

광대역 테라헤르츠 검출 소자 기술 동향

Trends in Broadband Terahertz Detector Technology

신준환 (J.H. Shin, jh.shin@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
최다혜 (D.H. Choi, choi.dh@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 박사후연구원
이의수 (E.S. Lee, euisu@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
문기원 (K.W. Moon, kwmoon@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원
박동우 (D.W. Park, dwpark@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
주경일 (K.I. Joo, kijoo@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 박사후연구원
김무건 (M.G. Kim, mugeonkim@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 연구원
최경선 (K.S. Choi, miso5383@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 기술실무원
이일민 (I.-M. Lee, ilminlee@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원/실장
박경현 (K.H. Park, khp@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원/본부장

ABSTRACT

The terahertz (THz) region lies in between the millimeter and infrared spectral bands. A THz wave has the characteristics of non-invasiveness and non-ionization due to low photon energies, while having high penetrability in dielectrics. In addition, since the resonance frequencies of various molecules are included in the THz band, research on the application of spectral analysis and non-destructive testing has been widely studied. Towards this end, the research and development of THz detectors has become increasingly important in order to assess their applications in different areas such as astronomy, security, industrial non-destructive evaluations, biological applications, and wireless communications. In this report, we summarize the operating principles, characteristics, and utilization of various broadband technologies in THz detection devices. Further, we introduce the development status of our Schottky barrier diode technology as one of the broadband THz detectors that can be easily adopted as direct detectors in many fields of applications.

KEYWORDS Terahertz, Broadband THz detectors, Schottky barrier diode

1. 서론

테라헤르츠파는 적외선 영역과 마이크로파 사

이에 위치하는 대략 0.1~10THz 대역의 전자기파를 의미한다. 가시광-적외선과 달리, 세라믹 플라스틱 같은 유전체에 대한 높은 투과성을 가지고 있

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2020.J.350406>

* 이 연구는 ETRI의 연구운영비지원사업(20ZB1130, 20ZH1121), 산업통상자원부와 벤처기업부의 WC300사업(S2524372)의 일환으로 수행되었음.



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2020 한국전자통신연구원

으며 수 meV의 낮은 광자 에너지로 인하여 비파괴, 비이온화 특성을 가진다. 또한 다양한 분자의 흡수 스펙트럼을 포함하고 있어 물질의 분광 및 이미징 분야 응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

19세기 후반 J. C. Bose에 의해 처음 밀리미터파가 검출된 이래[1], 테라헤르츠파 대역에 관한 본격적인 연구는 1940년대 성간물질의 스펙트럼 관측을 위해 시작되었으며, 2019년 세계 최초로 블랙홀을 관측에 중요한 역할을 한, 세계 최대 전파망원경인 ALMA(Atacama Large Millimeter Array)에 이르기까지 천문, 우주 관측을 위한 분광 및 이미징 기술의 발달과 함께 해왔다. 1960년대 이후부터 볼로미터와 Golay cell과 같은 고감도의 새로운 방식의 검출기가 등장하였고[2,3], 1970~80년대를 거쳐 반도체 소자 기술이 비약적으로 발전하면서 양자 구조 기반 다이오드, 초전도 터널접합을 이용한 검출소자와 더불어 상온에서의 검출이 가능한 쇼트키 장벽 다이오드, 광전도 안테나가 개발되었고 [4], 1990년대 이후에는 트랜지스터 기반 테라헤르츠파 검출 소자가 제안되었다[5].

본 고에서는 이와 같이 다양한 광대역 테라헤르츠파 검출 소자 기술에 대한 동작 원리와 특징 및 활용에 대해 정리하고, 본 연구실에서 개발 중인 광대역 테라헤르츠파 검출기 중 하나인 광대역 안테나 집적형 쇼트키 장벽 다이오드의 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

II. 테라헤르츠파 검출 방식

테라헤르츠파의 검출 소자는 검출 방식에 따라 크게 직접 검출 방식과 헤테로다인 검출 방식으로 구분할 수 있다(그림 1).

직접 검출 방식은 가장 단순화된 방식으로 테라

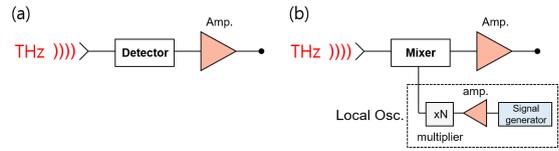


그림 1 테라헤르츠파 검출 방식 (a) 직접 검출 방식
(b) 헤테로다인 검출 방식

헤르츠파에 의해 나타나는 흡수체의 물리량 변화를 측정함으로써 신호의 진폭 정보를 검출하는 방식이다. 광대역 테라헤르츠파 검출에 적합하며 검출원리에 따라 광자(Photon)형, 열(Thermal)형, 정류(Rectification)형 소자 등으로 나뉜다. 헤테로다인 검출 방식에 비해 주파수 해상도($\lambda/\Delta\lambda\sim 10^3$)와 응답속도가 상대적으로 느림에도 불구하고 구조가 단순하며 대면적 배열화에 유리하므로 분광 및 이미징 시스템 구성에 활용되고 있다.

헤테로다인 검출 방식의 경우 입사하는 테라헤르츠파를 국부발진기의 신호를 이용하여 믹서를 통해 두 신호의 주파수 차이에 해당하는 중간 주파수(IF)를 검출하는 방식으로 진폭과 위상 정보를 동시에 검출하는 방식이다. 직접 검출 방식에 비해 감도 및 잡음특성이 우수하고 높은 주파수 해상도($\lambda/\Delta\lambda\sim 10^6$)와 빠른 응답속도 특성을 이용한 진폭, 주파수 변조에 유리하다. 그러나 국부발진기의 대역폭과 출력에 의해 전체 시스템의 성능이 결정되므로 검출 대역이 한정적이고 해당 요소의 추가에 따른 시스템의 구성이 복잡해진다.

한편, 광전도 안테나(Photoconductive Antenna) 또는 포토믹서(Photomixer)를 이용하는 호모다인(Homodyne) 방식은 테라헤르츠파 생성을 위한 펄스 레이저 펄스 또는 동일 광원에서 분기된 두 개의 서로 다른 파장을 갖는 비팅(Beat)광을 송수신기로 각각 입사시켜 신호의 진폭과 위상을 검출하는 방식이다. 동일광원의 분기된 광을 이용하는 점

에서 분기광이 필요없는 일반적인 직접 검출 방식과는 구별되며, 송수신단 간 간섭성으로 인해 신호 대 잡음비가 우수한 장점이 있다. 이러한 특징을 이용하여 반도체 기반 테라헤르츠 포토믹서와 레이저 비팅광원을 이용하는 경우 저가격, 소형화된 고속 시스템 구성이 가능하다.

III. 광대역 테라헤르츠 검출기

1. 광전도 안테나 및 포토믹서

대표적인 테라헤르츠파 검출기로서 III-V족 반도체 위에 광대역 안테나가 제작되어 있는 구조로서, 광전도층 내부의 전자-정공쌍 생성을 위해 펄스 레이저를 사용하는 광전도 안테나와 비팅광원을 사용하는 포토믹서로 구분하나 기본적인 소자 구조와 물성은 거의 유사하다. 생성된 전자-정공쌍이 입사되는 테라헤르츠 파의 전계에 비례하여 가속되어 광전류 형태로 검출된다. 테라헤르츠 대역의 신호 검출을 위해서는 소자의 고속 동작을 위해 높은 이동도와 1ps 이하의 빠른 전하수명 시간을 갖는 저온 성장된 GaAs, InGaAs 등이 사용된다 [6,8].

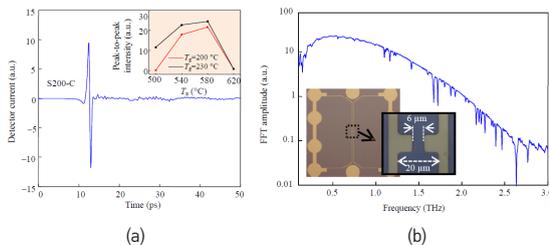
본 연구실에서도 MBE(Molecular Beam Epitaxy)를 이용하여 저온 성장된 GaAs 박막을 1ps 이하의 전

하수명 시간을 갖도록 최적화된 열처리 조건을 확보하여 테라헤르츠 광전도 안테나/포토믹서를 제작하였으며, 나노 전극을 이용한 포토믹서를 개발한 바 있다. 그림 2(a)에 본 연구실의 포토믹서에서 검출된 THz 펄스파형과 열처리 조건에 따른 검출된 파형의 크기를 나타내었으며, 발생된 THz 펄스파는 그림 2(b)의 주파수 스펙트럼을 통해 높은 신호 대 잡음비로 2.5THz의 대역폭을 가지는 것을 확인하였다[7].

2. 광자형 검출기

광자형 검출기(Photon detector)는 물질의 광전도(Photoconductive) 현상을 이용한 것으로, 흡수 물질의 전자를 전도대(Conduction band)로 광여기(Photo-excitation)시킴으로써 발생하는 전기적 신호를 이용하는 소자이므로 흡수체는 반도체와 같은 에너지 갭이 있는 물질로 구성된다. 테라헤르츠파의 광자 에너지는 수 meV(4.1meV@1THz)에 불과하여 상온에서의 열에너지로 인해 사용이 불가하므로 대부분 4K 이하 저온냉각 장비를 수반한다.

따라서 저온에서 검출이 이루어지므로 낮은 잡음 등가 전력(NEP) $10^{-17} \sim 10^{-15} \text{W/Hz}^{0.5}$ 과 빠른 응답속도(10^{-9} s 이하)의 장점이 있어 배열 형태로 우주, 천문관측 분야의 분광, 이미징에 활용되고 있



출처 Reprinted from K. Moon et al., "Generation and Detection of Terahertz Waves using Low-Temperature-Grown GaAs with an Annealing Process," ETRI J., vol. 36, 2014, pp. 159-162.

그림 2 (a) 검출된 시간영역 THz 파형 (b) 주파수 스펙트럼

표 1 불순물 반도체 THz 검출기의 성능

Detector type	Operation freq.(THz)	NEP (W/Hz ^{0.5})	Remarks
Ge:Ga, unstressed	2.30~3.75	2.1×10^{-17}	25×16 array
Ge:Ga stressed	1.30~2.30	8.9×10^{-18}	-
Ge:B, BIB	1.36	5.23×10^{-15}	T<1.2K
Si:Sb BIB	5~60	-	1024 ² array

다[9]. 그러나 $\sim 10\text{THz}$ 이하의 주파수에 해당하는 에너지 갭을 갖는 진성(Intrinsic) 반도체는 조성의 제어가 쉽지 않은 HgCdTe, PbSnTe 계열을 제외하면 거의 존재하지 않으므로 전자의 광여기를 위한 여러 가지 방식이 개발되었는데, 도핑된 불순물의 이온화 에너지를 이용하는 방법, 양자우물, 양자점을 이용하는 방법이 있으며, 초전도 접합에서 생성되는 터널링 전류를 이용하는 방식 등이 있다 [4, 15, 19, 21, 35].

가. 불순물(Extrinsic) 반도체 검출기

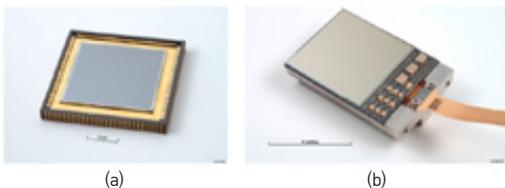
앞서 언급했듯이, 테라헤르츠 대역을 감지하기 위해서 반도체의 밴드갭을 $\sim \text{meV}$ 수준으로 줄이는 것은 한계가 있다. 따라서 저온에서 Ge, Si, GaAs와 같은 반도체에 억셉터(B, In, Ga, Be), 도너(Si, Sb)와 같은 불순물 도핑을 통해 형성된 얇은 에너지 준위(Shallow level)와 전도대 혹은 가전자대 사이의 에너지 갭의 전이를 이용하여 $\sim 10\text{meV}$ 내외의 파장을 검출할 수 있으며, stressed Ge:Ga와 같이 특정 결정 방향으로 외부 압력(Stress)을 가하여 이온화 에너지를 줄이는 방법이 개발되었다[10, 11]. 또한, 1979년에 개발된 BIB(Blocked-Impurity Band) 검출기는 도핑되지 않은 차단층(Blocking Layer)을 고농도로 도핑된 광 흡수층과 전극 사이에 형성함

으로써 흡수계수 및 파장, 광전도 이득의 광학적 특성과 암전류 및 잡음특성의 전기적 특성을 향상시켜 현재 Si:As를 흡수체로 사용한 $1,024 \times 1,024$ 픽셀 배열형 BIB 검출기(그림 3(a))가 유럽남방천문대(ESO)의 지상 관측용 망원경에, $2,048 \times 2,048$ 픽셀 배열형 BIB 검출기가 일본항공우주국(JAXA)에서 운용 중인 Space telescope JAXA에 탑재되어 사용되고 있다(그림 3(b))[12].

나. 양자우물 및 양자점 검출기

III-V족(Ga(As,N)/(Al,Ga)As/N) 또는 II-VI족(HgTe/CdTe) 반도체를 이용한 양자우물(Quantum Well) 구조 역시 저온 동작이 필요하며 2THz 이상 대역에서 검출이 가능하다. 서브밴드 간 전이에 의해 검출되므로 에피 구조에 따라 검출 대역을 선택적으로 조절할 수 있다. 여기된 전자는 매우 짧은 수명 시간에 의해 1ns 이하의 응답속도를 가지며 양자점(Quantum Dot)과 결합된 구조의 경우에는 1ps 이하로 낮출 수 있음이 보고되었다[13]. 이러한 특성은 헤테로다인 검출, 통신 및 이미징 분야에 활용할 수 있다[14, 15].

특히, 1990년대 mW급 출력의 소형화된 THz 양자 폭포 레이저가 개발되면서 배열형 검출기 기반의 THz 이미징 시스템과 self-mixing을 이용한 호모다인 검출 시스템 개발을 위한 고속, 고감도의 양자점 구조를 활용하는 테라헤르츠 검출기가 2000년대 초반까지 활발히 연구되었으며, 0.5THz 에서 $\sim 10^{-22}\text{W/Hz}^{0.5}$ 등가 잡음 전력을 가지는 고감도 양자점 구조 기반 단전자 트랜지스터가 보고된 바 있다[16].



(a)

(b)

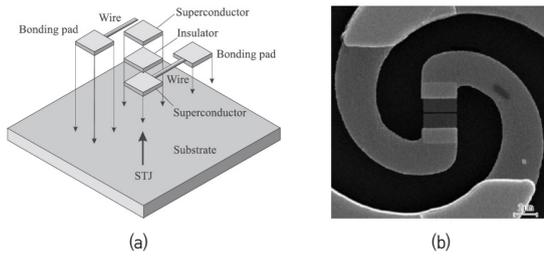
출처 Reprinted from A. Rogalski, "Semiconductor Detectors and Focal Plane Arrays for Far-Infrared Imaging," Opto-Electron. Rev., vol. 21, no. 4, 2013, pp. 406-426.

그림 3 초점면 배열형 BIB 검출기

(a) Aquarius-1k($1,024 \times 1,024$) (b) Phenix($2,048 \times 2,048$)

다. 초전도 검출기

초전도체 기반 검출기는 두 초전도체 사이에 $\sim 2\text{nm}$ 두께의 얇은 절연층이 형성된 샌드위치 구



출처 Reprinted from F. Sizov, "THz radiation sensors,"*Opto-Electron. Rev.*, Vol. 18, no.1, 2013, pp.10-36.

그림 4 광자형 초전도 검출기 (a) 기본 구조
(b) NbN 기반 SIS 믹서

조(SIS: Superconductor-Insulator-Superconductor)를 가진다. 초전도체 내 쿠퍼쌍의 구속 에너지(Binding Energy) 이상의 광자 에너지를 갖는 전자기파에 의해 생성되는 준입자(Quasi-particle)의 터널링 전류에 의해 검출되는 방식이다. 쿠퍼쌍(Cooper Pair)의 구속 에너지의 크기는 반도체 에너지 갭의 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 에 불과하므로 테라헤르츠파의 검출에 적합하며, 0.1K 이하의 극저온에서 광대역 안테나를 집적한 Al/AlO_x/Al 소자의 경우 0.6THz에서 $NEP \sim 10^{-20} \text{W/Hz}^{0.5}$ 수준의 매우 우수한 잡음을 보였다[17]. 헤테로다인 믹서로 제작하는 경우 테라헤르츠파 검출기 중 가장 우수한 잡음 특성($\sim 2hf/k_B$)을 가진다. 또한, 수 μW 수준의 낮은 국부발진기의 구동 전력, 빠른 응답속도 특성으로 고성능의 믹서 제작이 가능하다[9]. 또 다른 형태의 수동 이미지 검출 방식에 사용되는 KID(Kinetic Inductance Detector)기술은 Al, Nb, TiN와 같은 초전도체 기반 LC공진회로로 구성된 소자로서 공진 주파수의 변화를 이용한 고감도 검출($NEP \sim 3 \times 10^{19} \text{W/Hz}^{0.5}$)이 가능하며, 공진 회로의 품질인자(Q-factor)에 따라 검출 성능이 달라진다. 최근 해당 기술을 이용하여 안테나가 결합된 31^2 개의 픽셀로 구성된 배열을 이용하여 0.85THz에서 10 μW 급 광원에 대한 이미징

이 가능성이 보고되었다[18].

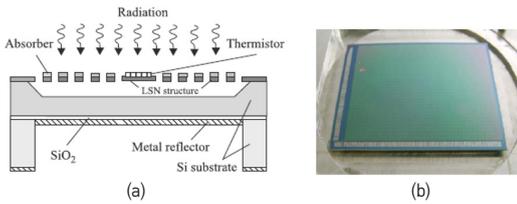
2018년 12월 영국 카디프 공항에서는 이러한 초전도 검출소자의 고감도 특성을 적용하여 Se-questim에서 개발된 배열형 LEKID(Lumped Element Kinetic Detector)기반 수동 검출식 THz 카메라를 이용하여 승객을 대상으로 실시간(2fps) 보안 검색을 성공적으로 시연한 바 있다[34].

3. 열형 검출기

열형 검출기(Thermal Detector)는 테라헤르츠파에 의해 소자 내 검출부의 온도 변화에 따른 전기 저항, 분극, 부피와 같은 물리량의 변화를 통해 검출하는 방식이므로, 물질의 에너지 밴드갭에 의해 제한되는 광자형 검출 방식과 달리 파장에 무관하게 측정이 가능한 장점이 있다. 이 절에서는 다양한 종류의 열형 검출기술 중 대표적인 볼로미터(Bolometer), 초전형(Pyroelectric), Golay cell을 이용한 기술의 기본 동작 원리 및 연구 동향에 대해 살펴보고 각 검출기별 주요 특성을 비교하였다.

가. 볼로미터 검출기

볼로미터의 경우, 입사파에 의한 흡수체의 격자 또는 전자온도의 변화에 따라 나타나는 전기 저항(전기전도도)의 변화를 측정하는 방식으로, 크게 별도의 온도 센서를 통해 감지하는 혼합형(Composite)과 온도 변화를 직접 측정하는 단일형(Monolithic) 방식으로 나뉘며, 동작 온도에 따라 비냉각, 냉각 방식으로 구분할 수 있다. 이 중 단일형 마이크로볼로미터(Microbolometer) 방식은 기존의 실리콘 기반 MEMS 기술 바탕으로 배열, 집적화가 용이하고 상온동작이 가능하므로 3THz 이상 대역에서 실시간 이미징 및 분광 분야 적용을 위해 유럽, 북미, 일본 등지에서 상용화 및 개발이 이루어



출처 Reprinted from A. Rogalski et al., "Terahertz detectors and focal plane arrays," *Opto-Electron. Rev.*, vol. 19, no. 3, 2011, pp. 346-404.

**그림 5 초전도 볼로미터 (a) 픽셀 단면
(b) JCMT에 내장된 SCUBA-2(40×32픽셀)**

지고 있다[19].

소자의 응답도 향상을 위해서는 저항 온도계수가 큰 물질을 선택해야 하며, 검출 소자의 응답도와 반응시간은 서로 상충관계이다. 즉, 흡수체의 열적 고립 특성이 향상될수록 열전도 계수가 낮아지면 민감도가 좋아지나 반응시간 증가로 인한 빠른 프레임의 영상 구현이 어려워지므로 시스템의 사양에 맞게 고려되어야 한다.

흡수층을 구성하는 물질로는 열적 안정성 및 잡음특성이 우수한 금속인 Bi, Nb, Ti, Ni 등이 사용되고 있으나 대부분의 적외선 영역의 마이크로 볼로미터에 사용되는 비정질 실리콘(a-Si), 산화바나듐(VO_x)이 테라헤르츠 대역에도 대부분 적용되어 현재는 초점면 배열 형태의 이미지 센서로 개발되고 있다. 상용화된 마이크로 볼로미터(그림 5(a)) 경우 80×80 에서 $2M(1,920 \times 1,080)$ 이상의 픽셀 수, $15 \sim 35 \mu\text{m}$ 의 픽셀 피치(픽셀당 NEP $\sim 1.5 \text{pW/Hz}^{0.5} @ 4.6 \text{THz}$)를 가지는 다양한 제품이 출시되고 있으며[20], 가격경쟁력을 위해서 광학계를 포함한 시스템의 크기를 줄이기 위하여 픽셀 간 피치를 줄이는 방향으로 개발이 진행되고 있다.

냉각식 볼로미터는 $0.1 \sim 0.3 \text{K}$ 에서 동작하며, 흡수 물질의 열용량이 상온보다 현저하게 감소하기 때문에 작은 온도 변화에도 저항 변화량이 크게 나타나므로 고감도 검출이 가능해진다. 대부분의 도

핑된 Ge과 Si 기반 볼로미터의 경우 $10^{-18} \sim 10^{-17} \text{W/Hz}^{0.5}$ 수준의 잡음특성과 $\sim 10 \text{ms}$ 응답속도를 갖는 배열 형태로 사용되고 있다[4]. 초전도체를 이용하는 소자인 HEB(Hot Electron Bolometer), TES(Transition Edge Sensor) 경우에도 임계온도 부근에서 $10 \sim 10^2 / \text{K}$ 에 이르는 저항온도계수를 이용하여, 직접 검출 방식과 헤테로다인 검출 방식 모두에 활용되고 있으며 Heinrich Hertz Telescope, James Clerk Maxwell Telescope(JCMT), SOFIA, Herschel와 같은 실제 지상 및 우주 관측 장비에 사용되고 있다[21].

나. 초전형 검출기

초전(Pyroelectricity) 특성을 가지는 물질에 전자기파가 입사하면 내부의 전기분극도가 온도의 변화에 의해 달라지게 되어 전기적 신호를 얻음으로써 검출할 수 있다. 따라서 주로 BaTiO_3 , TGS, LiTaO_3 와 같은 초전 계수(Pyroelectric Coefficient)가 큰 강유전체가 흡수 물질로 사용되고 있다. 물질에 따라 검출 특성이 크게 달라지며, 온도의 변화에 민감하므로 높은 응답도($\sim 5 \sim 300 \text{kV/W}$)를 가지나 상대적으로 높은 잡음특성($10^{-9} \sim 10^{-6} \text{W/Hz}^{0.5}$)과 느린 응답 시간($10 \sim 50 \text{msec}$)을 개선하기 위한 연구가 필요하다. 또한, 검출되는 전류량이 입사파의 시간의 변화율에 비례하므로 연속파 시스템에는 적용이 어려운 단점이 있다.

다. Golay cell

1946년 Harold A. Zahl과 Marcel J. E Golay에 의해 제안된 검출기로서[22], 전자기파가 입사되면 밀폐된 내부에 채워진 가스의 열팽창에 의해 셀의 일부를 구성하는 박막의 변형이 나타나게 된다. 이에 박막 위에 실장되어 있는 가변 거울의 곡률이 동시에 변하게 되어 셀과 결합되어 있는 광학계를 구성하는 광원의 빔 경로의 변화를 야기시켜 정렬되어

표 2 비냉각식 볼로미터, 초전형, Golay cell 검출기 성능지표

Detector type	Microbolometer		Pyroelectric (LiTaO ₃)	Golay cell
	Ni	VO _x		
Frequency(THz)	0.094	4.3	0.1~30	0.2~30
Modulation freq. (Hz)	>1M	30	<30	<10
Responsivity (kV/W)	0.017	4.97	150	0.1~45
Pixel	8x8	128 ²	-	-
NEP (pW/Hz ^{0.5})	19	100~300	400 @λ=10.6μm	200~400

있는 광다이오드의 출력 변화를 통해 검출하게 된다. 셀 내부의 검출 가스는 열전도도가 낮은 비활성기체인 아르곤(Ar), 제논(Xe)이 주로 사용되며, 검출 가스와 박막 흡수체 간 열전도와 연관된 온도 잡음에 의해 성능이 결정된다. 일반적으로 넓은 검출대역(λ~20~1,000μm)과 높은 응답도(10⁵~10⁶V/W)를 나타낸다. 그러나 일부 그룹에서 배열 형태로 Golay cell을 제작하여 밀리미터파 대역에서의 검출 결과를 발표한 보고가 있으나[23] 셀과 광학계의 부피가 크므로 배열화가 어렵고 외부 기계 진동에 취약한 단점이 있다. 또한, 느린 응답시간(~15msec)은 실시간 센싱이나 이미징 분야에 적용

에는 적합하지 않다.

4. 정류형 검출기

정류(Rectification) 특성을 이용한 전자기파 검출 기술은 소자의 비선형 전류-전압 특성을 이용하여 직류 전압 또는 전류 형태로 검파하게 된다. 정류형 검출기는 폭넓은 동작 온도(극저온~상온)를 가지며 종류에 따라 수 THz의 넓은 대역폭과 빠른 응답속도, 저잡음 특성(표 1 참조)과 함께 소형화가 가능하여 현재 미국, 유럽, 일본에서 상용화가 빠르게 이루어지고 있다. 또한, 직접 검출 방식과 헤테로다이 검출 방식에 모두 적용 가능하므로 통신, 이미징, 분광 시스템 등 다양한 연구 분야에서 활발히 연구되고 있다. 이 절에서는 현재 가장 많이 연구되고 있는 검출 소자 기술인 다양한 형태의 전계 효과 트랜지스터와 본 연구실에서 개발 중인 쇼트키 장벽 다이오드에 대해 간략히 소개하였다(표 3 참조).

가. 전계 효과 트랜지스터 검출 소자

THz 검출 소자 응용을 위한 전계 효과 트랜지스터(FET: Field Effect Transistor)는 직접 검출 방식

표 3 직접 검출 방식 정류형 테라헤르츠파 검출기 성능지표

Detector	Material	Response time	Integration (pixel size)	Responsivity@300K(V/W)	NEP(pW/Hz ^{0.5})
SBD	GaAs GaAs ErAs/InAlAs InGaAs/InP	fast(~20ps)	○	0.3~1k@0.15~0.4THz 0.15k@2THz 6.8k@0.1THz 1k@0.3THz	5~20 ~100@1THz 1.4@0.1THz 2@1THz
CMOS	Si Si	fast(-)	32x32 ○	57k@0.9THz(amp. integrated) 5k@0.5THz	470@0.9THz 29@0.5THz
HEMT HEMT HFET	InAlAs/InGaAs/InP AlGaIn/GaN AlGaIn/GaN	fast(~10ps)	○	2.2k@1.0THz 15k@0.14THz 0.03[A/W]@0.6THz	~10@1.0THz 0.58@0.14THz 26@0.6THz
FET	Graphene	fast(-)	○	14@0.6THz	515@0.6THz

에 적용할 경우 대부분 상온에서 0~100V/W의 응답도, 1~10pW/Hz^{0.5} 등가 잡음 전력, 10⁻¹⁰sec 이하의 빠른 응답 시간특성으로 Si-MOSFET, III-V족 HEMT와 같이 다양한 물질과 구조를 이용하여 단일 픽셀은 물론 배열 구조로 연구되고 있다. FET 검출 소자는 기본적으로 1993년 Dyakonov-Shur에 의해 제안된 FET의 채널 내 형성된 전하들에 의한 플라즈마파(Plasma Wave)의 외부 전자기파에 대한 비선형 응답특성을 이용한 플라즈마파 검출법에 따른다.

1998년 AlGaAs/GaAs HEMT을 이용하여 테라헤르츠파를 검출(응답도: 600V/W@2.5THz)을 보고한 이래[24], GaAs/AlGaAs, InGaP/InGaAs/GaAs, GaN/AlGaN 등 다양한 에피 구조의 III-V족 FET를 이용한 연구가 현재까지 이루어지고 있으며 [2], 최근에는 이중 격자 게이트 전극 기반 InGaAs/InAlAs/InP HEMT을 이용한 우수한 응답특성(응답도: 2.2kV/W@1THz, 등가 잡음 전력: 0.48pW/Hz^{0.5}) 결과가 보고되었다[25]. 독일을 중심으로 유럽의 Dot5(0.5THz), Dot7(0.7THz) 프로젝트를 통

해 SiGe 기반의 HBT와 Si CMOS 공정을 이용한 집적화된 형태의 테라헤르츠파 검출소자의 제작이 가능해지면서 그림 6과 같은 초점면 배열 형태의 FET 기반 검출기술에 관한 연구가 더욱 확대되는 계기가 되었다.

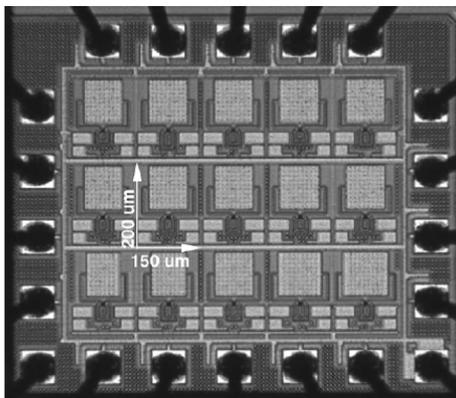
FET 소자의 검출 성능은 채널의 길이, 전하의 재결합 시간, 게이트 전극 구조 등 물질 특성과 트랜지스터 구조에 따라 달라지며 소스-드레인, 게이트-소스 간 바이어스 조건에 의해서도 주파수 응답 특성이 크게 영향을 받는다.

따라서 동작 주파수에 따라 소자의 구조를 최적화하기 위한 정확한 소자의 소신호 등가회로 모델링이 필요하며, 상온에서의 미약한 소자의 응답도의 개선을 위한 증폭회로와 안테나의 집적 및 최적화에 관한 연구 중심으로 이루어지고 있다.

나. 쇼트키 배리어 다이오드 검출 소자

쇼트키 배리어 다이오드(SBD: Schottky Barrier Diode)는 소자의 비선형 정류특성을 이용하여 테라헤르츠파를 검출하는 소자로서, 직접 검출 방식으로 상온에서의 광대역 테라헤르츠파의 검출에 적합하다. SBD는 일반적인 p-n접합 다이오드와 달리 소수 캐리어 저장효과가 나타나지 않기 때문에 고주파 검파에 적합하다.

SBD의 양 단자에는 광대역 안테나가 집적되어 있어 입사된 테라헤르츠파가 안테나를 통해 SBD에 인가되면 정류 작용에 의해 테라헤르츠파의 출력에 비례하는 SBD의 직류 성분을 검출하게 된다. 특히, 테라헤르츠 대역에서 무 바이어스(Zero-bias) 검출 및 저잡음 특성 구현에 유리한 낮은 쇼트키 장벽을 가지는 InGaAs, InGaAsP 기반 SBD가 사용되고 있으나 각 연구그룹 기술 개발 방향에 따라 다양한 방식으로 구현되고 있으며, 이 중 미국의 Virginia diode Inc.[27], 독일의 ACST



출처 Reprinted from Eöjefors et al., "A 0.65THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS technology," *IEEE J. Solid-St. Circ.*, vol.44, no. 8, 2009, pp. 1968-1976.

그림 6 3×5 배열형 250nm 0.65THz CMOS 이미지

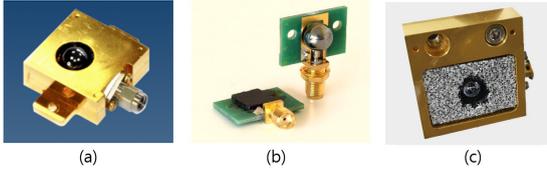


그림 7 현재 상용화된 광대역 SBD 검출모듈
(a) ACST GmbH (b) Terasense Group Inc.
(c) Virginia diodes Inc.

GmbH[28], 영국의 teratech components Ltd[29], 일본의 NTT electronics 등에서 광대역 검출 모듈이 상용화되고 있다(그림 7).

본 연구실에서는 꾸준히 테라헤르츠 분광 및 이미징 분야 응용을 위한 연속파 기반 비파괴 이미징 시스템 개발에 힘쓰고 있다.

SBD를 검출기로서 높은 응답 특성과 zero-bias 검출이 가능한 장점이 있다. 또한 모듈 제작 시 소형화에 적합하며, 소자 공정의 최적화를 통한 수율 향상을 통해 가격경쟁력 측면에서도 유리하다.

따라서 시스템에 적용할 경우 광대역, 초소형, 저가격의 응용 시스템 구성이 가능하다.

현재 본 연구실에서 중점으로 연구 중인 표면 채널(Surface Channel) 구조의 InGaAs 기반 SBD는 GaAs에 비해 낮은 전계에서도 높은 전자 이동도를 가지므로 SBD의 대역폭을 결정하는 직렬저항(Series Resistance)을 줄일 수 있고, ~0.2eV 이하의 쇼트키 장벽을 형성하므로 저잡음, zero-bias 검출에 적합하다. 따라서 별도의 동작전원이 필요하지 않으므로 검출기를 구성하는 데 있어서 크기, 소모 전력, 가격 측면에서 장점을 가진다. 또한, 상대적으로 0V에서의 접합저항이 수 kΩ 수준의 낮은 값을 가지므로 출력 증폭회로 집적 시 임피던스 정합이 용이하고 넓은 동적 범위(Dynamic Range) 확보가 가능한 장점이 있다.

SBD의 차단주파수는 $f_c \approx (2\pi R_s C_j)^{-1}$ 로 나타낼 수

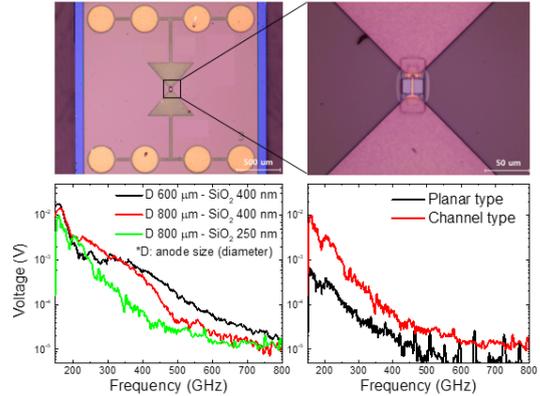


그림 8 광대역 SBD 검출 소자 이미지와 구조에 따른 THz 스펙트럼

있다. R_s 는 직렬 저항(Series Resistance), C_j 는 접합 정전용량(Junction Capacitance)을 의미한다. 따라서 대역폭을 증가시키기 위해서는 R_s , C_j 가 작을수록 유리하며, 이는 SBD를 구성하는 박막의 물성과 소자의 구조에 의해 결정된다.

특히 연구 중인 1THz 이하 이미징 및 통신분야 적용에 요구되는 소자의 성능을 최적화하기 위해서는 쇼트키 층의 도핑농도, 두께의 최적화가 필요하며, 공정 수율 확보를 위한 0.6~1.0μm의 다양한 애노드 직경의 쇼트키 배리어 다이오드와 소자 내 표면 채널 구조의 전기적, 기계적 안정성 향상에 관한 연구가 진행 중이다(그림 8).

측정 결과 ~0.2~0.8THz 대역에서 신호가 검출되고 있으며, 0.3THz에서 약 300V/W의 응답도, 330pW/Hz^{0.5}의 NEP, 30dB의 동적 범위(Dynamic Range)를 가지는 것으로 확인하였다. SBD 검출 소자에 대한 주요 파라미터와 검출 특성을 표 4에 나타내었다.

이와 같은 연구 결과를 바탕으로 소형화, 저전력, 고신뢰성의 검출 모듈을 개발을 위해서 검출 특성 향상뿐만 아니라 온도, 충격, 습도 등의 외부 환경변화에 강인한 밀폐형(Hermetic) 패키지가 적

표 4 SBD 주요 파라미터 및 모듈 검출 특성

Diode parameter	Measured vaule
Series resistance(R_s)	22Ω
Saturaion current(I_s)	6.2μA
Ideality factor(η)	1.35
Junc. capacitance@1MHz(C_{j0})	30fF
Responsivity@0.3THz	300V/W
NEP@0.3THz	3.3×10^{-10} W/Hz ^{0.5}

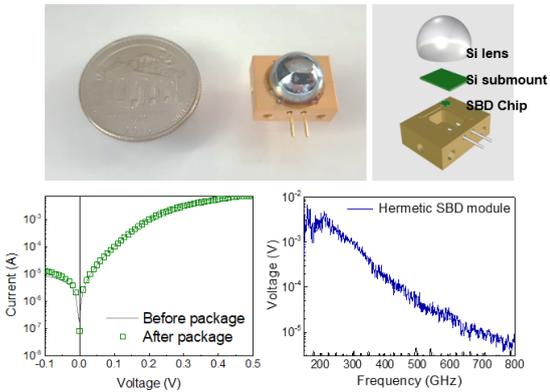


그림 9 밀폐형 SBD 검출 모듈

용된 SBD 모듈을 개발 중에 있다.

그림 9는 밀폐형 패키지를 적용한 SBD 모듈의 이미지와 이를 이용하여 측정한 결과를 나타낸 것이다. 패키지의 크기는 0.62cc(13×10×4.75mm³)이며 실리콘으로 제작된 서브마운트 위에 초반구형(Hyper-hemispherical) 실리콘 렌즈가 하우징 내부의 쇼트키 배리어 다이오드와 정렬된 상태로 부착된 구조로 되어 있다.

현재 검출 성능은 고속 이미징이나 실시간 두께 측정 모니터링이 가능한 수준이며, 검출 특성뿐만 아니라 온도, 충격, 습도 변화 등의 다양한 환경 조건에 대한 모듈의 안정성을 검증하기 위해 여러 가지 신뢰성 시험을 진행하고 있다.

패키징된 모듈의 헬륨 누설률 측정(MIL-STD-883H, test method 1014.13) 결과 모든 테스트 모듈

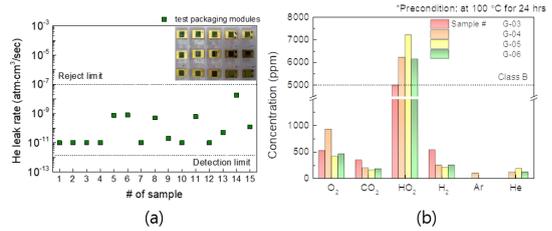


그림 10 SBD 모듈의 (a) 헬륨 누설률 테스트 결과 (b) 잔류 가스 분석 결과

이 통과기준을 만족하는 것을 확인하였고, 열충격 테스트(MIL-STD-883J, test method 1011.9), 기계 충격(MIL-STD-883E, test method 2002.3) 및 진동 테스트(MIL-STD-883E, test method 2007.2) 전후 쇼트키 배리어 다이오드의 이상계수(Ideality Factor)의 변화가 각각 9.1%, 2.4%로서 테라헤르츠파의 검출성능에 미치지 않은 수준으로 측정되었다. 그러나 모듈 내부의 잔류 가스 분석(MIL-STD-883E, test method 1018.2)을 통한 내부 수분 함량은 class B(우주 분야를 제외한 통상의 사용기준)를 초과하는 것으로[31] 이를 충족하기 위해 패키지 공정 조건을 개선 중에 있으며, 향후 본 연구실에서 연구 중인 2차원 고속 이미징, 두께 모니터링 시스템에 적용 중에 있다[32].

IV. 결론

본 고에서는 현재까지 활용되고 있는 광대역 테라헤르츠 검출 기술의 특징과 응용에 대해 기술하였다. 또한, 본 연구실에서는 진행하고 있는 소형의 저가격, 고신뢰성의 광대역 테라헤르츠 검출기의 개발 현황에 대해서도 살펴보았다.

테라헤르츠 검출 소자 기술은 다양한 형태로 지난 수십 년에 걸쳐 우주 천문 분야에서 통신, 보안, 영상 분야에 이르기까지 각기 다른 분야의 특성에

맞는 방식으로 발전해 왔고, 앞으로도 여러 분야에 서 테라헤르츠 검출 기술에 대한 수요가 증가할 것이다. 따라서 향후 소자의 성능이 향상되고 이를 이용한 시스템 개발이 이루어진다면 더욱더 실제 응용 범위가 넓어질 것이다.

용어해설

광 비팅 신호(Optical Beating Signal) 두 개의 서로 다른 파장이 가지는 레이저를 중첩시킴으로써 생성되는 두 파장의 차이에 해당하는 주파수를 갖는 광신호

동적 범위(Dynamic Range) 수신회로가 허용할 수 있는 최대 입력레벨과 허용되는 신호 대 잡음비를 제공할 수 있는 최소 입력 레벨 차이

쿠퍼 쌍(Cooper pair) 초전도체 내의 자유 전자들이 포논을 매개로 두 개씩 쌍을 이루고 있는 상태

쇼트키 배리어 다이오드(Schottky Barrier Diode) 반도체(주로 n형)에 금속접합을 형성시켜 만든 다이오드. 정류작용을 통해 THz 파를 검파하며, 쇼트키 장벽이 낮은 경우 별도의 공급전원이 없이도 세기 측정이 가능함

양자 폭포 레이저(Quantum Cascade Laser) 밴드 간 천이를 이용하는 기존 반도체 레이저와 달리 전도대 내 부밴드 간 천이를 이용하는 방식으로, 효율 향상을 위해 비슷한 반복 에피구조를 사용하는 레이저

약어 정리

BIB	Blocked Impurity Band
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
ESO	European Southern Observatory
FET	Field Effect Transistor
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEB	Hot Electron Bolometer
HEMT	High Electron Mobility Transistor
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
KID	Kinetic Inductance Detector
LEKID	Lumped Element Kinetic Detector
NEP	Noise Equivalent Power
PCA	PhotoConductive Antenna
SBD	Schottky Barrier Diode

SIS	Superconductor–Insulator–Superconductor
TES	Transition Edge Sensor

참고문헌

- [1] D. Sengupta et al., “Centennial of the Semiconductor Diode Detector,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 1, 1998, pp. 235–243.
- [2] 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.
- [3] P. H. Siegel, “Terahertz Technology,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, 2002, pp. 910–928.
- [4] R. A. Lewis, “A Review of Terahertz Detectors,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. 52, 2019, p. 433001.
- [5] M. Dyakonov, “Shallow Water Analogy for a Ballistic Field Effect Transistor: New Mechanism of Plasma Wave Generation by dc Current,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, 1993, pp. 2465–2468.
- [6] K. Moon et al., “Low-temperature-grown InGaAs terahertz photomixer embedded in InP thermal spreading layer regrown by metalorganic chemical vapor deposition,” *Opt. Lett.*, vol. 38, 2013, pp. 5466–5469.
- [7] K. Moon et al., “Generation and Detection of Terahertz Waves using Low-Temperature-Grown GaAs with an Annealing Process,” *ETRI J.*, vol. 36, 2014, pp. 159–162.
- [8] R. B. Kohlhaas et al., “photoconductive terahertz detectors with 105 dB peak dynamic range made of rhodium doped InGaAs,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 114, 2019, p. 221103.
- [9] A. Rogalski et al., “Terahertz detectors and focal plane arrays,” *Opto-Electron. Rev.*, vol. 19, no. 3, 2011, pp. 346–404.
- [10] E. T. Young et al., “Far-infrared Imaging Array for SIRTf,” *Proc. SPIE*, vol. 3354, 1998, pp. 57–65.
- [11] A. Poglitsch et al., “the Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) for the Herschel Space Laboratory,” *Proc. SPIE*, vol. 7010, 2008, p. 701005.
- [12] R. Mills et al., “Evolution of Large Format Impurity Band Conductor Focal Plane Arrays for Astronomy Applications,” *Proc. SPIE*, vol. 8154, 2011, p. 81540.
- [13] H. C. Liu et al., “Terahertz Quantum Well Photodetectors,” *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, vol. 14, 2008, pp. 374–377.
- [14] A. G. U. Perera et al., “Semiconductor Terahertz Detectors and Absorption Enhancement using Plasmons,” *Microelectron. J.*, vol. 39, 2008, pp. 601–606.
- [15] H. C. Liu, “Quantum Dot Infrared Photodetector,” *Opto-Electron. Rev.*, vol. 11, 2003, pp. 1–5.
- [16] O. Astafiev et al., “Single-photon Detector in the Microwave Range,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 22, 2002, pp. 4250–

- 4252.
- [17] R. J. Schoelkopf et al., "A Concept for a Submillimeter-Wave Single-Photon Counter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 9, no. 2, 1999, pp. 2935-2939.
- [18] J. J. A. Baselmans et al., "A Kilo-Pixel Imaging System for Future Space based Far-Infrared Observatories using microwave Kinetic Inductance Detectors," *A&A*, vol. 601, A89, 2017, pp. 1-16.
- [19] F. F. Sizov et al., "Uncooled Detectors Challenges for THz/sub-THz Arrays Imaging," *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, vol. 32, no. 32, 2011, pp. 1192-1206.
- [20] <https://www.swissterahertz.com/>
- [21] F. Sizov et al., "Terahertz Radiation Detectors: the state-of-the-art," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 33, 2018, p. 123001.
- [22] H. A. Zahl et al., "Pneumatic Heat Detector," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 17, no. 11, 1946, pp. 511-515.
- [23] D. R. Denison et. al., "Experimental Characterization of mm-wave Detection by a Micro-Array of Golay Cells," *Proc. SPIE*, vol. 7309, 2009, p. 73090J.
- [24] J.-Q. Lu et al., "Terahertz Detector Utilizing Two-Dimensional Electronic Fluid," *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. 19, no. 10, 1998, pp. 373-375.
- [25] Y. Kurita et al., "Ultrahigh Sensitive Sub-Terahertz Detection by InP-Based asymmetric dual-grating-gate HEMTs and their broadband characteristics," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, 2014, p. 251114.
- [26] E. Öjefors et al., "A 0.65THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS technology," *IEEE J. Solid-St. Circ.*, vol.44, no. 8, 2009, pp. 1968-1976.
- [27] <https://www.vadiodes.com/en/>
- [28] <https://terasense.com/products/detectors/>
- [29] <https://acst.de/>
- [30] <https://www.teratechcomponents.com/TTC/>
- [31] MIL-STD-883E, "Test Method Standard Microcircuit,"
- [32] E. S. Lee et al., "Semiconductor-Based Terahertz Photonics for Industrial Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 36, no. 2, 2018, pp. 274-283.
- [33] F. Sizov, "THz radiation sensors," *Opto-Electron. Rev.*, vol. 18, no. 1, 2013, pp. 10-36.
- [34] <https://sequestim.com/news/>
- [35] A. Rogalski, "Semiconductor Detectors and Focal Plane Arrays for Far-Infrared Imaging," *Opto-Electron. Rev.*, vol. 21, no. 4, 2013, pp. 406-426.