

600 GHz 대역 CMOS 배열 검출기

A 600-GHz CMOS Array Detector

조 민 제 · 김 도 윤* · 이 재 성**

Minje Cho · Doyoon Kim* · Jae-Sung Rieh**

요 약

본 연구에서는 65-nm CMOS 공정 기반 600 GHz 대역 6×6 배열 검출기가 개발되었다. 공통 게이트 차동 쌍 구조에 온 칩 차동 패치 안테나가 집적된 형태로 개발된 단일 픽셀 검출기 36개를 행과 열이 동일한 픽셀 수로 배치하여 배열을 형성하였으며, 픽셀 선택을 위한 행/열 선택 스위치 및 신호 경로를 함께 집적하여 배열 검출기가 완성되었다. 전기적 특성으로는 600 GHz 근방에서 1,320 V/W의 평균 반응도, 114 pW/Hz^{0.5}의 평균 NEP를 얻었고, 제작된 배열 검출기에 기반하여 600 GHz 대역의 투과 이미징 실험이 진행되었다.

Abstract

This study develops a 600-GHz band array detector in a 65-nm CMOS technology. The unit pixel detector is based on a common-gate differential pair integrated with an on-chip differential patch antenna. A detector array was completed by arranging 36 pixels in a 6×6 configuration and integrating switches for row/column selection and signal path. The array exhibited average responsivity and NEP (noise equivalent power) of 1,320 V/W and 114 pW/Hz^{0.5}, respectively. Imaging experiments were conducted at approximately 600 GHz by utilizing the developed array detector.

Key words: Detector, Imaging, CMOS

I. 서 론

THz 주파수 대역은 여러 가지로 정의될 수 있으나 일반적으로 0.1 THz에서 10 THz 사이의 주파수 범위를 나타낸다. 이 대역은 높은 주파수의 장점으로 넓은 주파수 대역의 확보가 가능하여 광대역 무선 통신 시스템에 적용이 가능하고, 또한 짧은 파장의 특성으로 인해 높은 거

리해상도의 레이더 시스템 및 여러 가지 이미징 시스템에 유용하게 적용이 가능하다^{[1][2]}. 특히 THz 대역의 전자 기파는 금속을 투과하지 못할 뿐 아니라, 수분에 대해서도 투과성이 약한 특성을 보이는 반면, 상대적으로 다양한 유전체 물질에 대해서는 투과성이 높다. 이러한 선택적 투과 특성은 이 대역의 이미징 응용에 더욱 효과적으로 적용이 가능하며, 따라서 의학, 보안, 결함 검사 등과

†이 논문은 2021년 한국연구재단의 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021R1A2C3009096).

아나패스(Anapass)

*삼성전자 S.LSI 사업부 (System LSI Division, Samsung Electronics)

**고려대학교 전기전자공학부 (School of Electrical Engineering, Korea University)

· Manuscript received July 13, 2023 ; Revised July 31, 2023 ; Accepted August 7, 2023. (ID No. 20230713-054)

· Corresponding Author: Jae-Sung Rieh (e-mail: jsrieh@korea.ac.kr)

같은 다양한 이미징 응용 분야에 널리 활용되고 있다^{[3]~[6]}. 특히 인체 대상 이미징 응용에 있어서 X-ray와는 달리 인체를 구성하는 생체 분자의 이온화 현상이 일어나지 않는다는 추가적인 장점이 있다. 이는 THz 대역의 광자 에너지(수 meV)가 X-ray의 에너지(수십 eV)보다 훨씬 작아 인체에 기인하며, 이 값은 일반적인 이온화에 필요한 에너지(~ 10 eV)보다 훨씬 작아 X-ray와는 달리 인체에 해롭지 않다는 특성을 보인다. 이는 THz 이미징의 응용성을 넓히는데 큰 장점으로 작용한다.

THz 이미징 시스템을 구현하기 위해서는 신호 발생단과 신호 검출단이 필요하다. 신호 검출단의 경우는 그 구현 방식에 있어서 직접 검출 구조와 헤테로다인 검출 구조로 나뉜다^[9]. 헤테로다인 검출단은 믹서를 통하여 IF 주파수 대역으로 주파수 하향 변환이 이루어진 후에 IF단에서 검출이 이루어지게 된다. 대개의 경우, IF 검출단 앞에 IF 증폭기가 위치하게 되며, 상대적으로 변환 이득 및 잡음 측면에서 우수한 성능을 나타낸다. 반면에 일반적으로 전력 소모 및 회로 면적이 다소 크다는 단점이 수반된다. 이에 반해 직접 검출단은 주파수 변환 없이 RF 주파수에서 직접 검출이 이루어지고 IF 증폭단이 생략되므로, 성능은 다소 뒤처지지만 회로의 구성이 간단하고 전력 소모 및 회로 크기가 작다는 장점이 있다. 이러한 장점은 특히 배열 검출기를 구성하는 데 큰 이점으로 작용하게 된다.

시스템 구현의 측면에서 III-V 화합물 반도체 공정의 활용이 능동소자의 성능 측면에 있어서는 분명한 장점이 있다. 그러나 실리콘 공정, 특히 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor) 공정의 활용은 주변 아날로그 및 디지털 회로와의 집적 가능성 측면에서 크게 유리하다. 또한 배열 검출기를 구성하기 위해서는 후술하는 바와 같이 행/열 선택을 위한 스위치 및 경우에 따라 클럭 발생기의 집적이 필요하며, 이 경우 CMOS 공정의 장점이 크게 부각될 수 있다.

이미징 시스템에 적용되는 주파수 관련, 해상도의 측면에 있어서 같은 THz 대역 내에서도 상대적으로 높은 주파수 대역의 적용에 장점이 있다. 이는 검출단에 사용되는 광학 시스템에 있어서 동일한 구경에 대해 해상도는 파장에 비례하여 개선되기 때문이다. 또한 실제 회로 구현에 있어서도 앞서 간략하게 언급한 바와 같이 주파

수가 높을수록 파장이 짧아지므로 높은 주파수를 활용하는 경우 수동소자의 크기가 작아져서 회로의 면적을 작게 할 수 있다. 특히 온 칩 안테나가 집적되는 검출단의 경우 작은 회로 크기의 장점이 크게 부각된다. 더 나아가 다수의 검출단을 포함하는 배열 검출단에 있어서는 결정적인 장점으로 작용할 것이다. 또한 이러한 신호 검출은 능동소자의 이득이 아닌 비선형성을 활용하여 이루어지므로, 능동소자의 차단주파수보다 더 높은 대역에서도 동작할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구진은 기존 300 GHz 대역에 동작하는 배열 검출기를 보고한 적이 있으며^{[10],[11]}, 본 연구에서는 주파수를 상향하여 600 GHz 대역에서 동작하는 직접 검출기 기반 배열 검출단을 65-nm CMOS 공정에 기반하여 구현하였다. 기존 학술대회에서 간략히 소개된 내용^[12]을 확장하여 구체적인 전기적 특성 및 이미징 실험 결과를 회로 설계 내용과 함께 본 논문에서 상세히 제시하고자 한다.

II. 단일 픽셀 검출기

배열 검출기 구현을 위한 선행 작업으로 단일 픽셀 검출기를 우선적으로 개발하였다. 그림 1에 개발된 단일 픽셀 검출기의 회로도가 나타나 있다. 이 회로는 공통 게이트 기반의 NMOS(n-type metal-oxide semiconductor) 차동 쌍으로 설계되었으며 공동드레인 노드에서 직류 전압 출력 신호를 추출하는 구조이다. 차동 쌍의 비선형 동작 특성상 입력된 신호의 짝수 고조파 및 DC 성분이 차동 쌍의 공동드레인 노드에 나타나며, 이 중 DC값을 출력단에

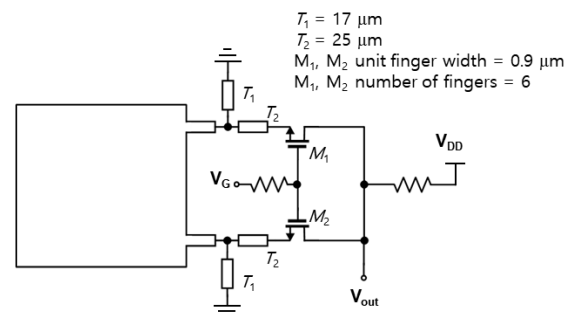


그림 1. 단일 픽셀 검출기
Fig. 1. Single pixel detector.

서 추출함으로써 검출이 이루어지게 된다. 공통 게이트 구조는 유사한 소스 게이트 구조에 비해 일반적으로 더 넓은 대역폭을 나타내는 것으로 알려져 있다. 설계된 검출기는 능동 모드에서 동작하며, 게이트 전압과 드레인 전압의 차가 문턱 전압 근방에 형성될 때 최대 검출 효율을 보이는 것으로 나타났다. 또한 검출기의 반응도 성능을 최적화하기 위해 검출기의 동작 주파수인 600 GHz 근방 주파수에 대한 임피던스 정합 네트워크를 전송선을 사용하여 구성하였다. 추가적으로, RF 신호의 수신을 위하여 온 칩 안테나를 차동 입력 부분에 집적하여 외부 안테나 집적을 위한 번거로운 패키징 단계를 생략할 수 있었다. 이를 위해 차동 신호를 칩의 전방에서 수신하기 위하여 차동 패치 안테나 구조를 채택하였으며, 패치 크기는 동작 주파수에서의 최적 성능에 기반하여 $116.4 \mu\text{m} \times 124.0 \mu\text{m}$ 로 결정되었다. 이 크기는 온 칩으로 구현하기에 크게 무리가 되지 않는 범위이며, 이러한 작은 안테나 크기는 앞서 잠깐 언급한 바와 같이 높은 주파수(600 GHz) 동작의 유용한 장점 중의 하나로 볼 수 있겠다. 시뮬레이션 결과가 그림 2에 나타나 있으며, 안테나 방사 효율은 -1.88 dB , 안테나 이득은 4.78 dBi 로 나타났고, S_{11} 기준 593 GHz의 중심 동작 주파수 및 587 GHz~599 GHz의 대역폭을 얻을 수 있었다.

개별적인 단일 픽셀 검출기 제작은 별도로 진행되지 않았으나, 다음 장에 기술하는 제작된 배열 검출기에서 선택된 픽셀에 대한 전기적 특성 측정이 가능하기에, 본 장에서는 측정 셋업 구성과 함께 선택된 개별 픽셀의 특성을 간단히 살펴 보도록 하겠다. 검출 특성 측정을 위해서는 600 GHz 대역 신호원이 필요하며, 이를 위해 Agilent E8257C 신호발생기의 출력 신호를 VDI AMC(amplifier multiplier chain)를 통해 54 체배하여 600 GHz 대역 신호를 발생하였다. 추가적으로 저주파 잡음을 회피하기 위하여 100 kHz의 진폭 변조를 수행하였다. 이렇게 생성된 신호는 25 dBi의 안테나 이득을 가진 혼 안테나를 통해 방사되었다. 수신단에서는 특성을 검증하고자 하는 픽셀을 선택한 후 해당 검출기에서 나온 신호가 온 칩 공통 소스 증폭기를 거쳐 15 dB 증폭 후 출력 노드에서 출력이 되며, 이는 외부 저잡음 증폭기(LNA) 및 데이터 획득 시스템(data acquisition: DAQ)을 거쳐 PC에 설치된 랩뷰 프로

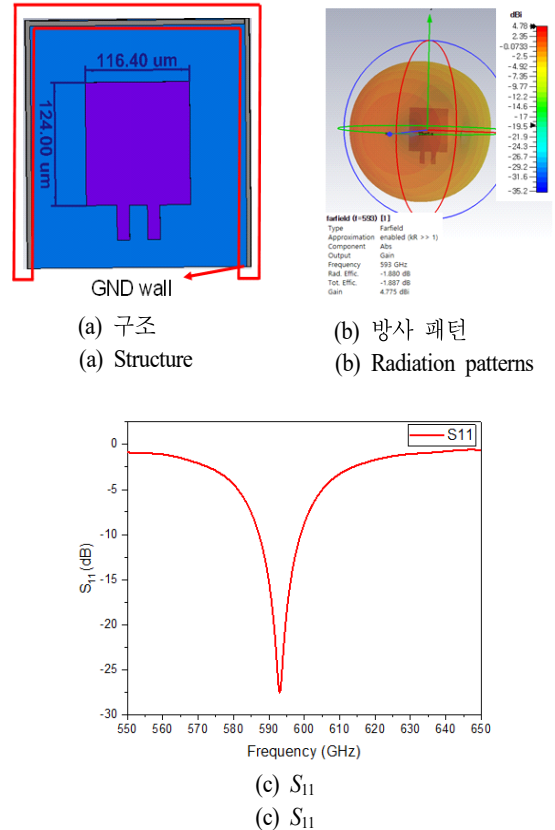
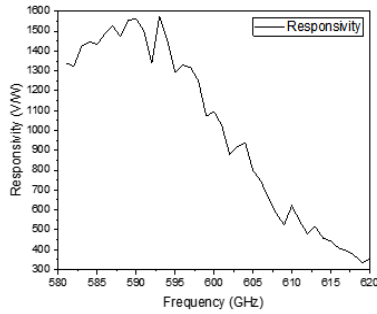


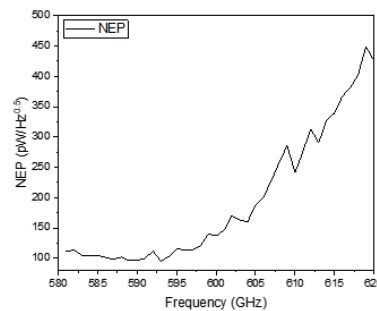
그림 2. 설계된 안테나의 구조 및 시뮬레이션 특성
Fig. 2. Simulated antenna structure and results.

그램을 통해 최종 신호 처리가 진행된다. 온 칩 증폭기 및 배열 선택 회로의 구성은 기존 300 GHz 배열 검출기와 유사한 구조로 구현이 되었다^[11].

검출기의 가장 기본적인 특성인 반응도(responsivity)는 검출기의 입력 전력과 출력 전압의 비로 결정이 되는데, 반응도 결정에 필요한 입력 전압은 Friis 공식을 이용하여 추출할 수 있다. 이 과정에서 필요한 송신단 안테나 이득은 앞서 기술한 혼 안테나의 데이터 시트가 제공하는 25 dBi의 값을 사용하였고, 수신단 안테나 이득은 시뮬레이션으로 얻어진 온 칩 패치 안테나의 이득값 4.5 dBi를 사용하였다. 참고로 이때 600 GHz에서의 수신 안테나 유효 면적은 0.056 mm^2 에 해당한다. 송신단과 검출기와의 거리는 2.5 cm로 유지되었으며, 이 값은 600 GHz 대역에서 충분히 far field 영역에 해당하므로 Friis 공식의 활용이 가능하다. 출력 전압은 PC의 랩뷰 프로그램의 출



(a) 반응도
(a) Responsivity



(b) NEP
(b) NEP

그림 3. 측정된 단일 픽셀 검출기의 특성
Fig. 3. Measured performance of a single pixel detector.

력값을 통해 얻어졌다. 검출기의 잡음 특성인 NEP(noise equivalent power)는 별도로 측정된 수신단의 평균 잡음 전압값 및 앞서 얻어진 반응도의 비율로 구해졌다. 이와 같이 얻어진 단일 픽셀의 주파수에 따른 전기적 특성이 그림 3에 나타나 있다. 반응도는 580~600 GHz의 주파수 범위에서 1,000 V/W 이상의 값을 보였으며, 593 GHz에서 최대값 1,570 V/W를 나타내었다. NEP의 경우에는 동일한 주파수 범위 내에서 150 pW/Hz^{0.5}보다 낮은 수준을 유지하였으며, 역시 593 GHz에서 최소값 95 pW/Hz^{0.5}을 나타내었다.

III. 배열 검출기

설계된 단일 픽셀 검출기 36개를 6×6 형태로 배열하여 배열 검출기를 구성하였다. 그림 4에 보여진 바와 같이 배열 검출기는 단일 픽셀 검출기를 6개의 행과 열로 배치

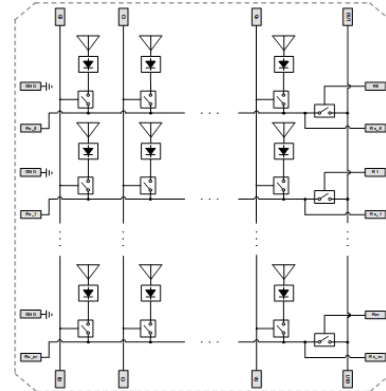


그림 4. 배열 검출기 구성도
Fig. 4. Schematic of the array detector.

하고 각 픽셀에 행 선택 스위치를, 각 행의 오른쪽 끝에 열 선택 스위치를 삽입하여 스위칭 구성에 따라 선택된 픽셀의 출력이 전체 배열 검출단의 출력으로 추출될 수 있도록 구성되었다. 스위치의 구동은 칩 주변에 배치된 신호 패드에 기반하여 와이어 본드를 통하여 외부로 연결된 단자를 통해 이루어질 수 있도록 설계되었다. 이러한 구성을 통해 실제 이미징 과정에서는 각 개별 픽셀이 순차적으로 선택이 되고, 이러한 출력을 외부 PC의 신호 처리를 통해 순차적으로 정리한 후 2차원 배열로 재구성하여 이미지를 얻을 수 있게 된다.

배열 검출기를 실제 이미징에 활용하기 위해서는 외부 구동 회로가 포함된 패키징이 필요하다. 그림 5는 제작된 배열 검출기 칩과 외부 회로가 포함된 PCB(printed circuit board) 패키지를 보여주고 있다. 칩의 크기는 1.85×1.85 mm²이며, 주변에 형성된 와이어 본드의 일부가 사진에

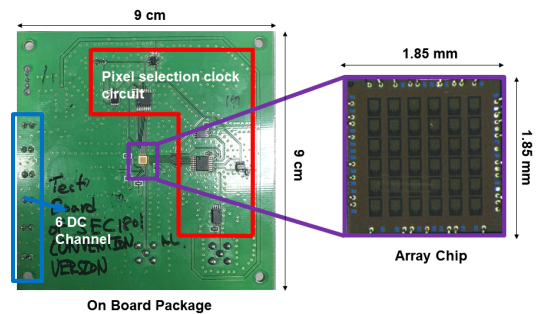
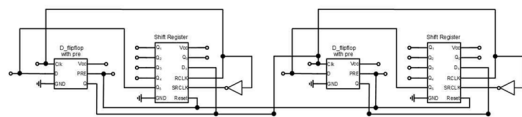


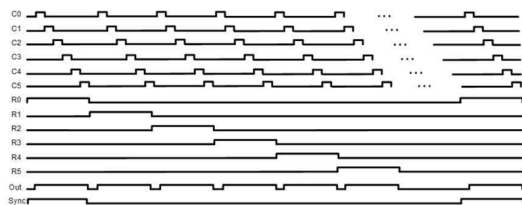
그림 5. PCB 패키지와 제작된 배열 검출기 칩 사진
Fig. 5. PCB package and chip photo of the array.

함께 보여지고 있다. PCB상에는 기판 중심에 위치한 배열 검출기 주변에 검출기를 구동하기 위한 픽셀 선택 클록 회로와 6개의 DC 채널이 배치되어 있다. 픽셀 선택 클록 회로의 회로도 및 타이밍 다이어그램은 그림 6에 나타나 있다. 클록 회로는 두 개의 링 카운터로 구성되어 있으며, 각 링 카운터는 초기 신호를 생성하는 D 플립플롭과 생성된 신호를 이동시키는 시프트 레지스터로 구성되어 있다. 이와 같은 링 카운터 두 개를 연결하여 픽셀 선택 클럭 생성기가 구성된다. 이 신호에 따라 행 신호와 열 신호가 동시에 켜졌을 때 해당되는 개별 픽셀이 선택되고, 해당 픽셀 검출단의 신호가 칩 전체 출력단에 나타나게 된다.

이미징 실험 이전에 검출 배열기에 포함된 모든 단일 픽셀 검출기의 전기적 특성을 측정하였다. 특성을 측정하기 위한 셋업은 앞 장에서 기술한 바와 같으며, 측정을 위해 선택된 해당 픽셀이 신호 발생단에서 방사된 가우시안 빔의 중심에 위치할 수 있도록 하기 위해, 검출단에 연결된 이동식 스테이지를 활용하여 빔 정렬을 수행하였다. 그림 7에 반응도 측정 결과가 나타나 있다. 각 픽셀의 위치에 따른 반응도 분포와 함께 각 반응도 구간에 포함되는 픽셀 수를 표시한 히스토그램이 보여지고 있다. 참고로 그림에 나타난 측정값은 모두 가장 높은 반응도를 나



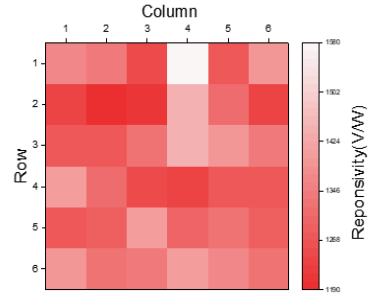
(a) 픽셀 선택 클록 회로의 회로도
(a) Schematic of the pixel selection clock circuit



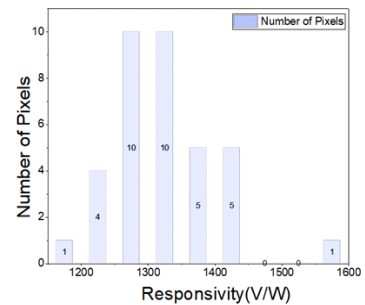
(b) 타이밍 다이어그램
(b) Timing diagram

그림 6. 픽셀 선택 클록 회로

Fig. 6. Pixel selection clock circuit.



(a) 측정된 픽셀별 반응도
(a) Measured responsivity



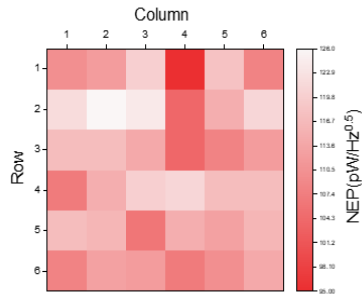
(b) 분포도
(b) Distribution

그림 7. 측정된 반응도 및 분포도

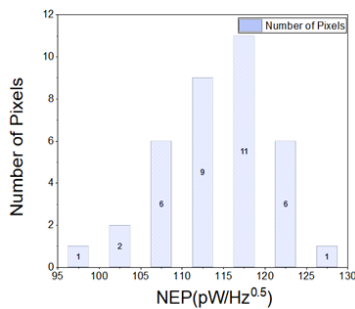
Fig. 7. Measured responsivity and distribution.

타낸 593 GHz 에서의 값이다. 반응도는 픽셀에 따라 다소 편차를 보이고 있으며, 전체적으로는 1,190 V/W에서 1,580 V/W에 이르는 범위의 값을 보여주었고, 평균값은 1,320 V/W로 나타났다. 전체 36개의 픽셀 중 절반이 넘는 20개의 픽셀이 1,250~1,350 V/W의 구간에 포함이 되는 것으로 나타났다. 그림 8에는 NEP의 측정 결과가 유사한 형식으로 보여지고 있다. 역시 픽셀에 따라 다소의 편차를 보이고 있으며 최저 95 pW/Hz^{0.5}에서 최고 126 pW/Hz^{0.5}에 이르는 범위의 값을 보여주었고, 평균 값은 114 pW/Hz^{0.5}로 나타났다. 이 중 절반이 넘는 19개의 픽셀이 110~120 pW/Hz^{0.5}의 구간에 포함된 것으로 나타났다. 이 값들은 기존 유사 주파수 대역의 배열 검출기 구조 결과 대비, NEP값은 다소 높으나 반응도 측면에서 상당히 우수한 것으로 나타나고 있으며, 이러한 경향성은 설계의 최적화 방향에 따라 결정될 수 있는 요소로 보여진다^[13].

개별 픽셀마다 성능 차이가 생기는 이유로는 칩 면적



(a) 측정된 픽셀별 NEP
(a) Measured NEP



(b) 분포도
(b) Distribution

그림 8. 측정된 NEP 및 분포도
Fig. 8. Measured NEP and distribution.

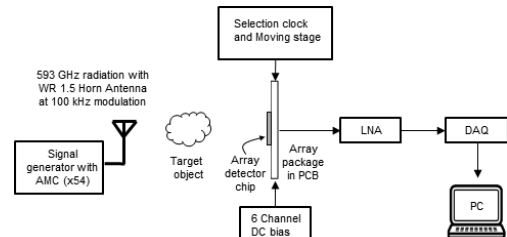
내에서 각 픽셀의 위치가 상이함에 따라 픽셀 내 안테나에 대한 전자기적 환경이 다르고, 이에 따라 상대적인 방사 특성과 이에 따른 안테나 이득값이 다르다는 점을 먼저 들 수 있겠다. 추가적으로 각 픽셀로부터 칩 출력단에 이르는 데이터 경로가 다름에 따라 나타나는 경로 내 손실의 차이를 들 수 있고, 아울러 제작 공정에서의 위치에 따른 편차에 의한 영향도 함께 언급할 수 있겠다. 이런 편차는 다음 장에 기술할 실제 이미징에 있어서는 각 픽셀의 특성을 반영한 보정을 통해 그 영향이 대부분 제거될 수 있다.

IV. 이미징 실험

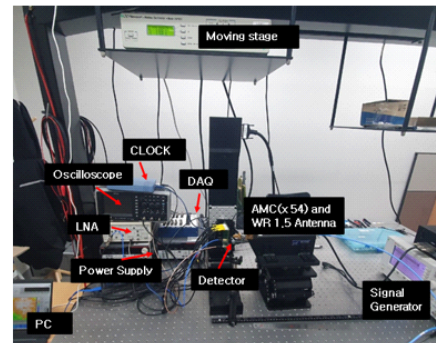
THz 이미징에서 흔히 적용되는 단일 픽셀 검출기 기반 투과 이미징은 신호 발생기에서 방사된 THz 빔이 렌즈를 통하여 대상 물체의 한 지점에 집속되고, 대상 물체를 통

과한 빔이 다시 신호 검출기에 집속, 검출됨으로써 이루어진다. 이 때 대상 물체의 2D 이미지를 얻기 위해서는 필연적으로 물체를 래스터 스캔하는 과정이 필요하다. 이와 달리 배열 검출기를 활용하는 경우에는 래스터 스캔이 생략된 실시간 이미지 추출이 가능하다. 단지 이 경우에도 배열 검출기의 픽셀 수가 충분히 크지 않다면 추출된 실시간 이미지의 해상도는 만족스럽지 않을 것이다. 이런 경우에 있어 배열 검출기를 적용하는 또 하나의 방안은 완전한 실시간 이미징은 아니되, 기존의 이미징 소요 시간을 크게 단축하는 용도로 활용하는 것이다. 즉 래스터 스캔 방식을 유지하되 배열의 특성을 활용하여 래스터 스캔 스텝 수를 크게 줄일 수 있다. 본 연구에서는 개발된 6×6 배열 검출기를 이러한 이미징 모드에 적용하여 이미징을 수행하였다.

본 실험에 적용된 이미징 실험 셋업이 그림 9에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험에서는 렌즈를 배



(a) 개요도
(a) Schematic



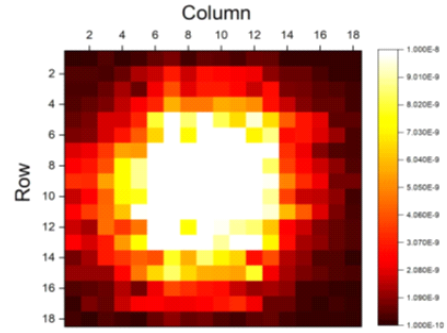
(b) 사진
(b) Photo

그림 9. 이미징 실험에 사용된 셋업
Fig. 9. Setup for imaging experiment.

제하고 신호 발생기에서 방사된 THz 빔이 대상 물체를 거친 후 곧바로 배열 검출단이 위치한 지점에 이르는 구조를 적용하였다. 이때 물체의 이미지가 형성되는 전체 면적은 하나의 배열 검출기의 크기보다는 크지만, 검출기의 래스터 스캔을 통해 조사되는 대상 물체의 이미지 영역을 모두 커버할 수 있다. 이러한 셋업에서 주의할 점은 대상 물체의 단면이 물체를 통과하는 가우시안 빔 영역 내에 모두 포함이 되어야 한다는 점이며, 이 영역의 범위는 신호 발생단 혼 안테나 개구면에서의 빔 웨이스트 및 물체와의 거리, 그리고 사용된 파장에 기반하여 예측이 가능하다^[4].

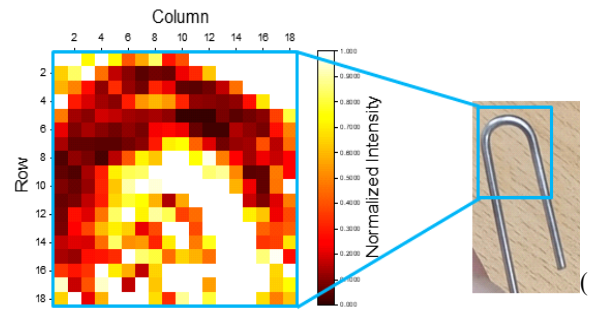
이러한 형식의 이미징 셋업과 앞서 기술한 단일 픽셀 검출기 래스터 스캔 기반 셋업과 다른 큰 차이점이라 하면 신호 발생단에서 방사된 RF 전력의 일부만이 검출단에 입사한다는 점을 들 수 있다. 기존의 단일 픽셀 검출기 기반 셋업은 신호 발생단과 검출단 앞에 렌즈가 위치하고 있어 신호 발생단에서 방사된 RF 전력의 대부분이 검출단에 도달하게 된다. 반면 본 실험에 사용된 배열 검출기 기반 셋업의 경우 하나의 픽셀 검출기에 도달하는 전력은 방사된 전체 전력의 아주 일부에 불과하다. 따라서 유사한 수준의 신호대잡음비를 얻기 위해서는 검출단의 반응도가 크고 신호 발생단의 방사 전력이 커야 한다. 사용된 VDI AMC(amplifier multiplier chain)는 데이터 시트 상 600 GHz 근방에서 최대 -5 dBm의 방사 출력을 보이는 것으로 나타나 있다. 이때 신호 발생단의 안테나 이득 25 dBi를 고려하면 EIRP(equivalent isotropic radiation power)는 약 20 dBm에 이를 수 있으나, 실제로는 이보다는 낮은 수준일 것으로 추정된다. 이에 부가하여 이미징 품질을 높일 수 있는 방법은 검출단에서의 신호 누적 시간의 확장이며, 이는 클럭 생성기의 속도를 조절하여 보완 가능하다.

그림 10은 제작된 배열 검출단을 이용한 이미징 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 10(a)는 대상 물체 없이 배열 검출기를 3×3 크기로 래스터 스캔한 기준 이미지이며, 단위 영역별로 약 3초의 래스터 스캔 소요 시간을 할당하였다. 6×6의 배열검출기를 3×3으로 스캔함에 따라 그림의 이미지는 총 324픽셀(18×18)로 구성되어 있으며, 단일 배열 검출기의 검출 면적이 1.5×1.5 mm²임에 기반하면 이미



(a) 기준 빔 이미지

(a) Image of the reference beam



(b) 금속 클립 이미지

(b) Acquired image of a metallic clip

그림 10. 측정된 이미지

Fig. 10. Acquired images.

징된 영역은 4.5×4.5 mm²이다. 예상대로 THz 빔의 특성인 가우시안 형태가 잘 나타나고 있으며, 실제 이미징에서는 대상 물체가 가우시안 빔 프로파일 내에 충분히 들어올 수 있는 크기로 한정하였다. 그림 10(b)는 금속 클립을 대상 물체로 하여 클립의 상단 일부를 이미징한 결과이다. 금속 부분을 투과하지 못한 영역은 낮은 출력 전압으로 어둡게, 금속 부분을 벗어나 투과한 영역은 높은 출력 전압으로 밝게 나타남에 따라 대략적인 클립의 형태를 보여 주고 있다. 이 그림은 앞서 언급한 보정이 적용된 결과이며, 보정은 실제 각 픽셀에서 출력된 전압값을 표준 이미지에서의 해당 픽셀 출력값으로 나누어 얻어졌다. 얻어진 이미지는 하나의 예시이며, 구성된 이미징 셋업에 기반하여 래스터 스캔의 범위를 확장하면, 더 넓은 영역의

이미징에도 적용 가능할 것으로 예상된다.

V. 결 론

본 논문에서는 65-nm CMOS 공정에 기반한 600 GHz 주파수 대역 6×6 배열 검출기를 개발하였다. 단일 픽셀 검출기는 공통 게이트 차동 쌍 구조에 기반하여 구성이 되었으며, 차동 패치 안테나가 집적된 형태로 개발되었다. 단일 픽셀 검출기 36개를 행과 열이 동일한 픽셀 수로 배치하고, 각 픽셀을 선택할 수 있는 행/열 선택 스위치 및 신호 경로를 집적하여 배열 검출기가 완성되었다. 전기적 특성 측정 결과, 600 GHz 근방에서 1,320 V/W의 평균 반응도, 114 pW/Hz^{0.5}의 평균 NEP를 보였으며, 픽셀 간 편차는 존재하나, 배열 전체에 걸쳐 비교적 고른 특성을 보이는 것으로 나타났다. 제작된 배열 검출기에 기반하여 600 GHz 대역의 투과 이미징 실험을 진행하였으며 레스터 스캔을 적용한 이미징에 있어서 단일 픽셀 검출기에 비해 훨씬 이미징 시간을 줄일 수 있었다. 또한 제작된 검출기를 결합하여 다중 칩 배열 검출기를 구성하는 경우 전체 픽셀 수를 높여 높은 해상도를 얻을 수 있을 것으로 예상된다^[11].

References

- [1] J. S. Rieh, *Introduction to Terahertz Electronics*, Cham, Springer, 2021.
- [2] J. S. Rieh, "Terahertz signal sources based on semiconductor electronic devices," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 6, pp. 505-516, Jun. 2021.
- [3] J. Yun, S. J. Oh, K. Song, D. Yoon, H. Y. Son, and Y. Choi, et al., "Terahertz reflection-mode biological imaging based on InP HBT source and detector," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 274-283, May 2017.
- [4] H. B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Chen, and X. C. Zhang, "Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security application," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 8, pp. 1514-1527, Aug. 2007.
- [5] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," in *Optics Express*, vol. 11, no. 20, pp. 2549-2554, Oct. 2003.
- [6] A. Redo-Sanchez, N. Karpowicz, J. Xu, and X. C. Zhang, "Damage and defect inspection with terahertz waves," in *The 4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, North Dartmouth, MA, Jun. 2006, pp. 66-67.
- [7] J. Kim, D. Yoon, J. Yun, K. Song, M. Kaynak, and B. Tillack, et al., "Three-dimensional terahertz tomography with transistor-based signal source and detector circuits operating near 300 GHz," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 482-491, Sep. 2018.
- [8] J. Kim, D. Yoon, H. Son, D. Kim, J. Yoo, and J. Yun, et al., "Terahertz signal source and receiver operating near 600 GHz and their 3-D imaging application," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 5, pp. 2762-2775, May 2021.
- [9] D. Yoon, J. Kim, J. Yun, M. Kaynak, B. Tillack, and J. S. Rieh, "300-GHz direct and heterodyne active imagers based on 0.13-μm SiGe HBT technology," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 536-545, Sep. 2017.
- [10] K. Song, J. Kim, D. Kim, J. Yoo, and J. S. Rieh, "A 300-GHz CMOS 7-by-7 detector array for optics-less THz imaging with scan-less target object," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 41, pp. 202-214, Jan. 2020.
- [11] K. Song, D. Kim, J. Kim, J. Yoo, W. Keum, and J. S. Rieh, "A scalable 300-GHz multichip stitched CMOS detector array," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 3, pp. 1797-1809, Mar. 2022.
- [12] M. Cho, J. Cho, K. Song, D. Kim, J. Kim, and J. S. Rieh, "600 GHz 6×6 array imaging detector in 65nm

CMOS," in *2021 Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science Winter Conference*, Yeosu, Feb. 2021.

- [13] M. Bauer, S. Boppel, A. Lisauskas, V. Krozer, and H. G. Roskos, "Real-time CMOS terahertz camera employing plane-to-plane imaging with a focal-plane array

of field-effect transistors," in *2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz)*, Mainz, Sep. 2013, pp. 1-2.

- [14] P. F. Goldsmith, *Quasioptical Systems*, New York, NY, Springer, 1998.

조 민 제 [Anapass/연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-2601-3711>



2020년 2월: 고려대학교 전기전자공학부 (공학사)
2022년 2월: 고려대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2022년~현재: Anapass Analog Team 연구원
[주 관심분야] PLL 및 CDR

이 재 성 [고려대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0163-1640>



1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 12월: Univ. of Michigan EECS (공학박사)
1999년~2004년: IBM Semiconductor R&D

Center

2004년~현재: 고려대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] 밀리미터파 및 THz 회로 및 시스템

김 도 윤 [삼성전자/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4080-4076>



2016년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2023년 2월: 고려대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2023년~현재: 삼성전자 S.LSI 사업부 연구원
[주 관심분야] 밀리미터파 및 THz 시스템

및 회로