이 많았다. 이리하여 고감도로 이동성 및 간편성이 우수한 THz 실시간 이미징 시스템의 실현을 목표로 하여, 동일한 장치에 탑재할 수 있는 고감도 THz 어레이 센서/카메라의 개발에 정력적으로 매진하고 있다.



(그림 8) 초전도믹서 및 광기술에 의한 국부발진기로 구성된 헤테로다인 검출기

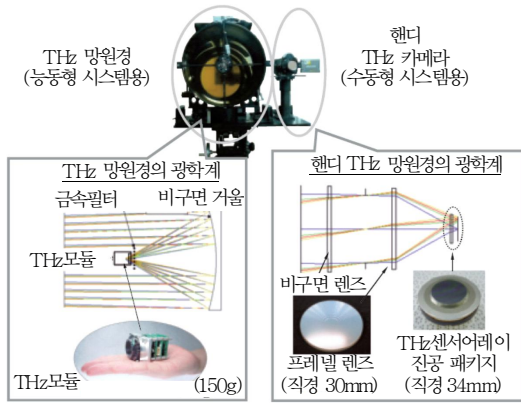


(그림 9) 아산화질소가스 분자의 방사 스펙트럼 실측 예

1. THz 카메라

여기서는 파장 10mm 대역 볼로미터형 비냉각 적외선 어레이 센서를 기반으로 한, 고감도화 THz 어레이 센서의 개발과정을 소개하고, 다른 연구기관에서 시제품으로 내놓은 THz 배열센서(array sensor)와 카메라의 실시간 영상 사례를 서술한다.

(그림 10)은 개발된 휴대용(handy) THz 카메라와 THz 망원경이며, 아래 박스에 각각의 광학계 개



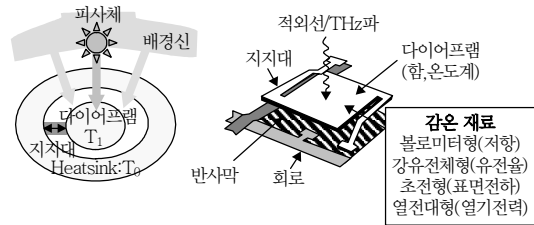
(그림 10) THz망원경 및 THz 핸드이미저 요관

요도를 나타내었다. (그림 10)의 우측은 수동형 이미징을 나타내고 있으며, 비교적 넓은 시야로부터 흑체 복사를 받아들여 화상화한다. 이 THz 카메라의 광학계는 높은 비저항 Si를 이용한 무반사 코팅된 비구면(非球面) 박막렌즈 및 프레넬 박막렌즈로 구성된다. (그림 10)의 좌측은 능동형 이미징을 상정한 것으로, THz 파원으로 피사체(被寫體)를 조사하여 반사파를 집광하고 화상화한다. 이 망원경은 비구면 거울과 그의 주초점에 설치된 소형 THz 모듈로써 구성된다.

이러한 THz 카메라에는 -나중에 기술하게 될- THz 초소형 검출기의 2차원 어레이를 포함하는 진공 패키지(package)가 실리게 된다.

2. 초소형 검출기의 구조 및 성능

본 절에서는 냉각이 필요 없는 THz 어레이 센서의 동작원리 및 기본구조에 대하여 설명한다. 센서는 열저항이 큰 지지대(支持臺)로 지지하는 다이어프램(diaphragm: 구조물을 보강하는 칸막이 판), 열감응 재료(온도상승분을 전기신호로 변환함) 및 전기신호를 검출하는(readout) 회로로 구성된다(그림 11) 참조[13]. 다이어프램은 피사체가 복사(輻射)하는 THz-파를 흡수하고 온도가 상승한다(T_1). 다이어프램 위



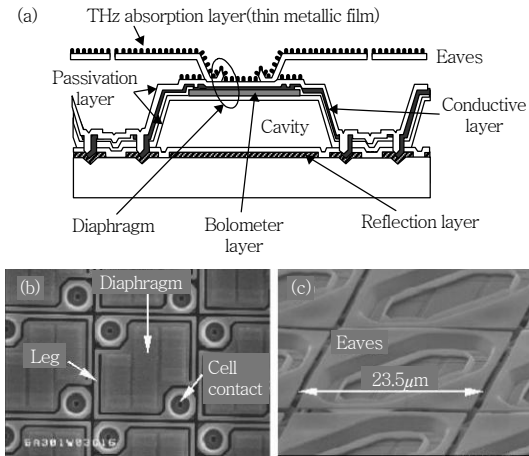
(그림 11) 볼로미터형 비냉각 검출기의 동작원리

의 열감응 재료가 이 온도상승($dT=T_1-T_0$)을 전기신호로 변환한다. 다이어프램 위의 열은 지지대를 통하여 방열판(heat sink, T_0)으로 빠져나가기 때문에 감도를 높이기 위해서는 다이어프램의 열분리 구조가 핵심이다.

시제품에는 MEMS를 이용한 마이크로프린지(microfringe) 구조를 활용하여 고감도화·소형화를 시도하였다. 열감응 재료의 후보에는 볼로미터(저항 변화), 강유전체(유전율 변화), 초전(焦電)재료(표면전하 생성) 및 열전재료(열기전력 발생)가 있다. 여기서 거론된 센서에는 안정적이고 가공성이 우수한 볼로미터(산화바나듐: VO_x)가 채용되었다.

실제의 시제품에서 모서리의 길이가 23.5mm인 정사각형 모양의 미세검출기 구조를 (그림 12)에 나타내었다.

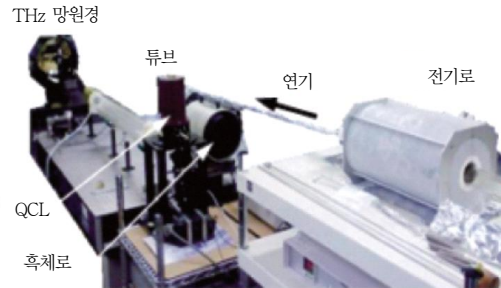
검출기는 수광부인 다이어프램 위에 형성된 상판 및 다이어프램을 Si 검출(readout) 회로 기판으로부터 띄워서 지지하는 받침대로 이루어진다. 다이어프램은 산화바나듐(VO_x) 볼로미터 박막, 티타늄합금의 전기배선 및 이들을 보호하기 위한 실리콘 질화막(SiN) 등으로 구성되는 다층구조이다. 동일한 구조에 대하여 THz-파로서 감도를 얻어내기 위해서는 (그림 12a)와 같이 공동(cavity)의 간격(반사막과 다이어프램 사이의 간격)을 검출하고자 하는 파장의 1/4로 하고, 다시 금속 박막을 진공 임피던스 정합($377\text{ohm}/\square$)시키는 것이 최적이다. THz-파의 경우, 10THz에



(그림 12) 비정각형 THz 검출기의 기본 단면 구조(a)와 SEM 사진((b) 윗층 단면구조, (c) 아랫층 단면구조)

서도 동공의 간격이 7.5mm가 된다(THz 대역에서는 주파수(u)와 파장(l)과의 관계는 $l \times u = 300\text{mm} \times \text{THz}$ 로 표기할 수 있음). 이미 개발되어 있는 동공간격이 약 1.5mm인 적외선용 검출기를 생산하던 기술을 활용하여 시작품 개발을 가속화하였고, 금속 박막의 면저항을 $377\text{ohm}/\square$ 로부터 해보는 것에 의해 감도를 뽑아내는 방법이 탐색되었다[13]. 검출기의 감도는 다이어프램과 상판의 THz 흡수율에 비례하기 때문에, THz 흡수막(금속 박막)의 면저항을 파라미터로 하여 파장 100mm 간격마다 총 흡수율을 실험적으로 평가하고, 총 흡수율 20%를 얻는 조건을 찾을 수 있었다. THz 흡수막이 없는 적외선용 검출기의 총 흡수율은 약 3%에 머무르기 때문에 THz 흡수막을 사용하면 총 흡수율이 크게 개선된다는 것을 알 수 있다. 여기까지 기술한 미세검출기를 가로방향과 세로방향의 2차원으로 배열한(320×240) 2차원 어레이 센서를 제작하였다.

THz 센싱 시스템과 같은 방법으로 제작된 THz 망원경을 이용하여, 재해/재난 현장에서의 THz-파를 이용한 이미징의 유효성을 검증하였다(그림 13 참조). 광원으로서의 흑체로(黑體爐, blackbody furnace)와 QCL(양자폭포 레이저)[21]를 이용하였다.



	연기 없음	흰 연기
흑체로(900℃) 적외선영역		
흑체로(900℃) (파장 30µm 이상의 THz 영역)		
3.1THz의 광원		

(그림 13) 연기를 통과한 THz파원의 실시간 이미지

nace)와 QCL(양자폭포 레이저)[21]를 이용하였다. 전기로를 이용하여 나뭇조각 등을 연소시켜 나온 연기를 유리관 튜브에 흘려서 연기를 가득 채우고, 유리관의 양단에 THz 망원경 및 광원을 마주보게 하고 실시간 영상을 얻었다. 적외선 파장 영역에서는 흰 연기가 관에 삽입되는 즉시 광원의 이미지가 소실되었다. 한편, 파장 30mm 이상, 즉 주파수가 10THz 이하에서는 흰 연기 주입 후에도 깨끗한 광원 이미지를 계속적으로 얻을 수 있었다. 이 실험에서는 금속그물형 필터(metal-mesh type filter)를 이용하여 흑체로로부터 복사된, 파장이 30mm가 넘는 전자파를 필터에 투과시켜 센서에 입사하였다. 발진주파수가 3.1THz인 양자폭포 레이저를 광원으로 사용한 경우에도 동일한 결과가 얻어졌다.

향후, QCL의 출력이 높아지고 냉각기와 결합한 이동형 THz 광원이 개발되면, 재해/재난 현장에서 사용할 수 있는 능동형 이미징 시스템으로 발전할 가능성이 높다.

V. 결론

테라헤르츠파의 장점인 재해/재난 현장에서 발생 할 수 있는 유독가스의 센싱 및 이미징 기능을 활용 하여, 피해자의 구조 및 2차 재해 방지 등에 사용될 수 있는 연구개발 시스템 및 핵심모듈 기술을 중심으로 서술하였다. 가스 센싱은 기존의 근적외선을 이용한 원격 센싱 기술에 비하여 많은 장점을 지니고 있다는 것이 확인되었다. 즉, 연기가 존재해도 가스농도를 검지할 수 있는 등 명확한 장점이 확인되었다. 현 단계에서 캐스터가 부착된 장치를 탑재하고 이동할 수 있는 시스템을 구축하여 실제 화재현장과 같은 개방형 연소실험을 수행하여, 그 실험에서 발생하는 가스 종류 및 농도를 10~20m 떨어진 곳에서 측정하는 실험사례를 보였다. 동시에 실제로 구조 활동을 수행하는 상황을 설정하여 설치 방법, 보정 방법 및 THz 대역에 대응하는 여러 가지 연소가스 흡수 스펙트럼을 밝히고 이를 데이터베이스화하여 분광분석 알고리즘을 밝히는 연구도 필수적이다. 덧붙여, 다양한 가스 종류를 확인하기 위해서는 시스템이 취급할 수 있는 상한주파수를 1THz 이상으로 할 필요가 있기 때문에, THz 신호원 및 검출기의 고주파화가 더 필요하다. 한편, 이미징 시스템의 개발현황은 볼로미터를 마이크로브릿지 구조로서 열분리한 구조와 THz 흡수막을 하나로 통합하여 고감도·초소형 검출기를 구성하고 이를 어레이화한 비냉각 방식의 THz 카메라가 실현되고 있다. TV 화면과 같이 실시간 모니터링 가능한 휴대용 카메라 형태이기 때문에, 실시간 화상계측이 가능한 재해 현장에서의 활용, 비파괴검사, 재료분석, 공정관리 및 위험물 검출 등의 각종 응용을 실현하기 위한 가능성 확산이 기대되고 있다.

여기까지 서술한 THz 대역용 센싱 시스템과 이미

징 시스템을 결합하고 이어서 소형화 실현을 통해, 구조로봇에 탑재되어 재해/재난 현장에서 활약할 것을 전망하여 묘사한 것이 (그림 2)이다. 그리고 THz 신호원과 검출기 및 정보처리 기술은 아직도 미성숙된 THz-파 이용기술의 발전에 기여하게 되고, 농업식품, 자연환경 모니터링, 시큐리티 등 여러 분야와 관련된 신제품 개발, 신시장 개척으로 이어질 가능성이 크다.

● 용 어 해 설 ●

테라헤르츠 발생 및 검출 기술: THz-파 발생 및 검출기술은 광공학에 의한 경우와 전자공학에 의한 기술이 있음. 특히 1THz 대역 이상은 주로 펄스초(fs) 레이저 및 광전도 스위치 기반의 광기술(최근에는 수 펨토초)이 이용되고, 1THz 대역 아하는 공명터널다이오드(RTD)와 쇼트키 다이오드, Si-집적소자(CMOS)와 같은 전통적 반도체소자 기술을 이용함.

테라헤르츠 보안/검색/검지 기술: THz-파의 우수한 물성(투과성, 직진성, 인체무해성)과 THz 기술을 활용하여 확립된 보안/검색/검지 기술에는 분광분석과 이미징 기술이 필요하며, 이를 구현하기 위해서는 고효율신호원(emitter), 고감도 검출기, THz 시스템의 병렬개발이 요구된다. 특히, 시스템의 소형, 경량, 저가를 실현하는 데는 반도체 기반의 센서와 신호증폭기 기술과 함께, 고주파 트랜지스터, 믹서 그리고 이들의 집적화 기술이 필수적임.

약어 정리

CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
HITRAN	High resolution transmission molecular absorption database
LO	Local Oscillator
LSI	Large Scale Integration
MEMS	Micro Electro Mechanical System
PD	photodiode
PPM	Parts per million
QCL	Quantum Cascade Laser
RTD	Resonant Tunnel Diode
SEM	Scanning Electron Microscope
UTC-PD	uni-traveling carrier photodiode

참고 문헌

- [1] Y. Kado, "Protecting Safety of Industrials and Society Using Terahertz Waves," *Oyo Buturi*, 日本應用物理, vol. 80, no. 1, 2011, pp. 11-17.
- [2] R. Fukasawa, "Analysis of the Industrial Materials by Terahertz Sensing," *Oyo Buturi*, 日本應用物理, vol. 79, no. 4, 2010, pp. 312-316.
- [3] H. Ito, "Terahertz-wave Sources: the Frequency Gap between Lasers and Masers," *Oyo Buturi*, 日本應用物理, vol. 79, no. 6, 2010, pp. 524-529.
- [4] Terahertz Technology, 動向調査委員会編, 斗内政吉, 監修, Ohm社, 2006.
- [5] K. Mizuno et al., "New Application of Millimeter-wave Incoherent Imaging," *Proc. Int. Microwave Symp.*, Paper WE2C-3, USA, 2005.
- [6] H. Togo et al., Proc. EuCAP 2010 propagation, Marcelona, Paper S24, 2010.
- [7] H.J. Hansen, "Standoff Detection Using Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 8, Aug. 2007, pp.1691-1701.
- [8] K.-H. Oh et al., "High-sweeping-speed Optically Synchronized Dual-channel Terahertz-signal Generator for Driving a Superconducting Tunneling Mixer and its Application to Active Gas Sensing," *Opt. Exp.*, vol. 17, no. 21, 2009, pp. 18455-18461.
- [9] C. Otani et al., "Terahertz Imaging and Its Applications in Security and Safety," *Oyo Buturi*, 日本應用物理, vol. 75, no. 2, 2006, pp. 188-194.
- [10] K. Yamamoto et al., "Noninvasive Inspection of C-4 Explosive in Mails by Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, 2004, pp. L414-L417.
- [11] T. Ikeda et al., "Investigation of Inflammable Liquids by Terahertz Spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, 2005, pp. 034105-1-034105-3.
- [12] C.J. Strachan et al., "Using Terahertz Pulsed Spectroscopy to Quantify Pharmaceutical Polymorphism and Crystallinity," *J. Pharm. Sci.*, vol. 94, no. 4, 2005, pp. 837-846.
- [13] N. Oda et al., "Detection of Terahertz Radiation from Quantum Cascade Laser Using Vanadium Oxide Microbolometer Focal Plane Arrays," *Proc. SPIE*, vol. 6940, 2008, pp. 69402Y-1-69402Y-12.
- [14] HITRAN 데이터베이스.
<http://www.cfa.harvard.edu/HITRAN/>
- [15] N. Shimizu et al., "Optically Synchronized Dual-channel Terahertz Signals for High-performance Transmitter/Receiver System," *Proc. SPIE*, vol. 7601, 2010, pp. 76010D-1-76010D-8.
- [16] N. Shimizu and Y. Kado, "Detection of Hydrogen Cyanide in the Smoke Emitted from the Combustion of Nylon Fabric with a Continuous-wave THz Spectrometer," *Proc. Int. Conf. Infrared, Millimeter, and THz waves*, Roma, 2010, paper Tu-A1.2.
- [17] H.-J. Song et al., "Broadband-frequency-tunable Sub-terahertz Wave Generation Using an Optical Comb, AWGs, Optical Switches, and a Uni-traveling Carrier Photodiode for Spectroscopic Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 15, 2008, pp. 2521-2530.
- [18] F.-L. Hong, "Optical Frequency Combs - the Innovation of Optical Science," *Oyo Buturi*, 日本應用物理, vol. 79, no. 6, 2010, pp. 546-549.
- [19] T. Ishibashi et al., "High-speed and High-output InP-InGaAs Unitraveling-carrier Photodiodes," *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 4, 2004, pp. 709-721.
- [20] S. Kohjiro et al., "A 0.2-0.5THz Single-band Heterodyne Receiver Based on a Photonic Local Oscillator and a Superconductor-insulator-superconductor Mixer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 9, 2008, pp. 93508-1-93508-3.
- [21] H. Yasuda et al., "Terahertz Electroluminescence from GaSb/AlSb Quantum Cascade Laser," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 19, 2005, pp. 1062-3.