

## 모델링을 통한 테라헤르츠 신호검출기 설계

김영호, 박동우, 이의수

한국전자통신연구원

youngho, dwpark, euisu@etri.re.kr

## Design of a THz Signal Detector Based on Modeling

Kim Young Ho, Park Dong Woo, Lee Eui Su

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

## 요약

본 논문에서는 주요 테라헤르츠 기술개발로서 THz 전자기파 신호세기를 검출하는데 사용하는 고감도 THz 신호검출기의 설계 과정을 담고있다. 설계된 THz 신호검출기는 쇼키베리어 다이오드(Schottky Barrier Diode; SBD)를 신호검출 코어센서로 적용하였으며, 특히 낮은 전계에서도 높은 전자 이동도를 가지고 있어 무전원 바이어스에서 동작이 가능 InGaAs SBD를 본 신호검출기의 비선형 센서로 사용하였다. EM해석 툴을 사용하여 SBD를 포함한 RF E-probe, RF&DC ground회로, SBD 입출력 매칭회로, 필터회로를 InP기판위에 최적화 설계하였으며, 최종적으로 이들 모두를 회로 모델링하여 THz 신호검출기 설계에 반영하였다. 모델링으로 추출된 회로블록을 회로 시뮬레이션 플랫폼(EDA tool)에서 설계하려는 THz 신호검출기의 동작과 성능 특성을 예측하고 평가하는 설계환경을 구축하였다. 최종 모듈에 사용된 InGaAs SBD소자는 1.0um의 쇼키정선 반지름으로 최적의 Responsivity를 갖도록 고려하였다. 설계된 최종 InP유전체 회로모듈의 사이즈는 가로/세로/높이가 0.812×0.4×0.08mm<sup>3</sup>로 매우짧은 길이를 가진다.

## I. 서론

일반적으로 0.03~3mm의 파장을 갖는 테라헤르츠 스펙트럼 대역은 비금속 물질을 투과하는 특성, 물질 고유의 테라헤르츠 흡수 스펙트럼 특성과 초광대역 특성 등을 가지고 있어 의료진단, 보안검색, 물질분석, 초고속 데이터 통신 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 이러한 응용 가능성으로 인해 테라헤르츠 소자기술은 과학적, 산업적, 국가적으로 중요한 위치를 차지하고 있다. 본 논문에서는 테라헤르츠 대역의 전자기파 신호 강도를 측정하고 감지할 수 있는 테라헤르츠 신호검출기 설계 방법을 소개한다. 특히 테라헤르츠 대역에서 모든 회로들을 모델링하여 전기적 특성을 평가하고 설계하는 접근방법을 소개하고자 한다.

## II. 본론

테라헤르츠 주파수 대역의 신호를 검출하기 위해 다양한 유형의 검출 센서가 연구되고 있다. 이 가운데 쇼트키 베리어 다이오드(SBD)는 테라헤르츠 신호를 검출할 때 뛰어난 신호응답도(Voltage Sensitivity)를 나타낼 뿐만 아니라, 상온에서도 안정적인 특성을 보이기 때문에 활용성이 우수하다. 또한 제조공정이 단순하고 소형화에 유리해 1THz이하의 테라헤르츠 파워검출기의 핵심 센서로 적합하다[1][2]. 특히 제로 바이어스 모드에서 센싱 동작할 수 있는 InGaAs SBD는 전력소비를 줄이고 시스템의 복잡성을 낮출 수 있다.

## A. 테라헤르츠 파워검출기 구조

그림 1은 본 논문의 테라헤르츠 신호검출기의 회로블록의 구성을 보여주고 있다. 기본적으로 핵심 센서소자인 SBD를 중심으로 테라헤르츠 신호를 효율적으로 검출하기 위해서 다양한 회로블록(표준 RF도파관을 포함하는 RF E-probe, RF&DC ground회로, SBD 입출력 매칭회로, 필터회로)이 구성되어 있다. 본 구조는 종래의 가상접지방식보다 설계오차가 작고 단지 한 방향만 SBD 매칭 네트워크 회로가 필요하기 때문에 회로가 더욱 단순해지고 유전체 길이/손실을 최소화한다.

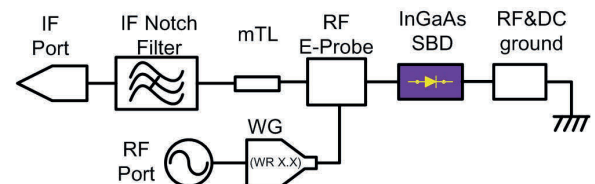


그림 1. 테라헤르츠 신호검출기 회로블록 구성도

## B. InGaAs SBD 소자 및 기타회로 모델링

InGaAs SBD는 고속 응답특성과 우수한 감도로 테라헤르츠 영역 신호 검출에 활용되며, 비선형 전류 변화를 통해 효과적인 검출 기능을 수행한다. GaAs 기반 SBD 대비 잡음지수가 다소 높은 특성이 있으나, 낮은 전계 환경에서도 탁월한 전자 이동도를 유지하므로 문턱전압을 제공하지 않아도 안정적인 검출동작을 수행할 수 있다. 이러한 특성은 시스템 구조를 간소화하고 전력소모를 개선하는 데 중요한 장점을 가진다.

테라헤르츠 대역 같은 높은 주파수에선 그 이하의 주파수에서의 회로 해석인 Lumped-element Equivalent Circuit Model 같이 모델링하는 방법과 달리 아주 복잡한 기생성분들이 수없이 만들어지기 때문에 이 영향을 정교하게 모델링하기 위해 본 설계에서는 앞선 문헌[3]에 소개된 모델링과 같이 비선형 성분과 선형 성분으로 나누어 각각 추출하고 이를 결합하는 방법으로 SBD소자를 정의하였다. 또한 기타 설계되는 다른 회로들도 EM해석이 가능한 FEM을 방식의 HFSS툴을 이용하여 고주파 성분들을 모두 주파수 해석하여 S-파라미터로 데이터화하여 추출하였다.

그림 2는 본 논문에서 모델링하여 전기적 특성을 평가하려고 하는 테라헤르츠 신호검출기 구조이다. InGaAs SBD를 포함한 모든 회로(Filter회로, Matching Network회로, E-probe, RF&DC ground회로)들은 III-V족 화합물 반도체인 InP 기판내에 모두 집적화(Monolithic)로 공정/제작하여 설계오차와 제작비용을 줄이도록 하였다. 각각의 회로들은 HFSS툴을 이용하여 최적화 설계를 하였으며 특히 Filter는 테라헤르츠 신호가 신호검출기의 출력되는 것을 차단하는 기능을 수행하는데 종래의 복잡하고 공

간을 많이 차지하는 LPF나 BPF대신에 Notch 필터구조를 선택하여 작은 면적으로 회로적 기능을 수행하도록 하였다. 제작될 최종 InP 유전체 회로모듈의 사이즈는 가로/세로/높이가  $0.812 \times 0.4 \times 0.08 \text{ mm}^3$ 를 가진다.

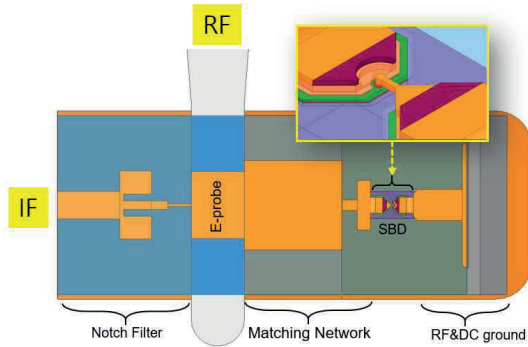


그림 2. 테라헤르츠 신호검출기 구조

### C. 특성평가 시뮬레이션 환경구축

본 연구에서 설계된 InGaAs SBD소자를 사용한 Zero-bias THz 신호 검출기는 표준 WR-3.4 도파관 사이즈를 갖는 RF 도파관과 Notch Filter, E-probe 및 RF&DC ground Circuit를 모두 모델링하여 그림 3 같은 시뮬레이션 테스트 베드를 구축하였다. 입력신호는 테라헤르츠 신호(300GHz)에 기준신호로 300MHz로 OOK(On-Off Keying)변조하여 테라헤르츠 신호가 유입되도록 하였다. 이는 SBD를 사용하는 THz 신호검출기는 직접 DC근처의 검출신호를 사용할 경우 해당주파수 대역에 매우 큰  $1/f$  noise (flicker noise)때문에 SNR특성이 좋지못하기 때문에  $1/f$ (flicker) noise 대역 너머로 기준 신호를 이동(변조)시켜, 검출기의 노이즈특성을 나타내는 NEP(Noise-Equivalent Power)를 효과적으로 개선하기 위함이다.

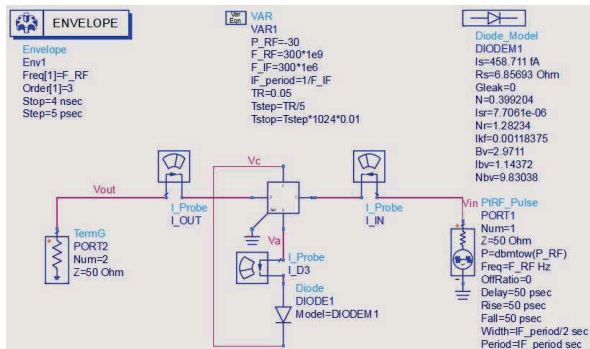


그림 3. 테라헤르츠 신호검출기의 특성 시뮬레이션 환경

그림 4는 본 신호검출기의 Envelop 시뮬레이션 결과를 보여준다. 대략 17.5mV를 가진 캐리어신호(300GHz THz신호)가 입력(약 0.43uW)되었을 때 50Ω Load조건에서 0.239mV의 검출성능을 가진다.

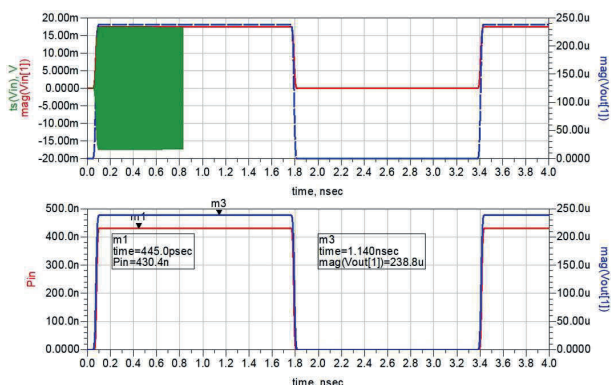


그림 4. 테라헤르츠 신호검출기의 검출특성 시뮬레이션

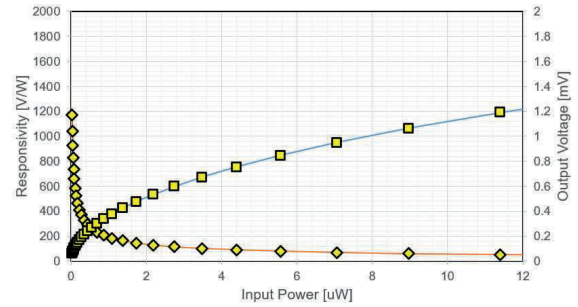


그림 5. 설계된 테라헤르츠 신호검출기의 Responsivity특성

그림 5는 앞서 Envelop 시뮬레이션을 통해 추출한 설계된 테라헤르츠 신호검출기의 Responsivity특성을 보여준다. 입력 신호전력의 크기가 작을수록 Responsivity특성이 좋아지는 것을 알 수 있다. 이는 InGaAs SBD의 고유 Responsivity특성 그래프와도 잘 일치하는 결과이다. 설계에 사용된 InGaAs SBD소자는 1.0um의 쇼키정선 반지름을 갖는다. Responsivity특성을 키우기 위해 Road저항을 키우면 검출전류와 결합하여 비례적으로 커지는 것을 확인하였다.

### III. 결론

본 논문에서는 높은 Responsivity, 낮은 NEP, 빠른 응답속도 및 시스템의 단순화 모두를 위하여 InGaAs SBD를 코어 검출소자로 선택하였으며 테라헤르츠 전자기파 신호의 세기를 검출할 수 있는 신호검출기를 모델링기법을 적용하여 테라헤르츠 주파수에서도 동작이 원활한지 확인하였다. 최종적으로 특성평가 시뮬레이션 환경을 구축하여 특성을 예측하는 설계방법을 THz 신호검출기 설계에 반영되었다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구 논문은 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음. [25ZB1320, 광전소자 기반 THz 근접장 센싱 및 필드 시각화 원천 기술 개발]

### 참 고 문 헌

- [1] Xiaojian Fu al. "Applications of Terahertz Spectroscopy in the Detection and Recognition of Substances," Frontiers in Physics, 2022, Vol 10, 869537, Sec. Optics and Photonics <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.869537>
- [2] Ali Shekari al. "Applications of Terahertz Technology: A Comprehensive Review of Advances and Future Prospects," ResearchGate. 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1008569
- [3] 김영호 외. "제로-바이어스 300GHz 테라헤르츠 파워검출기 설계" 2024년도 한국통신학회 하계종합학술대회 논문집: ISSN:2383-8302 Vol. 84.