

위험 물질 탐지를 위한 인체 방사선 신호 검출 기술 최신 동향

Trends in Human Radiation Signal Detection Technology for Hazardous Material Detection

조진철 (J.C. Cho, hide28@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 박사후연수연구원
이의수 (E.S. Lee, euisu@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원/실장
김영호 (Y.H. Kim, youngho@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원
박동우 (D.W. Park, dwpark@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
강수철 (S.C. Kang, sckang@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
조성우 (S.W. Jo, swjo@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원

ABSTRACT

Terahertz (THz) technology is gaining attention as a non-invasive, non-contact security system for detecting hazardous materials concealed beneath clothing. This paper presents an overview of various THz detection devices and their applications in security screening systems. It is expected that this technology will play a significant role not only in personnel security checks but also across various other fields in the future.

KEYWORDS 테라헤르츠, 테라헤르츠 검출 소자, 패시브 이미징 시스템

I. 서론

테라헤르츠(THz: Terahertz) 기술의 개발은 19세기 후반 보세(J.C. Bose)의 밀리미터파(mmW: millimeter Wave) 검출을 시작으로[1], 본격적인 테라헤르츠파 대역의 연구가 시작되었다. 우주 관측을 위한 성간 물질의 스펙트럼 관측으로부터 세계 최대 전파망원경인 ALMA(Atacama Large Millimeter Array)에 이르기 까지[2], 그리고 반도체 소자 기술의 발전과 함께 볼

로미터, 콜레이 셀과 같은 열형 검출기[3,4] 및 양자 구조 기반 다이오드, 초전도 터널접합과 같은 광자 형 검출기, 쇼트키 배리어 다이오드나 광전도 안테나의 개발에 의한 상온 검출기 등[5], 1990년대 이후 까지 많은 종류의 THz 검출 소자가 보고되어왔다. 이렇게 개발된 장비 혹은 소자들은 고도로 숙련된 인력만 사용할 수 있는 고가의 장비였다. 그러나 지난 20년간 보다 더 작고 안정적인 구성요소를 개발 하여 사용하기 쉽고 더욱 저렴한 시스템을 구현하

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390605>

* 본 연구는 ETRI의 연구운영비 지원사업[24RB1410]의 지원으로 수행되었음.



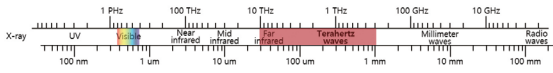


그림 1 전자기파 스펙트럼 내에서 THz/mm Wave 대역의 위치

기 위한 노력은 계속되어왔다. 현재 THz 기술은 이미 상업 시장에까지 진입한 단계이며, 생산 공장의 산업 공정 모니터링 응용시스템은 이미 상업적으로 판매가 이루어지고 있다.

표준 정의가 없는 THz파는 0.1~30THz 사이의 스펙트럼 영역에 포함되나 이와 같은 범위는 원적외선 대역과 증적외선 대역을 침범하므로 초광대역 THz를 다루지 않는 한 그림 1과 같이 0.1 혹은 0.3~10THz 대역을 보편적으로 정의하며 사용한다. 상업적인 애플리케이션으로 이제 막 한 발을 내딛고 있는 THz파 대역이 매력적인 이유는 가시광 혹은 적외선과는 다르게 세라믹 플라스틱과 같은 유전체에 대해 높은 투과성을 가지면서도 수 meV의 현저히 낮은 광자 에너지로 비파괴 특성, 비이온화 특성을 갖는 데 있다. 하지만 효율적이고 컴팩트한 THz 소스 및 검출기 개발의 기술적 어려움으로 인해 가장 덜 탐구된 영역으로 남아있기도 하며, 이와 같은 적절한 기술의 부재로 THz 대역은 “THz gap”이라고 불린다.

본고에서는 이와 같이 “THz gap”으로 남아있는 미지의 영역을 채우기 위해 검출기 관점에서의 THz파 검출소자 기술에 대한 동작 원리, 특징 그리고 활용에 대해 정리하고 이러한 소자를 활용한 이미징 시스템을 소개하고자 한다.

II. 테라헤르츠 검출기의 분류

THz 신호 검출은 크게 직접 검출과 헤테로다인 검출 두 가지로 분류된다. 헤테로다인 검출 방식은 무선주파수(RF: Radio Frequency) 입력 신호의 진폭과

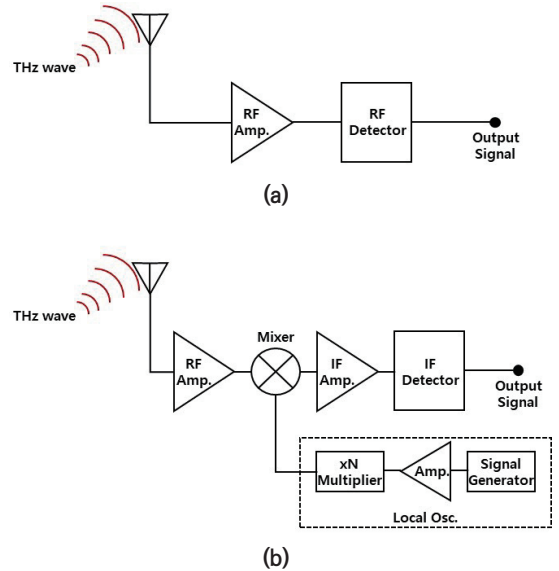


그림 2 검출기 방식에 따른 블록다이어그램: (a) 직접 검출기, (b) 헤테로다인 검출기

위상 정보를 동시에 검출할 수 있지만, 전자인 직접 검출 방식은 신호의 위상 정보를 보존할 수 없으므로 신호의 진폭 정보만을 검출하게 된다. 각각 비일관성 검출 및 코히런트 검출이라고도 하며, 각각의 경우에 대한 신호 검출 방법은 그림 2에 모사하였다.

그림 2와 같이 직접 감지의 경우, RF 신호를 직접 RF 검출기를 통해 검출하기 때문에 헤테로다인 검출 방식에 비해 상대적으로 응답속도가 느리지만 단순한 구조로 인해 대면적 배열화에 대한 장점이 있으므로 이미징 시스템 구성에 적극 활용되고 있다. 헤테로다인 검출기의 경우, 국부 발진기(LO: Local Oscillator)로 구동되는 믹서를 통해 다운 컨버전 된 주파수가 중간 주파수(IF: Intermediate Frequency) 단계에서 IF 검출기를 통해 검출되는 방식으로, 직접 검출 방식과 비교하여 감도와 잡음 특성이 우수할 뿐만 아니라 높은 주파수와 빠른 응답속도 특성을 갖는 장점이 있다. 그러나 LO의 대역폭과 출력이 전체 시스템의 성능을 결정하므로 검출 대역이 한정되며 시스템 구성이 복잡해지는 단점이 있다.

III. 테라헤르츠 검출기 소자

THz 검출기는 고감도, 짧은 응답시간, 저전력, 입력 회로와의 호환성 그리고 신뢰성, 높은 양자 효율, 우수한 열 특성, 낮은 암전류, 긴 수명, 작은 크기, 낮은 제조 비용을 비교하여 검출기 소자의 성능을 평가한다. 이 중 성능평가에서 가장 중요시되는 몇 가지 매개변수가 다음과 같이 정의된다.

응답성(Responsivity)은 입사 복사 전력에 대한 반응으로 생성되는 감지기의 출력 신호(전압 혹은 전류)를 말하며, 노이즈 등가 전력(NEP: Noise Equivalent Power)은 데이터 신호의 속도 또는 변조 주파수, 작동 파장 및 유효 노이즈 대역폭에서 주어진 광학 검출기의 출력 신호 대 노이즈 비율의 통일성을 유도하는 검출기의 입사 전력이다. 따라서 NEP를 $[W/Hz^{1/2}]$ 로 정의한다. 응답성 측면에서는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$NEP = \frac{V_n}{R_v} = \frac{I_n}{R_i}$$

여기서 V_n 과 I_n 은 접압 및 전류 노이즈, R_v 와 R_i 는 전압 및 전류의 응답성이고 NEP의 단위는 와트(W)를 사용한다. NEP는 고정 기준 대역폭에 대한 측정값으로 표시되며 일반적으로 1Hz로 가정한다. 따라서 “단위 대역폭당 NEP”의 단위는 $[W/Hz^{1/2}]$ 로 표기한다[6].

초점면 배열(FPAs: Focal Plane Arrays) 방식의 경우 노이즈 등가 온도 차이(NEDT: Noise Equivalent Difference Temperature)를 성능 지표로 사용하며 이는 열 감도를 나타낸다. 신호대잡음비(Noise-to-Signal Ratio)가 1이 되기 위해 필요한 온도 차이로 정의되며 다음과 같이 수식으로 표현된다.

$$NEDT = \frac{V_n}{\Delta V / \Delta T}$$

여기서 ΔV 는 온도 차이 ΔT 에 대해 측정된 신호를 나타낸다. NEDT는 저주파 공간에서의 검출기 감도를 나타내며 NEDT 값이 낮을수록 성능이 우수한 열 감도를 의미한다.

대표적인 테라헤르츠 검출기 소자와 분류를 다음과 같이 소개한다.

1. 열형 검출기(Thermal Detector)

열형 검출기는 테라헤르츠파가 소자의 온도를 바꿀 때, 그 변화로 전기 저항, 분극, 부피와 같이 크기가 같은 물리적 변화를 측정하는 방식으로 광자형 검출기와 달리 특정 파장에 제한받지 않고 측정 가능한 특징이 있다.

가. 볼로미터(Bolometer)

볼로미터는 일반적으로 방사선에 의한 온도 상승으로 인한 저항 변화를 이용하는 검출기 그룹을 말하며 그림 3은 이러한 원리를 설명하는 예시이다. 볼로미터는 1878년 천체 관측용 탐지기를 고안하고 “볼로미터”라는 이름을 붙인 랭글리(Langley)의 공로로 인정받고 있다[7]. 볼로미터는 열 용량이 매우 작고 온도 계수(Temperature Coefficient)가 큰 물질로 구

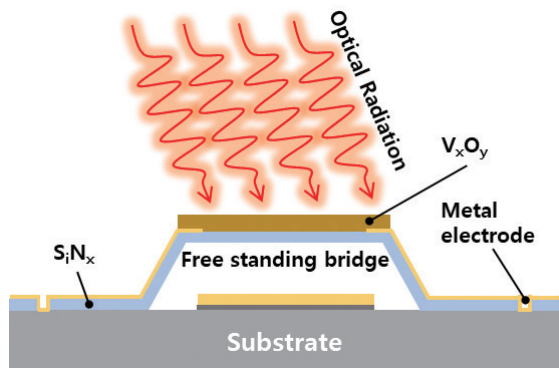
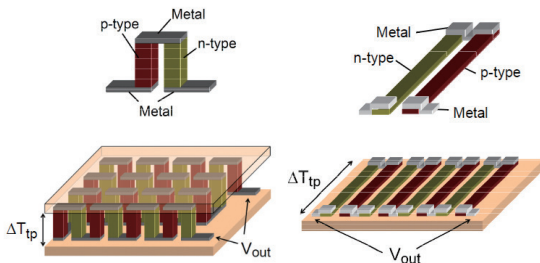


그림 3 바나듐 산화물을 이용한 볼로미터 검출기 픽셀의 개략적인 단면도

성된 저항 소자로, 흡수된 복사 에너지에 의해 큰 저항 변화를 유발한다[8]. 이러한 저항 변화는 광자형 검출기와 비교하여 변화 메커니즘이 유사하나, 볼로미터는 복사 에너지가 물질 내에서 열을 발생시켜 저항을 변화시키는 반면, 광전도체는 직접적인 광자(Photon)-전자(Electron) 상호작용(Interaction)을 기반으로 작동하므로 두 장치의 감지 메커니즘은 현저히 다르다. 현재, 마이크로볼로미터는 주로 이미징 처리 응용 분야에서 대형 어레이로 제작되어 사용되고 있다.

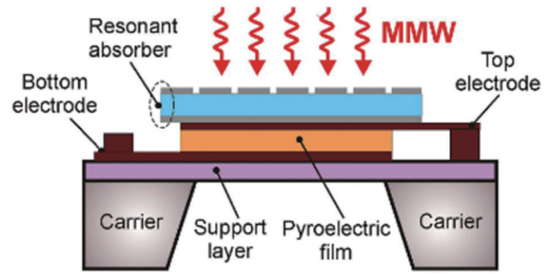
나. 써모파일(Thermopile)

써모파일은 19세기 초로 거슬러 올라가는 긴 역사를 가진 전통적인 장치 유형 중 하나이다. 이 장치는 적외선 및 THz 대역을 포함한 주변 스펙트럼의 방사선을 감지하는 데 사용되는 다양한 열 감지 애플리케이션에서 다양도로 활용된다[9]. 그림 4와 같이 써모파일은 여러 개의 열전대를 직렬로 연결한 구조로, 동작 메커니즘은 열전대의 원리에 기반을 두며, 제벡(Seebeck) 효과에 의해 금속 막대 사이에 온도 차이 ΔT 가 발생하면, 이에 비례하여 전압 차이 ΔV 가 유도된다[10]. 이는 금속 내부의 자유 전자들의 평균 자유 경로가 온도에 따라 변하기 때문



출처 Reprinted from V. Leonov et al., "Micromachined Polycrystalline Si Thermopiles in a T-shirt," Sens. Transducers J., vol. 127, no. 4, 2011, pp. 15-26.

그림 4 열전대(Thermocouple, 위)와 써모파일(아래)의 기본설계



출처 Reprinted from S. Kuznetsov et al., "Selective Pyroelectric Detection of Millimetre Waves Using Ultra-Thin Metasurface Absorbers," Sci. Rep. vol. 6, 2016. doi: 10.1038/srep21079

그림 5 초전 감지기의 단면도 예시

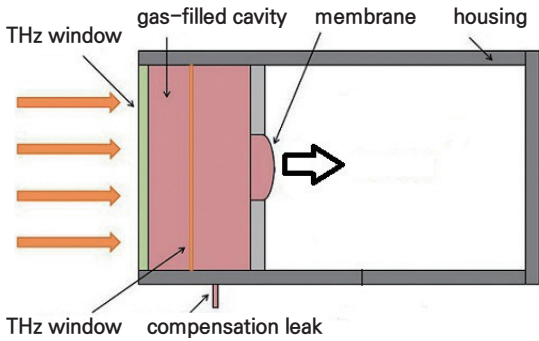
이다. 온도가 높은 영역에서는 평균 자유 경로가 길어 전자 밀도가 낮아지고, 이로 인해 온도 차이에 따라 전자 밀도의 불균형이 생기며, 전자 밀도가 낮은 영역에서 더 높은 전압이 형성된다.

써모파일은 볼로미터나 열전 감지기만큼 민감하지는 않지만, 신뢰할 수 있는 특성과 우수한 가성비로 인해 많은 애플리케이션에서 이를 대체할 수 있다.

다. 초전 감지기(Pyroelectric Detector)

초전성(Pyroelectricity)은 그림 5와 같이 시간에 따른 온도 변화에 의해 초전성 물질에서 전압 차이가 유도되는 현상이다. 이 현상은 고대 그리스 시기부터 발견되었다는 기록이 있으며, 19세기 초 브루스터(David Brewster)에 의해 "초전성"이라는 이름이 붙여졌다. 이후 비교적 현대적인 연구를 통해 관찰되었으며, 20세기 중반에 이르러 전자기 방사선 검출에 널리 활용되기 시작했다[11,12].

초전성의 메커니즘은 온도 변화에 따라 초전성 물질 내부의 영구 전기 쌍극자 모멘트가 순간적으로 정렬되면서 물질 표면에 전하가 유도되는 방식으로 설명된다[13]. 이로 인해 물질 전체에 일시적인 전위차가 발생한다. 그러나 온도가 안정화되면 내부 탈분극장이 형성되어, 정렬된 쌍극자 모멘트가 점차 완화되면서 전위차는 사라지게 된다. 이러



출처 Reprinted from L. Angrisani et al., "THz Measurement Systems," in New Trends and Developments in Metrology, Intech Open J., 2016. doi: 10.5772/63734

그림 6 골레이 셀의 구조

한 특성으로 인해 초전성 물질은 온도의 시간적 변화에 민감하게 반응하는 특성을 보인다. 또한, 온도 변화가 있을 때 열 평형이 이루어질 때까지 기다릴 필요가 없기 때문에 열 이완 시간 이하에서 빠른 반응을 보인다는 점에서 다른 열 감지기들과 차별화된다.

라. 골레이 셀(Golay Cell)

골레이 셀은 일반적으로 열전도율이 낮은 가스(주로 제논)로 채워진 밀폐된 용기로 구성되며, 그림 6과 같이 광자 신호에 의해 가열된 가스의 팽창이 유연한 막을 변형시키는 방식으로 작동한다[14]. 이 막의 변화는 광학 시스템, 정전용량식 센서, 또는 터널링 변위 변환기를 사용하여 감지된다. 가스의 적외선 흡수를 향상시키기 위해 캐비티 내부에는 추가적인 흡수기가 장착될 수 있으며, 반사벽을 사용하여 흡수를 극대화하는 방법도 활용된다. 흡수된 적외선 복사에 의한 가스의 온도 변화는 밀리켈빈(mK) 범위에 이른다.

골레이 셀의 성능은 흡수 필름과 검출기 가스 간의 열 교환에서 발생하는 온도 노이즈에 의해서만 제한되므로 매우 민감하지만 응답 시간은 밀리초(msec) 범위로 다소 긴 편이다.

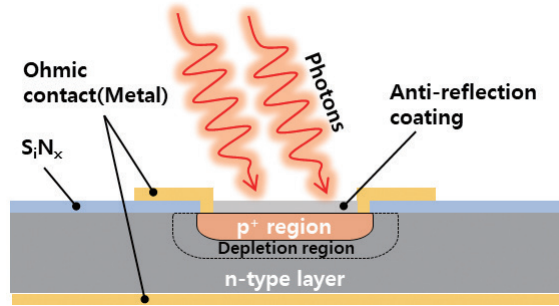


그림 7 광전효과를 이용하는 포토다이오드의 개략적인 단면도

2. 광자형 검출기(Photon Detector)

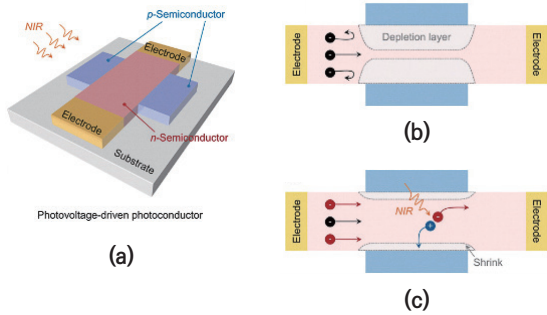
가. 광전도체(Photoconductor)

광전도체는 광 방사선에 민감한 포토레지스터(Photoresistor)로, 그림 7과 같이 입사된 방사선에 의해 반도체 내부에서 전자-정공 쌍이 생성되는 현상을 기반으로 작동한다[15]. 고유 광전도체(Intrinsic Photoconductor)는 반도체의 밴드갭을 가로질러 충분한 에너지를 가진 광자가 흡수되어 직접 전자-정공 쌍을 생성하며, 이때 스펙트럼 응답은 주로 반도체의 밴드갭 에너지가 결정적인 역할을 한다. 반면, 외인성 광전도체(Extrinsic Photoconductor)는 반도체 내 불순물의 이온화를 통해 작동하며, 이 경우 단일 캐리어 유형(전자 혹은 정공)만 활성화된다. 외인성 스펙트럼 응답은 불순물 이온화 에너지에 의해 결정되며, 이는 고유 광전도체와 달리 보다 낮은 에너지의 광자를 활용할 수 있다.

이와 같은 특성으로 인해 고유 및 외인성 광전도체는 다양한 파장 범위에서 광학적 검출을 가능하게 하며, 각 응용 분야에 따라 선택적으로 사용된다.

나. 하이브리드 광전도체(Hybrid Photoconductor)

최근 광전도체 소자의 성능을 향상시키기 위해 이득-응답 속도 트레이드오프를 해결하는 다양한 설계 방식이 제안되었다. 그 중 하나가 그림 8과 같



출처 Reprinted from F. Han et al., "Photovoltage-Driven Photoconductor Based on Horizontal p-n-p Junction," Nano Materials, vol. 14, 2024. doi: 10.3390/nano14181483

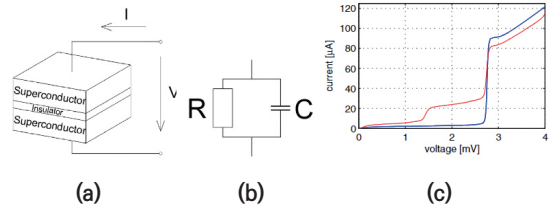
그림 8 하이브리드 광전도체의 구조

은 계면 게이팅(Interface Gating)을 이용한 방식으로, p-n-p 접합을 기반으로 암전류를 효과적으로 억제 하면서 높은 응답성과 빠른 응답 속도를 동시에 구현한 광전도체이다[16]. 이와 같은 방식은 광전압을 통해 공핍층을 조절하여 성능을 향상시키며, 기존 광전도체 대비 온-오프 비율이 비약적으로 증가한다. 또한, 근적외선(NIR) 영역에서 게르마늄을 광 흡수체로 사용해 효율적인 광 검출을 실현했다.

3. 정류형 검출기

가. 쇼트키 배리어 다이오드(SBD)

쇼트키 배리어 다이오드(SBD: Schottky Barrier Diode)는 기본적으로 금속 접합 다이오드를 말한다. 1874년 브라운(F. Braun)이 금속-결정 접합의 정류 동작을 처음으로 보고했으며[17], 이는 1930년대에야 탄생한 p-n 다이오드보다 앞선 것으로 금속팁이 결정에 점 접촉하는 간단한 구조였기 때문이다. 그 단순함에도 불구하고 SBD는 고주파 애플리케이션에 유용한 특성을 제공하고 있으며, 대부분의 캐리어 디바이스의 주요 특징인 짧은 정선 충전/재충전 시간(Charge/Recharge Time)으로 인해 p-n 접합 다



출처 Reprinted with permission from P. Kern et al., "Advanced Millimeter Wave SIS Mixers," EAS Publications series, vol. 37, Astrophysics Detector Workshop 2008, 2009, pp. 49-62.

그림 9 SIS 터널 접합부: (a) 개략도, (b) 등가 회로, (c) LO 주입이 없는(파란색) 경우와 있는(빨간색) 경우의 I-V 곡선

이오드보다 빠른 스위칭 동작을 보여준다. 이와 더불어 SBD의 비선형적 동작을 활용하는 다양한 고주파 애플리케이션에 활용되고 있으며 흥미롭게도 SBD는 그림 2에서 제시한 모식도와 같이, 직접 검출과 헤테로다인 검출에 모두 사용될 수 있는 범용성을 갖는다.

나. 초전도체-절연체-초전도체(SIS) 믹서

SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor) 구조는 그림 9와 같이 두 초전도체 사이에 얇은 절연체(10~20 Å)가 위치한 형태로, 마이크로파 및 밀리미터파 검출에 매우 민감한 비선형 소자이다[20]. 1970년대 후반 SIS 기반 밀리미터파 헤테로다인 검출이 구현되면서 전파 천문학에 널리 사용되었으며[18,19], ALMA와 같은 전파 망원경에서 84~950GHz 대역의 관측에 사용된다. SIS 믹서는 높은 감도와 낮은 노이즈 특성을 제공하여, 특히 1THz 이하 대역에서 탁월한 성능을 발휘한다. 초전도체는 임계온도 이하에서 전자가 쿠퍼 쌍을 형성해 전기 저항이 사라지며, 이 쌍은 외부 에너지를 받으면 개별 준입자로 분해된다. 이러한 특성 덕분에 SIS 믹서는 고감도와 저잡음의 장점을 동시에 제공한다.

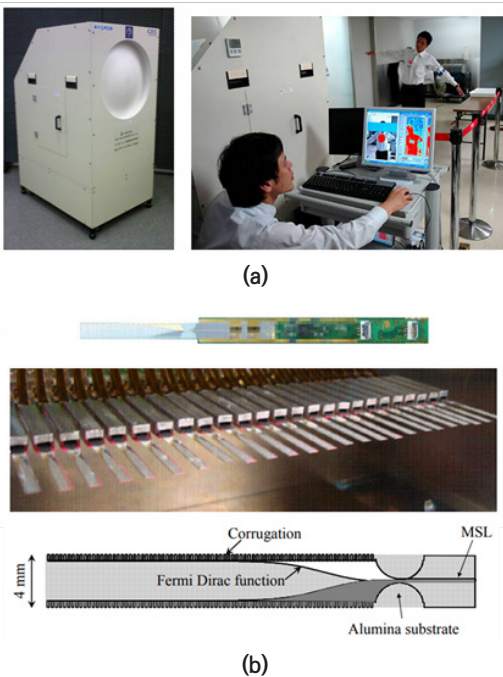
IV. 테라헤르츠 이미징 시스템

액체, 플라스틱, 분말과 같은 유전체 물질로 만든 수제 폭탄을 이용한 테러와 같은 파괴적 활동이 발생하고 있으며, 이러한 물질을 옷 속에 숨기는 것이 비교적 쉬워 항공기, 선박, 기차 등의 안전을 유지하기 위해 은닉된 물체를 탐지할 수 있는 시스템 개발이 절실히 요구되고 있다. 전자기 스펙트럼 중 밀리미터파 및 테라헤르츠파(mmW/THz파)는 옷 속에 숨겨진 물체를 이미지화하는 데 적합한 주파수 대역으로, 적외선(IR) 대역에 비해 공간 해상도는 낮지만, 더 높은 주파수 대역에 비해 옷을 통한 투과율이 높고 저렴한 저잡음 증폭기(LNA)를 사용해 비용

면에서도 이점이 있다. 이러한 특성을 활용한 수동 mmW/THz파 영상 기법은 비침습적이고 비접촉 방식으로 옷 속에 숨겨진 물체를 이미지화할 수 있으며, 자연 물질이 항상 mmW/THz파 범위에서 열 잡음을 방출하는 특성을 활용해 물체의 방사율과 물리적 온도에 따른 잡음 전력 분포로 이미지 생성이 가능하다.

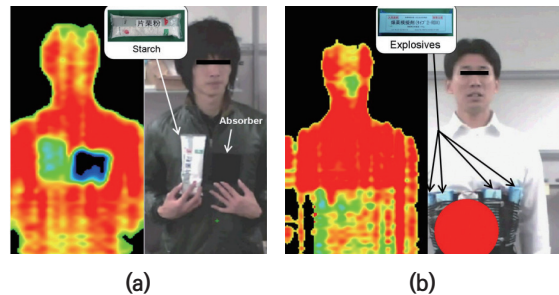
1. 인체 위험 물질 검출을 위한 mmW/THz 파 영상 시스템

그림 10은 보안을 목적으로 개발된 77GHz 수동 밀리미터파 영상 카메라(PMMW)로, 공항 보안 검사에서 인원 흐름을 방해하지 않고 옷 속에 숨겨진 물체를 탐지할 수 있다. 이 카메라는 25개의 요소로 구성된 1차원 영상 센서 배열과 플래핑 리플렉터를 사용하여 비디오 속도의 영상을 구현하였다. 이 영상 센서는 안테나, 슬롯 라인에서 마이크로스트립 라인으로의 전환, 매칭 회로를 포함한 LNA, 쇼트키 배리어 다이오드(SBD)를 사용한 검출 회로 및 DC 회로로 구성되며, 센서 배열의 간격은 8mm($2\lambda_0$)이다. 흑체 복사 측정을 통해 1.2K의 열 민감도를 얻었



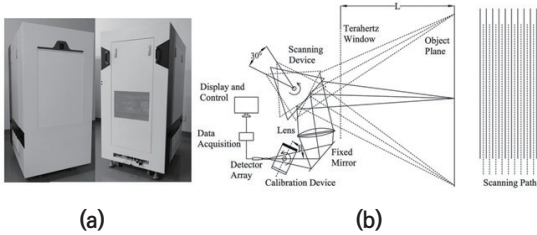
출처 Reprinted with permission from H. Sato et al., "Passive Millimeter-wave Imaging for Security and Safety Applications," in SPIE Defense, Security, and Sensing, Orlando, Florida, United States, 2010. <https://doi.org/10.1117/12.849491>

그림 10 (a) 77GHz 이미징 카메라의 프로토타입과 일본 나리타 국제공항에서의 시험 장면, (b) 77GHz PMMW 이미징 센서와 25개 요소로 구성된 1차원 이미징 센서 배열, 그리고 77GHz 대역을 위한 안티포달 페르미 안테나(APFA) 구조



출처 Reprinted with permission from H. Sato et al., "Passive Millimeter-wave Imaging for Security and Safety Applications," in SPIE Defense, Security, and Sensing, Orlando, Florida, United States, 2010. <https://doi.org/10.1117/12.849491>

그림 11 옷에 흡수체와 전분(a)과 폭발물질(b)을 지닌 인체의 77GHz 밀리미터파 이미지

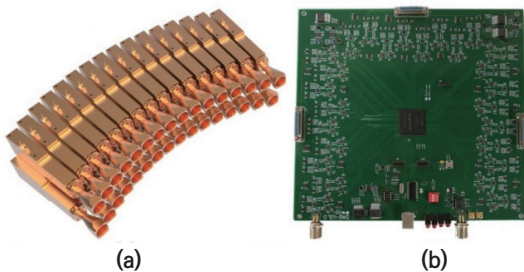


출처 Reprinted with permission from H. Feng et al., "A Passive Video-Rate Terahertz Human Body Imager with Real-Time Calibration for Security Applications," Appl. Phys. B, vol. 126, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07496-3>

그림 12 W-band 이미징 시스템: (a) 프로토타입, (b) 구성도

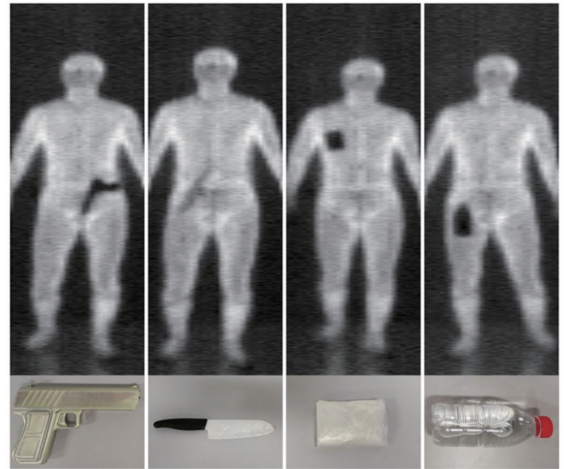
으며, 개발된 카메라로 20mm의 높은 공간 해상도를 달성하였다. 그림 11은 옷 속에 전분, 흡수체, 폭발물을 지닌 인체 이미지를 보여주며, 개발된 프로토타입 시스템을 이용해 위험 물질의 탐지 가능성을 확인한 장면이다[21].

그림 12는 W-Band(75~110GHz) 이미징 시스템의 프로토타입 및 구성도를 나타낸다. 인체에서 방출된 테라헤르츠파는 테프론으로 만든 테라헤르츠 창을 통해 이미징 장치로 전달되고, 스캐닝 모듈에서 반사된 후, 렌즈를 통해 검출기 배열에 초점을 맞춰 검출된다. 이때, 검출기 배열 앞에는 검출기를 실시간으로 보정하기 위한 보정 모듈이 배치되어 있어, 실시간으로 테라헤르츠 이미징 과정을 방해하지 않



출처 Reprinted with permission from H. Feng et al., "A Passive Video-Rate Terahertz Human Body Imager with Real-Time Calibration for Security Applications," Appl. Phys. B, vol. 126, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07496-3>

그림 13 (a) 검출 어레이, (b) 데이터 수집 장치



출처 Reprinted with permission from H. Feng et al., "A Passive Video-Rate Terahertz Human Body Imager with Real-Time Calibration for Security Applications," Appl. Phys. B, vol. 126, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07496-3>

그림 14 옷 아래에 여러 샘플을 숨긴 사람의 이미지

고 보정이 가능하다. 이 시스템은 스캐닝 모듈, 준광학 렌즈, 보정 모듈, 1차원 테라헤르츠 검출기 배열로 구성되어 있으며, 1.5m 거리에서 서 있는 인체의 전체 이미지를 해상도 1.5cm, 초당 10프레임 속도로 얻을 수 있으며, 금속, 세라믹, 분말, 액체와 같은 위험 물품을 탐지할 수 있다[22].

그림 13은 사용된 핵심 테라헤르츠 검출기로 상용 부품인 W-대역 방사계(Farran Technology Ltd., PMMW-10-0001)를 사용했으며, 이는 50dB의 이득과 3.5dB의 잡음 지수를 갖는다. 방사계는 두 개의 GaAs MMIC 증폭기, 무전압 쇼트키 검출기, 계측 증폭기로 구성되며, 입력된 테라헤르츠 방사선 전력에 비례하는 출력 전압을 생성한다.

그림 14는 장난감 금속 총, 세라믹 칼, 밀가루 봉지, 물병 등과 같은 일반적인 위험 물품을 성공적으로 탐지했음을 시연한 이미지로, 이 시스템은 패시브 방식으로 원거리에서 안전하게 숨겨진 물체를 탐지할 수 있어 공공장소의 보안 검사에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론

본고에서는 현재까지 THz 기술의 다양한 소자와 획기적인 발전, 그리고 그 응용에 대해 기술하였다. THz 대역에서의 검출기는 직접 검출기와 헤테로다인 검출기 방식으로 구분되며, 각각의 방식은 감도, 응답 속도, 구조적 장점에 따라 특정 응용에 적합하게 설계되었다. 특히, SIS(초전도체-절연체-초전도체) 믹서와 같은 고감도 소자와 광전도체 기반 검출기는 전파 천문학 및 산업 모니터링 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 또한, 최근 하이브리드 광전도체 설계와 같은 혁신적인 기술은 암전류 억제와 높은 응답성을 동시에 구현함으로써 성능을 한층 더 향상시키고 있다. 이러한 기술 발전은 THz 대역의 “THz gap”을 채우는 데 기여하며, 앞으로도 다양한 상업 및 과학적 응용에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

용어해설

Terahertz(THz) 갭 주파수 범위가 0.1~10THz(1THz = 10¹²Hz)인 대역으로, 신호 생성 및 감지 기술의 부재로 인한 미개척 영역이었으나, 최근 이미징, 통신, 보안, 생체 분석 등 다양한 응용 분야에서 큰 잠재력을 보이고 있음

Terahertz(THz) 파 주파수 범위가 0.1~10THz인 전자기파로, 전자기 스펙트럼상 적외선과 마이크로파 사이에 위치하며, 비금속 및 비분극성 유전체를 잘 투과하는 특성을 가짐

포토믹서(Photomixer) 입사광의 저주파 envelope 변화에 비례하는 전자기파를 방출하여 광을 THz파로 변환

쇼트키 배리어 다이오드(Schottky Barrier Diode) 정류작용을 통해 별도의 분기광 없이 자체적으로 THz파의 세기를 측정하는 다이오드

약어 정리

ALMA	Atacama Large Millimeter Array
FPA	Focal plane arrays
IF	Intermediate Frequency
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator

NEDT	Noise Equivalent Difference Temperature
NEP	Noise Equivalent Power
PMMW	Passive MM-Wave
RF	Radio Frequency
SBD	Schottky Barrier Diode
SIS	Superconductor-Insulator-Superconductor

참고문헌

- [1] D. Sengupta et al., "Centennial of the Semiconductor Diode Detector," Proc. IEEE, vol. 86, no. 1, 1998, pp. 235-243.
- [2] Bower et al., "ALMA Observations of the Terahertz Spectrum of Sagittarius A*," Astrophys. J. Lett., vol. 881, 2019. doi: 10.3847/2041-8213/ab3397
- [3] T. Otsuji et al., "Trends in the Research of Modern Terahertz Detectors: Plasmon Detectors," IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 5, no. 6, 2015, pp. 1110-1120.
- [4] P.H. Siegel, "Terahertz Technology," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no. 3, 2002, pp. 910-928.
- [5] R.A. Lewis, "A Review of Terahertz Detectors," J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 52, 2019, p. 433001.
- [6] P.L. Richards, "Bolometers for infrared and millimeter waves," J. Appl. Phys. vol. 76, 1994, pp. 1-24.
- [7] W.S. Boyle et al., "Performance Characteristics of a New Low-Temperature Bolometer," JOSAS, vol. 49, no. 1, 1959, pp. 66-69.
- [8] R.T. Rajendra Kumar et al., "Room Temperature Deposited Vanadium Oxide Thin Films For Uncooled Infrared Detectors," Mater. Res. Bulletin, vol. 38, no. 7, 2003, pp. 1235-1240.
- [9] I. Kasalynas et al., "Design and Performance of a Room-Temperature Terahertz Detection Array for Real-Time Imaging," IEEE JSTQE, vol. 14, no. 2, 2008, pp. 363-369.
- [10] V. Leonov et al., "Micromachined Polycrystalline Si Thermopiles in a T-shirt," Sens. Transducers, vol. 127, no. 4, 2011, pp. 15-26.
- [11] A.G. Chynoweth, "Dynamic Method for Measuring the Pyroelectric Effect with Special Reference to Barium Titanate," J. Appl. Phys., vol. 27, 1956, pp. 78-84.
- [12] J. Cooper, "A fast-response pyroelectric thermal detector," J. Sci. Instrum., vol. 39, no. 9, 1962, pp. 467-472.

- [13] S.A. Kuznetsov et al., "Selective Pyroelectric Detection of Millimetre Waves Using Ultra-Thin Metasurface Absorbers," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 21079, 2016, pp. 1–11.
- [14] L. Cocco, "New Trends and Developments in Metrology," *InTech*, 2016. doi: 10.5772/59388
- [15] A. Chetia, "A Brief Review on Photodetector Performance Based on Zero Dimensional and Two Dimensional Materials and Their Hybrid Structures," *Mater. Today Commun.*, vol. 30, no. 103224, 2022, pp. 1–13.
- [16] F. Han et al., "Photovoltage-Driven Photoconductor Based on Horizontal p-n-p Junction," *Nanomaterials*, vol. 14, no. 1483, 2024.
- [17] F. Braun, "On the Conduction of Current Through Sulfur Metal," *Pogg. Annalen*, vol. 154, 1874, pp. 556–563. https://ieeemilestones.ethw.org/w/images/0/07/Braun_unipolar_translated_1874.pdf
- [18] P.L. Richards et al., "Quasiparticle Heterodyne Mixing in SIS Tunnel Junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, no. 5, 1979, pp. 345–347.
- [19] G.J. Dolan et al., "Low-Noise 115-GHz Mixing in Superconducting Oxide-Barrier Tunnel Junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, no. 5, 1979, pp. 347–349.
- [20] P. Kern et al., "Advanced Millimeter Wave SIS Mixers," *EAS Publications Series(Astrophysics Detector Workshop 2008)*, vol. 37, 2009, pp. 49–62.
- [21] H. Sato et al., "Passive Millimeter-wave Imaging for Security and Safety Applications," in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, Orlando, FL, USA, 2010. doi: 10.1117/12.849491
- [22] H. Feng et al., "A Passive Video-Rate Terahertz Human Body Imager with Real-Time Calibration for Security Applications," *Appl. Phys. B*, vol. 126, 2020. doi: 10.1007/s00340-020-07496-3