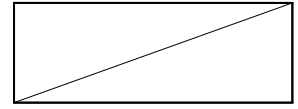


2017년 12월


17ZR1500



## 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발

Research on The Tunable Terahertz Transceiver Technologies

# 세부과제 연차실적 보고서

연차실적 보고서						
과제유형	1. 기초미래선도형 ( ○ )    2. 공공인프라형 (   )    3. 산업화형 (   )					
대과제명	방송·미디어 기초·원천 기술개발					
세부과제명	튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발					
세부과제 책임자	소속 및 부서	테라헤르츠창의원천연구 실	직위 (직급)	실장 (책임연구원)		
	성명	박경현				
총연구기간	2017년 01월 01일 부터 2019년 12월 31일 까지 (36개월)					
당해연도 연구기간	2017년 01월 01일 부터 2017년 12월 31일 까지 (12 개월) (1차년도)					
총 연 구 비	정부출연금	3,030,000천원		당 해 연 도 연 구 비	정부출연금	1,010,000천원
	민간부담금	0천원			민간부담금	0천원
	계	3,030,000천원			계	1,010,000천원
참여인력(M/Y)	총 연구 기간		27 명 ( 15.0 M/Y)			
	당해연도 연구기간		10 명 ( 4.6 M/Y)			
참여기관	기관명	연구책임자	기관명	연구책임자		
참여연구기관						
위탁연구기관						
키워드 (6~10개)	테라헤르츠파 발생기, 테라헤르츠 검출기, 테라헤르츠 트랜시버, 튜너블 테라헤르츠 트랜시버, 비팅광원, 포토믹서, 쇼트키다이오드, 파면제어					
<p>정부출연금사업 연차평가 보고서를 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">2017년 12월 08일</p> <p style="text-align: right;">세부과제책임자 : 박 경 현 직 할 부 서 장 : 안 치 득</p>						
<p>한국전자통신연구원장 귀하</p> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;">  </div>						

# 요 약 문

## I. 제목

ETRI 창의연구실 사업 (포토닉스 기반 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발)

## II. 연구목적 및 중요성

미래 핵심 기술이자 차세대 핵심 주파수원인 테라헤르츠 전자기파를 이용한 영상, 분광 및 통신 기술 구현을 목표로 초소형, 저가격, 다기능 등의 특성을 제공하는 포토닉스 기반의 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발을 추진하고, 향후 테라헤르츠 포토닉스 분야의 발전에 기여하고자 한다.

## III. 연구내용 및 범위

포토닉스 기술 기반의 테라헤르츠 신개념 신소자를 창출하기 위하여 증폭기 집적형 초소형 비팅광원, 고효율 테라헤르츠파 발생용 포토다이오드, MBE장비를 활용한 저온성장 GaAs, InGaAs의 PCA(photoconductive antenna), 나노구조 기반 테라헤르츠파 발생 및 신개념 검출 소자, 고효율 쇼트키 다이오드, 그래핀 기반 소자 및 양자폭포 레이저 등의 테라헤르츠 기술 확산에 필수적인 대부분의 단위 소자와 이를 활용하여 세계 최초 초고 수준의 산업용 응용시스템 개발을 추진 중에 있다. 또한, 테라헤르츠 파면제어 기술 개발을 추진 지금까지 제공되지 못한 신개념의 테라헤르츠파 제어를 통한 특정 영역의 테라헤르츠 영상·분광 정보를 획득하거나 물리기반 암호전송 기술을 연구 중이다.

## IV. 연구결과

당해연도 연구개발 목표인 집적형 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발과 관련하여, 테라헤르츠파 발생 및 검출 소자 성능 향상을 우선적으로 추진하여 line-of-sight 시스템을 구축하였고, 그 결과 쇼트키다이오드로 측정된 테라헤르츠파 출력이 275GHz 대역에서 50 $\mu$ W 수준으로 크게 향상되었다. 광에 의해 발생된 포토캐리어들의 적절한 제어를 통하여 성능 향상을 확보하였다. 추가적인 활성층 구조개선, 어레이형 소자 개발 등이 계획되어 있어 최종적으로 1mW급의 튜너블 테라헤르츠파 발생기술을 개발하는 목표를 갖고 있다. 포토닉스 소자에 이어 초고주파 소자인 쇼트키 다이오드의 성능 향상을 지속적으로 추진하여 실리콘 렌즈 탑재 모듈의 Responsivity 특성이 1000V/W 수준에 도달하였다. 대역 확대 및 고감도 확보를 위한 sub-마이크론 공정 기술과 옴릭 특성 향상을 추진중에 있어 차년에는 보다 안정적이고 고품위의 테라헤르츠파 검출 소자가 개발될 것이다. 무엇보다도 올해에는 혼안테나형 모듈 개발을 위한 RF 설계 및 시

제 모듈 제작이 완료된 점은 고무적이라 할 수 있다. 처음으로 추진한 RF 모듈 특성 설계, GSG 신호선상의 칩 플립칩 공정 확보 등은 개발될 쇼트키다이오드 모듈의 경쟁력 향상에 큰 기여를 할 것으로 예상된다. 차년도 특성 향상을 추진하여 개발될 검출 모듈을 산업용 테라헤르츠 비파괴 측정 시스템에 장착할 계획이다.

테라헤르츠 분광시스템 응용을 위해 0.3~2 THz의 광대역 파장 가변 범위가 요구되고 있으며, 이는 기존의 DML에서 제공하는 파장가변범위로는 확보하기 어려운 수준으로, 대부분이 1.5 THz 튜닝 범위를 보여 주고 있는 실정이다. 마이크로 히터 방식의 튜닝은 레이저 스펙트럼의 발진 선폭 변함없이 튜닝이 가능한 방법이나, 활성층의 이득이 온도에 의해 쉽게 장파장으로 이동하여 튜닝 범위의 제한이 따른다. 이를 비대칭 양자우물 구조로 개선하여 광대역, 고출력의 비팅광원을 개발한 건은 포토닉스 기반의 테라헤르츠 핵심 소자 기술의 안정성 확보에 큰 기여를 할 것이다. Spot-size converter를 적용하고 효율을 개선하여 안정적인 비팅광원 튜닝 특성을 얻었으며, 집적된 광증폭기의 포화 광 출력이 17dBm 이상을 보이는 고출력 비팅광원을 새롭게 개발하였다. 24시간 이상 연속 동작 실험을 통해 개발된 비팅광원 모듈의 안정성을 실험적으로 확인 하였다. 고출력 비팅광원은 쇼트키다이오드를 활용한 테라헤르츠파의 직접 검출시 더 이상 외부 광증폭기를 사용하지 않아도 되는 수준으로 향후 시스템의 소형화, 저가격화에 큰 기여를 할 것으로 예상되며, 모듈화 과정이 현재 진행중이다.

튜너블 테라헤르츠파 발생 모듈의 핵심인 안테나 집적형 광·전 변환기인 UTC-PD 포토믹서는 흡수 구조 개선을 통하여 특성을 향상시켰다. 현재 시판중인 동급의 모듈이 출력 10 $\mu$ W/300GHz 모듈이 NEL에서 이천만원에 판매되고 있는 실정을 고려하였을 때 특성 개선은 매우 중요하다. 작년 25 $\mu$ W 개발 목표 달성에 이어 올해는 50 $\mu$ W 출력 달성이라는 어려운 목표를 수립, 연구를 수행하였다. 적분구 기술이 아직 정립되지 않은 관계로 검출기의 특성을 고려하여야 하지만, 칼로리미터를 활용하여 측정된 출력이 275GHz 이상에서 50 $\mu$ W 출력을 확보하였다. 차년도에는 100 $\mu$ W출력 확보를 위한 연구를 수행할 예정이다. 현재까지 포토믹서 및 쇼트키다이오드 개발에 활용되는 반도체 결정성장 장비(MOCVD)의 낮은 도핑 레벨로 인해, 타 연구그룹과 비교하였을 때 본실에서 개발한 소자들은 공통적으로 비교적 높은 저항을 갖고 있으며, 이는 광대역 및 고효율 특성 확보를 위해서는 해결하여야 할 숙제이다. 최근 1x10<sup>19</sup> 정도의 높은 도핑 농도를 갖는 결정성장법을 자체적으로 확보, 2018년도 소자 개발에 적용이 예정되어 있어 그 결과가 매우 기대된다. 현재 개발된 테라헤르츠파 발생 및 검출 소자의 옴 저항을 최대 5~10배 수준으로 떨어뜨릴 수 있을 것으로 기대되며, 이로 인한 비약적인 특성 향상이 예상된다.

UTC-PD를 포토믹서 성능이 안정된 수준으로 발전함에 따라, 이를 튜너블 테라헤르츠파 발생소자로 사용하고, 수신부를 시스템 응용에 따라 호모다인 및 직접 검출 방식을 적용할 수 있도록 구성한 광대역 테라헤르츠 분광·영상 플랫폼을 개발하였다. 플랫폼 구성에 있어서 소자의 구동 및 제어, 측정된 영상·분광 고속 신호 처리 보드

를 자체 개발 완료하여 플랫폼에 장착하여, 기존 개발한 세상에서 가장 작은 테라헤르츠 분광시스템에 이어 더욱 더 소형화가 가능한 수준으로 발전 시켰다. 몇몇 테라헤르츠 상용회사를 제외한 대부분의 연구그룹이 실험실 수준에서 테라헤르츠 기술 가능성을 제시하고 있는 현 기술 수준에서, 본 플랫폼을 활용한 테라헤르츠 기술은 그 산업 현장 적용이 현재 진행중에 있다.

2016년 12월 기술이전 한 테라헤르츠 비파괴 측정 기술에 본 개발된 영상분광 플랫폼 기술을 적용, 산업 현장의 근로자들에 의해 발생하는 실수들을 현장 환경에 구애를 받지 않고 실수 유무를 판정 할 수 있는 테라헤르츠 비파괴 측정용 영상시스템 시제품을 개발한 것은 큰 발전이라 할 수 있다. 이외에도 기술이전을 실시하면서 산업 현장의 대표적 애로기술인 물질 내 누수 현상을 검사할 수 있는 계측기를 개발하였다. 몇 년 전 자동차의 물 유입에 따른 자동차 리콜 사태를 겪은 국내 자동차 업계나 올해 같은 이유로 미국에서 진행된 B사의 리콜 사태는 업계에서 해결하여야 할 주요 현안으로 인식되고 있어, 무엇보다 개발의 시급성이 요구되는 현안이다. 올해의 시제품 개발에 이어 완성도 향상을 위한 다각도의 노력이 진행중에 있어 2018년 말 경 테라헤르츠 기술의 최초 산업 현장 진입이 예상된다. 현재 수밀 검사 적용에 이어, 향후 성능 향상에 따라 물질 내 오일, 가스 누출 검출계측기 등으로의 발전이 예상되는 파급효과가 매우 큰 원천기술이라 판단된다.

저온성장 물질의 한계를 벗어나기 위해 MOCVD 성장막 기반 나노전극 포토믹서를 연구하였다. 나노전극을 기존 소자 구조에 적용함으로써 전자 포집 효율을 높일 수 있었고, 결과적으로 MBE법을 이용한 저온성장 반도체 물질 없이도 테라헤르츠파 발생 및 검출 소자를 제작할 수 있다는 가능성을 보였다. 올해에는 최초로 나노 전극 기반의 호모다인용 연속파 테라헤르츠파 검출소자 및 쇼트키 다이오드와 같은 정류소자와 비교 가능한 수준의 나노전극 검출 소자를 개발하였고 현재 특성 향상을 위한 소자 특성 평가가 진행 중이다.

차세대 테라헤르츠 발생 소자로서 양자폭포 레이저 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 러시아 Moscow State University과의 긴밀한 협조로 에피택시 웨이퍼를 확보 금속-금속 본딩 기술을 활용한 QCL 소자 공정을 완료하여 지난해 구축된 저온 성장 측정시스템으로 측정을 하였다. 결과로는 3THz 대역의 고풍력 QCL 발전 특성 확보를 하지 못해 고품질의 에피택시 설계 검토 확보하지 못하였다. I-V 특성으로 소자의 균일도 및 성능을 예측 할 수 있어 추후 보다 개선된 QCL박막 성장된 웨이퍼를 확보 추진 할 예정이다.

## V. 기대성과 및 건의

테라헤르츠 분야 개척의 핵심인 광대역의 전파원 기술부터 검출기 소자 까지 전 연구영역을 확보를 추진하여 일정 영역에서 경쟁력을 확보하였다. 자체 개발된 핵심 소자 기술 이외에도 이를 활용한 고속 영상, 분광 및 통신용 플랫폼 기술을

자체적으로 개발하였다. 이를 통해 기존 상용 시스템에서 겪고 있는 안정성, 크기, 가격 등의 문제를 원천적으로 해결함으로써, 대표적 미래 기술로 인식되는 테라헤르츠 기술 선도를 통한 기존 산업 및 융합형 산업 창출이 가능할 것으로 기대된다. 올해에는 세계적 학술회의에서 두 번의 초청 논문 발표를 하였다. 하나는 광통신 분야에서 가장 유명한 학술회의인 OFC(optical fiber conference)이고, 다른 하나는 3년 마다 열리는 광학 기술 분야의 국회와 같은 ICO(Congress of the International Commission for Optics)에서 초청논문 발표 및 각국 대표자회의에 한국 대표로 참석한 것이다. 노벨상 등을 수상하거나 수상 예정자로 인정되는 유명 기초연설자 대부분이 장기간의 연구를 무엇보다 강조하고 있다. 새로운 분야 개척을 넘어 신개념의 기술들이 끊임없이 창출 될 수 있도록 꾸준하고 변함없는 집중력 있는 연구 추진이 무엇보다 중요하며, 이를 위한 연구원 차원의 지원이 필수적이다.

## 제 1 장 서 론

### 제1절 사업 개요

ETRI 창의연구실사업은 2017년 3단계 사업을 수행하고 있는 정부출연금 사업으로서, 최종 7개의 창의연구센터가 개설되었지만 2016년 연구원 조직 개편을 통하여 각 소로 분산 배치되어 최초 창의연구센터 사업 프로그램만이 현재 진행 중에 있다. 하지만 2017년 ETRI 주요사업 개편으로 볼 때 또 한 번 프로그램의 변화가 예상된다. 대부분의 창의연구센터 사업들이 없어지기보다는 타 주요사업으로 합병되어 연구과제들이 타 과제들과 차별화가 되지 않은 상태에서 진행될 것으로 예상된다. 당연히 창의연구실 프로그램의 최초 목표인 “세계 일등 연구개발을 통한 기술 선점” 달성에 로드맵 수정이 필요해 보인다.

### 제2절 사업 목표 및 내용

ETRI 창의연구실사업의 협약 형태의 변경이 2016년 발생하였고, 본 연구 수행 그룹의 명칭이 기존 ‘THz포토닉스 창의연구센터’에서 현재 ‘테라헤르츠창의원천연구실’로 변경 되었지만, 연구사업 목표는 변 없이 연속성을 가지고 추진되고 있다. ETRI 창의연구실 사업의 목표는 다음과 같다.

- 첫째, 혁신형 국가전략기술 개발을 위한 창의연구 사업선정 및 본격추진으로  
세계 최고의 원천기술을 단계별로 확보하고,
- 둘째, 선정된 창의연구 수행을 위한 세세부과제 체계를 구성하여 창의적인 세계  
일등기술 연구개발에 도전하며,
- 셋째, 과제별 도전적 최종목표 및 세부목표 수립을 통하여 미래기술을  
선점하고 원천기술 확보의 성공가능성 제고하는데 있다

ETRI 창의연구실 사업의 최종 목표 및 당해년도 연구 목표 및 연구 내용은 다음과 같다.

#### [최종 목표]

- 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발
  - 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발용 포토닉스/초고주파 소자 기술 개발
  - 테라헤르츠 파면제어 원천기술 개발 [연구범위 확대를 위한 신규 목표 반영]

#### [연구 내용]

- 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발 : 세계 최고 수준
  - 튜너블 테라헤르츠 트랜시버용 포토닉스/초고주파 소자 기술 개발

- 비팅광원 발전과장: 1.55 $\mu$ m/1.3 $\mu$ m, 출력@1.3 $\mu$ m: >30mW/채널당
- Linewidth: <10MHz, relative intensity noise (RIN)~-135dB/Hz
- 증폭기, 변조기 집적형 비팅광원 기술 개발
- 안테나 집적형 광대역 포토믹서 기술 개발
- f3dB: > 300GHz, 출력: >100  $\mu$  W@300GHz
- 테라헤르츠파 검출용 쇼트키 다이오드 어레이 기술 개발
  - Responsivity: >1500V/W@300GHz
- 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술개발
  - 광대역 비팅광원용 Photonic integrated circuits(PICs) 연구
  - 고속 스캔 연속파 테라헤르츠 분광기 기술
  - SNR: >60dB@1THz, 동작주파수: 0.3~1.5THz (분해능: <1GHz)
- 집적형 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 개발
  - 튜너블 테라헤르츠 발생 및 검출 칩 일체형 트랜시버 개발 (양방향 테라헤르츠 통신, 초소형 분광, 영상 시스템용)
- 신개념 고효율 테라헤르츠파 발생 기술 연구
  - CPW 집적형 고효율 포토믹서 기술
  - 나노구조체 집적형 대면적 포토믹서 기술
  - 나노포토닉스 기반 테라헤르츠 소자 개발
  - 그래핀 기반 광대역 포토믹서 및 테라헤르츠파 증폭기연구

### 제3절 사업 수행체계

ETRI 창의연구실사업은 7개의 세세부 연구과제로 수행되었으며, 2016년 2월 ETRI 조직개편에 따라 이 중 “튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발” 과제의 수행 조직 명칭도 (구) ‘THz포토닉스창의연구센터’ 에서 (현) ‘테라헤르츠창의원천연구실’ 로 변경 된 바 있다. 그러나 연구 개발 내용인 “튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발” 은 변함없이 추진하여 현재 3단계 1차년도 연구가 수행되었다. 2016년 ETRI의 주요사업 재정립안 수립을 통하여 기초원천기술 개발 강화를 위한 체계가 완성되었으며 이를 기반으로 방송·미디어연구소 내부 평가를 거쳐 “튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발” 과제는 최초의 목표대로 3단계 연구 추진 분야로 확정되었다.

### 제4절 보고서 체계

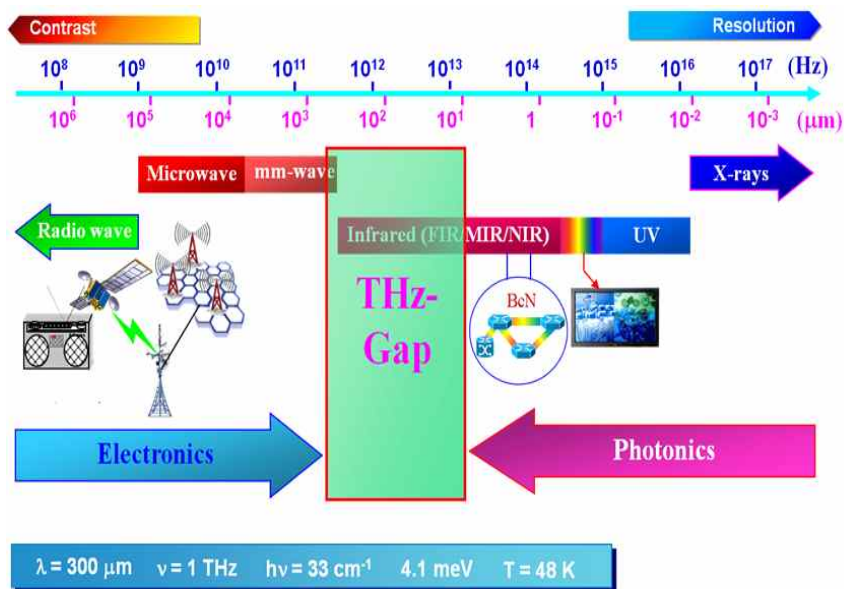
ETRI 창의연구실 사업은 7개의 창의연구센터별 원천기술 개발을 추진하였다. 2015년까지 본 보고서는 각 창의연구센터별로 1개의 장을 할애하여 해당 연구 내용 및 결과에 대하여 기술토록 하였다. 하지만 조직개편의 결과로 단일 협약사업으로 변경되어 “튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발” 과제 내에서 개발된 연구성과 만을 종합하여 ‘제1장 서론’, ‘제2장 연구개발 동향 분석’, ‘제3장 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발’, ‘제4장 연구결과의 활용계획’, ‘제5장 결론 및 건의사항’ 의 구성으로 기술한다.

## 제 2 장 연구개발 동향 분석

### 제 1절 연구개발과제의 중요성

#### □ 사회적 측면

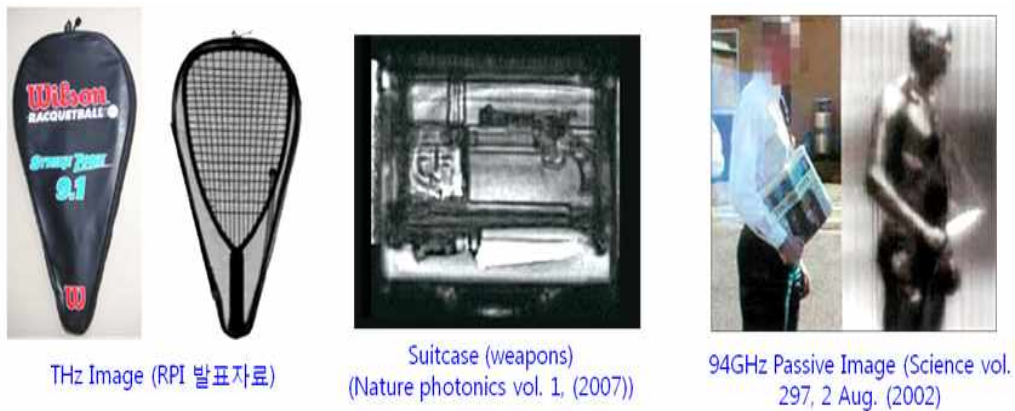
- 테라헤르츠파는 가시광과 마이크로파 사이에 위치하는 0.1 ~ 10THz 주파수 영역의 전자파로, 비금속/무극성 재료를 투과하는 특성이 있기 때문에 의료 진단, 환경 계측, 식품 검사, Security 시스템 등 매우 광범위한 응용영역에서 다른 파장대의 전자파나 광파에 기반한 기술에 비하여 차별적인 특성 제공이 가능한 차세대 핵심 주파수원으로 자리매김하고 있음
- 테라헤르츠파의 광범위한 응용영역으로 MIT Technology Review에서 “2004년 10대 Emerging 기술 분야”로 선정된 것과 함께 2005년 1월 “일본 문부성 10대 기간기술”로 선정된 바 있으며, 기술의 독창성으로 인하여 미국, 일본, EU 등을 중심으로 나노기술 이후에 최대의 기술개발 투자가 진행되고 있음
- 테라헤르츠파 고유 특성인 투과 특성을 활용한 테라헤르츠파 영상 시스템 기술은 2001년 9.11 테러 이후, 각국의 사회 안전망 구축에 있어 핵심 수요 기술로 자리 매김 하였으며, 보안 등의 분야에서 관련 핵심 기술 개발 수요가 급격히 증가하고 있음
- 20세기부터 급격히 증가하고 있는 전자기파 스펙트럼 각 대역의 기술을 볼 때, 가시광 영역을 중심으로 파장이 짧은 영역에서는 고분해능 기술 관련 산업이 형성되었으며 파장이 긴 영역에서는 대비(contrast)가 좋은 특성을 활용한 이동통신 등의 광대역 서비스가 개발 활용중이며, 이 두 대역의 중간 대역인 테라헤르츠파는 두 대역의 장점을 동시에 보유 할 수 있는 대역으로서 중요한 주파수 자원으로 부상하고 있음



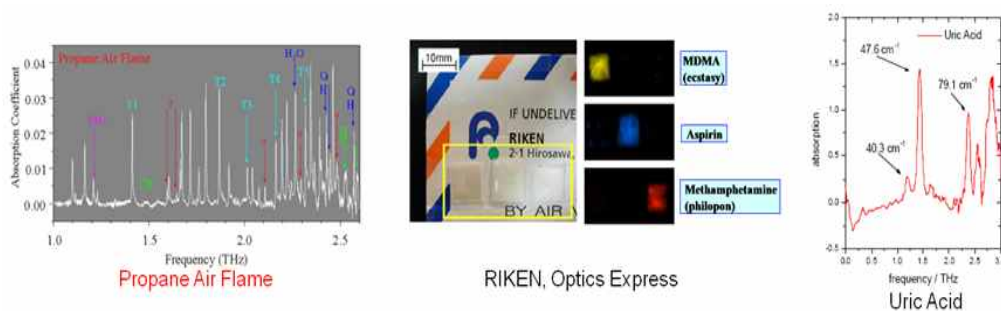
<그림 2-1> 전자기파 스펙트럼 상에서 테라헤르츠 주파수 대역

- 전자소자를 활용한 마이크로파 및 밀리미터파대역과 광소자를 활용한 원적외선 대역사이의 주파수 미개척영역인 테라헤르츠파 고유의 특성을 활용하면

- 종이, 플라스틱, 비닐, 세라믹, 목재, 뼈, 이빨, 지방, 분체, 건조 식품 등 비금속 및 무극성 재료를 투과하여 재료 및 제품의 안전성 진단에 활용
- 물질, 시약류, 고분자 생체, 가스 등 다양한 물질에 대하여 고유의 흡수 스펙트럼 영역에 해당 되어 물질분석에 활용
- 2003년 우주왕복선 Columbia호 추락 사고 후, 사고의 원인이 되었던 내화단열재의 접착 결함을 찾아낸 것을 계기로 테라헤르츠파의 가치를 인정받아 다양한 분야의 응용연구가 집중적으로 시작되었으며, 기술 개발과 함께 차세대 융합형 비파괴 검사용 파원으로 자리 매김 할 가능성이 매우 큰 기술로 이를 기술개발 함으로 인간중심의 비침습, 실시간 유해물 측정 분석에 활용이 예상됨
- 에너지대역이 수 meV로 X선과 달리 인체에 미치는 영향이 적어 의료·약품, 농업·식품, Security, 환경계측, 첨단 재료 평가, 초고속통신 등 매우 광범위한 분야에서의 응용이 기대되어 실용화 시에는 큰 시장 확대가 예상됨



<그림 2-2> 물질 투과 특성을 활용한 테라헤르츠파 영상 예

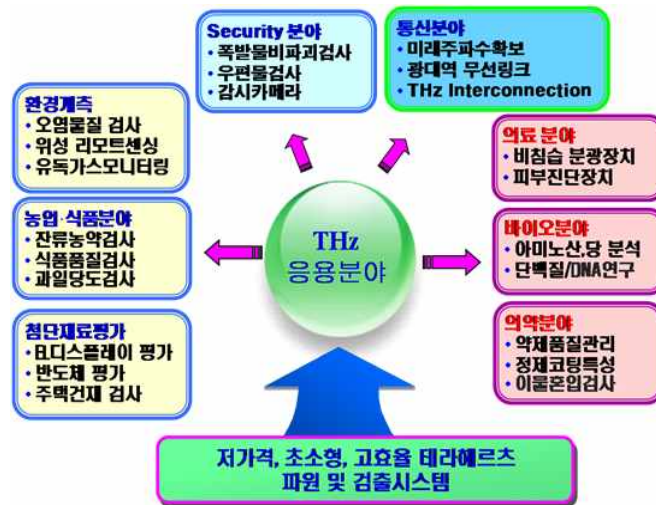


<그림 2-3> 흡수 분광 스펙트럼 분석에 의한 분자 지문 해독 예

- 전자공학 기반의 초고주파 기술 개발 및 원적외선 포토닉스 기술 개발이 급격히 진행되고 있고 테라헤르츠 갭이라고 하는 0.1 ~ 10THz 주파수 대역에서 타 기술과 차별화되는 응용성이 입증되었으나 적절한 부품 기술 미개발로 선진 각국에서 테라헤르츠 갭을 채우기 위한 핵심 기술 개발에 치열한 경쟁이 진행되고 있음
- THz파원 및 검출기술에 관한 매우 다양한 연구결과들이 개발되면서, 최근 Nature지, Nature Photonics, Science등의 최상급 논문지에 논문 게재 수가 급격히 증가하고 있는 기술 분야로

- 현재까지 대부분 논문의 주제가 고효율 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술 관련이 다수를 차지
- THz 갭 영역에서 0.1 ~ 3THz 영역의 활용성이 점차 증가하고 있음. 그 이유로는 미국의 Homeland security 이후 비접촉 이미징 분야의 기술 개발 필요성이 많이 증대 된 것과 함께, 다양한 주요 분자들의 진동 및 회전에 대한 공명 주파수가 이 영역에 걸쳐있기 때문
- 따라서 의료 진단, 환경 계측, 식품 검사, DNA/RNA분석, Security 시스템 등 매우 광범위한 응용영역에 활용 될 수 있는 경쟁력 있는 파원기술 개발이 매우 시급한 상황임

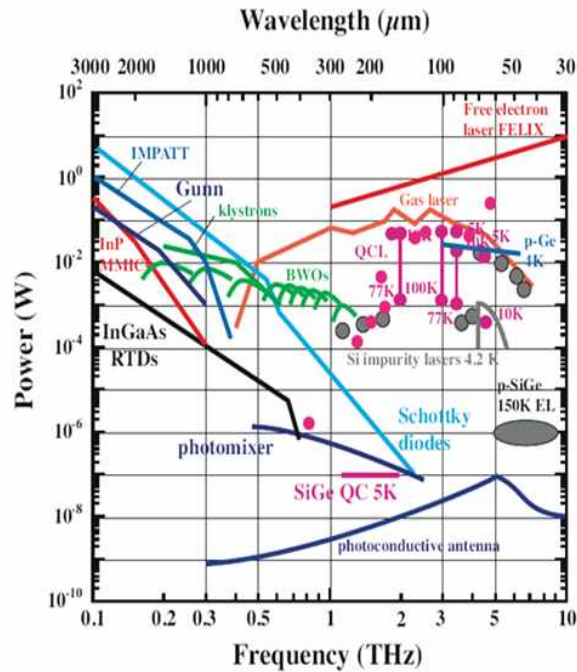
- 아직도 널리 사용되지 않는 전자파 대역이지만, 초소형, 비 냉각형, 고효율, 주파수 가변 테라헤르츠 파원 및 검출기 개발로 매우 다양한 응용분야에서 지금까지 없었던 혁신적인 계측 기술 제공이 가능하므로, 비침습, 실시간, 장소에 제한되지 않는 기술 제공 등이 가능하여, 생체 기술 등을 통한 유비쿼터스 생체 기술 구현 등 사회적 중요성이 높은 기술



<그림 2-4> 저가격, 초소형, 고효율 테라헤르츠 파원 및 검출 시스템이 활용 될 수 있는 다양한 사회적 활용 예상 분야

□ 기술적 측면

- 테라헤르츠 기술의 주요 응용 영역인 영상 및 분광에서 요구되는 기술적 핵심 요소인 고효율, 고감도, 광대역, 저 소비전력 특성을 갖는 테라헤르츠 발생 및 검출 소자 기술 수요가 급격히 증가하고 있고, 전자공학 및 포토닉스 기술 기반의 매우 다양한 부품 및 시스템 기술이 개발되고 있으나, 테라헤르츠 기술이 요구하는 광대역, 높은 SNR (signal-to noise ratio), 저가격, 초소형 특성을 제공할 수 있는 기술은 아직까지 미개발 상태임 [1].



<그림 2-5> 테라헤르츠 발생 소자의 주파수별 출력 현황

- 초소형, 비냉각, 고출력, 저가형 테라헤르츠 부품개발을 가능하게 하는 테라헤르츠 광집적회로 기술 개발로 테라헤르츠 영상, 분광 기술의 핵심기술 제공이 가능하여 구체적인 응용 분야에 직접적인 활용이 예상됨
- 진공관내 전자의 가속에 의해 고출력 테라헤르츠파 발생 기술인 Klystron, BWO 등의 기술이 개발되어 있으나 변환효율, 부품의 크기, 고가격, 광대역 특성 제공의 어려움 등에서 한계가 존재
- 펨토초 레이저 및 포토믹서 기반의 시영역 광대역 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술이 개발되어 가장 널리 활용되고 있으나 높은 가격, 긴 데이터 처리 시간 등의 문제 극복 필요
- 미래 융합기술 수요의 핵심인 저가격, 초소형, 저전력 구동, 다기능 탑재형 모듈을 위한 핵심 소자 기술 개발에 매우 다양한 방법이 시도 되고 있음
- Gunn diode, Schottky diode, HEMT 등의 초고주파 전자소자 기술 및 Quantum cascade laser (QCL) 등 포토닉스 기술의 테라헤르츠 응용을 위하여 주파수 및 발진파장 확대를 위한 다양한 기술 개발이 진행중
- 테라헤르츠 영상 시스템 구현을 위한 고출력, 고감도, 실시간 특성 확보를 위한 고출력 파원, 고감도 검출기 및 어레이 기술 개발이 추진 중에 있으나 전자소자의 제한적인 대역폭 및 낮은 효율 등으로 많은 기술적 장벽을 극복하여야 함
- 전자기파 스펙트럼의 활용주파수가 결정되면 파원, 검출기, 스위칭, 증폭기, 분배기 기술 개발에 관한 기술 로드맵이 형성되는 바, 적절한 형태의 파원 및 검출기 개발에 많은 노력을 하고 있는 현 시점에서 파원, 검출기 등 주요 핵심 기술을 개발함과 동시에 다양한 소자들을 유기적으로 묶을 수 있는 테라헤르츠 도파로 기술 등의 개발을 통하여 신개념 광대역, 초소형, 고효율 집적형 테라헤르츠 트랜시버가 개발될 수 있음
- 높은 변환 효율이 가능한 포토닉스 기반의 Dual-mode laser (DML), 도파로형 포토믹서, 금속이나 반도체 표면 플라즈몬을 활용한 THz 도파로 기술을 개발, 집적형 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발 추진을 통하여 관련 핵심 기술 선점으로 미래 핵심 신산업 확보

- 2010년 Nature 포토닉스 “Monolithically integrated solid-state terahertz transceivers” 및 2010년 Science 지의 “Microcavity Laser Oscillating in a Circuit-Based Resonator” 등 논문의 주요 기술 내용은 초소형 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발에 관하여 보고된 내용으로, 아직까지 구체적인 활용 예가 없지만 초소형, 고효율, 저가격의 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발의 필요성을 보여주고 있음

#### □ 경제적 측면

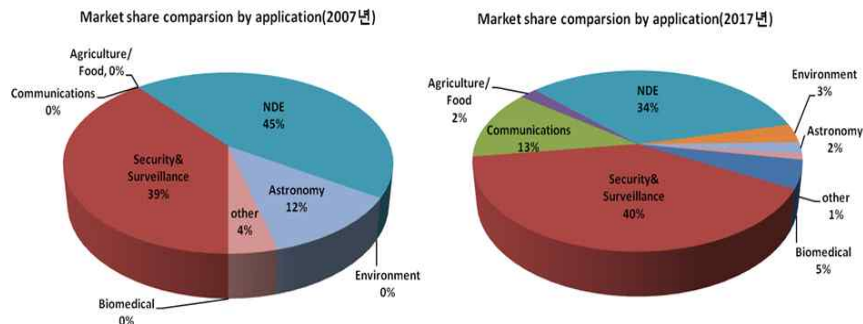
- 시장 진입이 가능한 정도로 시스템 개발이 추진된다면 단기간에 급속한 시장 확대가 예상되는 응용분야를 중심으로, 경제적 파급효과가 큰 기술을 정리하면 다음과 같음
  - 테라헤르츠 의료, 바이오 분야: 생체 고분자의 진동, 회전운동, 분자간 상호작용 공명주파수가 테라헤르츠 주파수 영역에 존재하고 있어 생체고분자의 거시적인 현상 규명에 기여 할 수 있으며 무엇보다도 의료, 바이오 분야에서 비침습, 실시간 생체정보측정 기술 수요증가가 예상되는 영역임
  - 테라헤르츠 분광 및 이미징 분야: 테라헤르츠 분광 및 Imaging 기술을 활용 의약품의 제조 공정에 중요한 재료 혼합비의 결정, 원재료의 동정과 분석, 제품의 품질 관리, 비 접촉식 약종의 판별, 제제의 두께 측정 등에 응용이 가능하여 고속 스캔 기능을 탑재한 저가형의 THz시스템 개발이 된다면 곧바로 시장진입이 가능한 분야임
  - 테라헤르츠 비파괴 검사 분야: 비접촉 방식으로 불투명물질의 두께를 측정할 수 있는 방법으로 테라헤르츠 기술은, 산란 매질속에서도 정확히 두께 및 물리량 측정이 가능하다는 점에서 큰 관심을 받고 있음. 예를 들어 페인트 두께를 실시간으로 측정이 가능한 기술은 테라헤르츠기술이 유일하다고 할 수 있고, 계측기가 상용화가 되었을 때 선박, 자동차, 군수용 등에서 광범위하게 활용될 것으로 예상되며, 2016년 초부터 경쟁적으로 활용 가능성에 대해 주요 학회에서 관련 기술이 발표되고 있음
- 현재, 식료 생산으로부터 소비자까지 제품이력 제공을 위한 갖가지 기술들이 활용되고 있으나 활용 가능한 테라헤르츠와 품질검사 시스템을 활용하면 식료품의 이물 검사, 선도 검사에 대해서도, 종래방법인 초음파 검사·X선 검사를 대체하는 비파괴적이며, 특히 인체에 상대적으로 무해인 검사법이 될 가능성이 최근 연구결과들이 발표되고 있음
- 본 연구실에서 테라헤르츠 비파괴 측정 기술을 개발하여, 2018 자동차 공정 검사용으로 상용화를 추진하고 있는 것도 시장을 창출한 기술이 전체를 점유할 가능성이 높음에 주목하여 집중적으로 추진하고 있는 내용임
- 농업 분야에서 테라헤르츠파의 응용으로는 농작물의 선도 검사, 단백질 지방 당도 검사, 식물 내 수분의 리얼타임 모니터링, 잔존 농약 검사 등이 있으며, 정책적으로도 인간의 쾌적한 삶에 관한 정책이 중시되고 있는 시점에서 농작물의 안전성 및 품질 향상을 통하여 국내 농업 경쟁력 확보 및 국민 건강 유지에 핵심적인 기능을 제공 할 수 있으나, 기술적 제한 사항으로 아직까지 구체적 기술 적용 사례가 매우 제한적임
- 테라헤르츠파는 종이, 플라스틱, 섬유, 고무 등을 투과하기 때문에 X선 검사 장치와 같이 미개봉, 비접촉으로 위험물을 감지하는 것이 가능하여 플라스틱 폭탄의 검출 및 페트병 속의 인화성 액체의 검출이 가능하여 Security 분야의 활용이 예상됨
- 2016년 MarketandMarket사의 테라헤르츠 기술 보고서에서 2016년 판매된 테라헤르츠 분광 및 영상시스템의 16% 수준이 military and homeland security 목적으로 구매된 것은 괄목할 만한 성장이 진행되고 있음을 알 수 있고 기술의 발전과 더불어 급격한 시장 규모가 형성 될 것으로 예측됨

- 환경오염이나 인체에 유독한 가스등의 중적외선 영역 흡수를 이용한 검출 및 모니터링이 가능
  - 예를 들어, CO<sub>2</sub>, CO, NO, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>는, 각각, 4.3 μm, 4.6 μm, 5.26 μm, 7.66 μm, 8.6 μm, 10 μm 대역에서 흡수가 있어 반도체 양자 cascade 레이저(QCL)의 활용으로 초고감도로 실시간 측정이 가능함
  - 반면, QCL에서 제공하기 힘든 3THz 이하에서 흡수 스펙트럼을 가지는 오염 물질 분석을 위한 테라헤르츠 파원 기술 또한 필요함
- 이 이외에도 위조 판정이나 회화나 고미술품 등의 열화의 관찰에 응용할 수 있을 가능성이 있으며 매우 다양한 응용영역을 갖고 있음

## 제 2절 테라헤르츠 기술의 시장 동향

### □ 테라헤르츠 기술 시장 동향

- 테라헤르츠 기술 미성숙으로 아직까지 구체적인 규모의 시장은 형성되어 있지 않지만 2007년 대비 2017년 테라헤르츠 응용영역에 따른 시장 점유율 발표 내용을 보면, NDE, 보안, 통신 분야의 비약적인 발전이 예상되고 바이오 메디컬, 농·식품, 환경 등의 분야에서 활용 가능성을 예측하였고, 2016년 실제 시장 시장 점유 분석을 비교하여 보았을 때 주요 응용 영역은 예측과 같이 확대 진행중임 [2].



<그림 2-6> 2007년 기준 2017년 THz 응용시장 예측

- 2005년 3월의 일본 총무성 위탁에 의한 「테라헤르츠 동향 조사보고서」에 의하면, 테라헤르츠 파의 응용 분야는 ①공업적인 응용 ②농업·식품 응용 ③시큐리티 응용 ④바이오·메디컬 응용 ⑤IT응용 ⑥환경 응용 ⑦우주·계측 리모트 센싱 응용 등으로 분류되며, 시장규모(직접 효과)로서 2010년에는 1694억엔, 2015년에는 7248억엔으로 CAGR 33.7% 예측 하였음 (기술 미성숙에 의하여 실제 시장 형성은 다소 지연되고 있으며, 2017년 이후 급성을 예상하였으나, 시장 예측 결과 수정 필요)
  - Nondestructive evaluation(NDE), 통신, 보안 영역에서의 테라헤르츠 기술 수요 핵심은 초소형, 고효율, 저가형으로 관련 기술 선점이 시장 진입의 경쟁력을 제공할 것으로 예측
  - 부품관련 세계적 경쟁력을 갖고 있는 일본의 경우 국내보다는 국외에 다수의 특허를 제출하고

있는 실정으로 일본의 부품 전략과 잘 맞아 떨어지는 분야임

- 고효율 테라헤르츠 기술 개발로 직접적인 활용이 예상되는 비파괴 검사장비의 가장 큰 영역인 자동차 및 가스/오일 산업의 축소에도 불구하고 비파괴검사장비 시장 2008년 1,111 백만불 시장이 형성되었으며 2.4%의 지속적인 성장이 예상되고 신개념 기술 개발에 따른 기존 시장 진입 및 신산업 창출이 가능한 지식 기반 미래 핵심 신기술 분야 [3]
- 우주의 기원 및 생성 연구를 위한 테라헤르츠 대역 어레이형 안테나 구축사업인 ALMA 프로젝트를 통하여 2013년 칠레에 구축이 완료되어 운영중에 있고 단일 장비를 활용 가장 많은 주요 논문이 게재되는 결과 확보
- 이전에는 테라헤르츠 부품 시장이 대부분을 차지하였으나, 최근 통신, 의료, 군수, 산업용 비파괴 측정 시스템으로 테라헤르츠 기술 시스템 채택이 확대되고 있어 점차 관련 핵심 부품 시장이 확대될 것으로 예상
- 구체적인 테라헤르츠 시장이 형성되지 않아 정확한 시장 예측 자료 활용에 어려움이 있으나, 2012년 3월 발표된 BCC Research사의 시장 조사 자료인 Terahertz radiation system: technologies and global markets의 내용을 보면, 2021년 5.7억불 수준의 시장 형성을 예측
- 테라헤르츠 핵심 부품들의 가격, 성능, 크기 등의 개선에도 불구하고 아직까지 직접적인 서비스 적용에 많은 어려움이 있으나, 가까운 시일 내에 이의 기술적 해소를 통한 서비스가 출현할 것이고, 이의 확산을 통하여 급격한 시장 팽창이 예상됨.

<표 2-1> Global Market for Terahertz Radiation Devices and System,  
By type of system, through 2021 (Source BCC Research)

(\$ Millions)

Type of THz system	2010	2011	2016	2021	CAGR (2011-2016)	CAGR (2016-2021)
Imaging	72.8	73.0	75.7	248.3	0.7	26.8
Spectroscopy	10.0	10.7	15.3	21.9	7.4	7.4
Other sensor	0.0	0.0	16.9	170.4	-	58.8
Communication	0.0	0.0	0.2	60.9	-	213.8
Computing	0.0	0.0	18.9	68.5	-	29.4
Total	82.3	83.7	127.0	570.0	8.7	35.0

- 테라헤르츠 기술의 시장 규모 예측은 잘 맞지 않고 여러 번 수정을 한 사례들이 있으며, 앞서 인용한 시장 규모 예측도 같은 맥락에서 이해 할 수 있으나, 중요한 것은 점차 테라헤르츠 기술 적용 사례가 확대되고 있고 매우 빠르게 신기술들이 소개되고 있다는 점으로, 초기 예측보다 시장 점유율이 지연이 있지만 테라헤르츠와의 독특한 차별적 특성으로 활용이 급격히 증가할 것으로 예측되는 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술의 차별화가 무엇보다 중요함
- 2016년 Photonics West '16 에서 테라헤르츠 두께 측정 기술 관련, 독일 BMW에서 추진하고 있는 사례 발표
- 2016년 IRMMW-THz 2016에서는 영국의 차량용 페인트 두께 측정 기술에 관한 시연이 있었음
- ETRI에서는 현대자동차 생산 공정에 적용할 테라헤르츠 비파괴 측정 기술 적용이 2017년 시제, 2018년 상용제품 개발을 목표로 진행중
- 산업 현장에서 요구되는 작고, 고성능이고, 가격이 저렴한 시스템 개발을 추진 중으로 산업 확대의 가능성을 가지적으로 예측할 수 있는 수준에 도달하였음을 알 수 있음

- 2016년 시장 예측 전문기관인 MarketandMarkets에서 발표한 “Terahertz Technology Market by Type” 에 따르면 2016년 93.3 백만불 수준의 시장이 CAGR 31.83%로 급성장하여 2022년에는 489.8 백만불 시장이 형성될 것으로 예측
- 2016년 형성된 테라헤르츠 시장 규모를 형성하고 기술로는 영상, 분광, 통신 순이고 각각이 전체 시장의 66%, 20%, 14%를 점유하고 있음
- 테라헤르츠 영상 및 분광 장비를 가장 많이 도입한 것은 여전히 실험실 수준의 연구용으로 전체 테라헤르츠 영상 분광 시장의 45% 수준을 차지하였고, 이어 23% 수준의 의료용 장비, 그리고 16% 수준의 국방 장비가 차지하였음
- 아직 본격적인 시장 형성은 되지 않았지만 같은 기간 테라헤르츠 통신 분야의 CAGR이 51.65%로 가장 크게 예측되어 5G 이후의 주파수 대역 활용 기술이 전무한 국내 현실을 고려 할 때 초광대역 통신 기술 제공이 가능한 테라헤르츠 기술 개발 경쟁력이 ICT 경쟁력을 제공할 것으로 예측됨
- 2014년 이후의 실제 시장 규모가 조사된 최초 보고서로, 점진적인 시장 확대를 예상 하고 있으나, 해당 보고서에서는 테라헤르츠 기술의 산업 적용의 가장 큰 걸림돌인 가격경쟁력이 확보된 부품에 대한 구체적인 방향을 제시하고 있지 못함
- 여전히 테라헤르츠 분광 장비의 가격이 대당 2~3억 수준이며 이를 가능한 빨리 수천만원 이하로 떨어뜨리는 것이 응용영역 확대에 있어 급선무이고, 이후에야 본격적이고 급격한 산업화가 진행 될 것으로 예측됨
- 테라헤르츠원천연구실에서 개발중인 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 수준이 상용 수준의 85% 수준 정도에 도달하고 있지만, 세계에서 가장 싸고 가장 작은 부품 개발 가능성으로 차별화를 확보하고 있어, 기술수준이 90% 수준 이상만 도달한다면 차별화가 확보된 경쟁력 있는 산업용 테라헤르츠 응용시스템 개발이 가능하고 테라헤르츠 기술 불모지인 국내의 부품 및 시스템 경쟁력을 제고 할 것으로 기대함
- 2016년 현대자동차와 테라헤르츠 기술 적용에 관한 MOU 체결 및 테라헤르츠 비파괴 측정 장비 개발 관련 부품전문업체에 기술 이전을 추진하여, 2017년 시제품 생산 및 2018년 국내에서 최초로 생산라인 탑재를 위한 시제품 개발을 추진하여 최종으로 2019년 초 테라헤르츠 장비 상용화를 목적으로 연구개발 추진중

<표 2-2> 테라헤르츠 기술 응용 분야 별 시장 전망 (MarketandMarkets 2016)

Type	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022	CAGR (2016-2022)
Terahertz Imaging	37.4	48.1	61.9	103.7	176.4	230.7	302.2	30.23%
Terahertz Spectroscopy	15.8	17.1	18.5	21.7	25.8	28.1	30.7	8.85%
Terahertz Communication	2.1	6.5	12.9	34.4	76.0	110.0	156.9	51.65%
<b>Total</b>	<b>55.3</b>	<b>71.7</b>	<b>93.3</b>	<b>159.9</b>	<b>278.2</b>	<b>368.9</b>	<b>489.8</b>	<b>31.83%</b>

Source: Experts' Interview, Press Releases, Investor Presentations, and MarketsandMarkets Analysis

□ 국내·외 경쟁기관 현황

- 국내에서는 테라헤르츠 기술 관련 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 관련하여 대학중심의 테

- 라헤르츠 포럼이 활동하고 있음 (표2-3 참조)
- 대부분 연구그룹이 TDS 시스템을 활용한 연구주체에 편중되어 있으며, 소규모의 기초과제 성격의 연구가 진행되었거나 진행 중으로 선진국의 연구개발 규모와는 비교할 수 없는 수준
  - 테라헤르츠 트랜시버 기술은 ETRI에서 유일하게 개발 중이며, 소재부터 모듈까지 자체 기술을 개발, 선진국의 선두그룹과 기술 경쟁중에 있음
  - ETRI는 초소형, 저가격 테라헤르츠 분광기 개발 및 성능 개선을 통하여 해당 기술의 가능성을 제시하였으며 dual-mode laser에 관한 원천기술을 확보하고 있어, 테라헤르츠 분광기 개발이 완료 시, 세계적 경쟁력 확보가 예상됨
- 대규모의 컨소시엄 형태의 국가프로젝트가 2000년 이후 미국, 유럽, 일본 등에서 집중적인 연구개발이 진행중
- 테라헤르츠와 관련 전체논문의 3/4이상 연구선행국가 차지
  - 시스템, 부품, 소자, 소재 관련 일본, 미국, EU 중심으로 기술이 편중되어 있으나 국내의 특허출원 활동은 확실한 증가추세
  - TeraView, Emcore, Topitica등이 TDS 및 FDS -THz 일부 시스템을 초기 형태로 상용화
- 광대역 테라헤르츠 분광기에 관해 여러 업체에서 상용 시제품을 선보이고 있으나 아직까지 가격이 대당 연속과 기준 1억 수준이고 특성 또한 현장 적용에는 제한적인 초기 시제품 상태임 (표2-4 참조)
- 최근 다수의 전자소자 기반 테라헤르츠 광원, 증폭기 등이 개발되고 있다. 주로 DARPA 등의 정부기관 지원을 통해 군수/우주산업에 목표를 두고 진행되어 왔으며, 일부 기초연구 개념으로 수행된 바 있다. 유럽의 경우 민간 응용을 목표를 하여 연합체 개념으로 개발 진행 중이다.
- 전자소자의 경우 공정 비용이 매우 큰 비중을 차지하므로, 학교 중심의 연구보다는 Northrop Grumman, Teledyne과 같은 대형 회사들 혹은 이들과 협력관계에 있는 학교 중심으로 연구가 발표되어 왔으며, 파워 측정 등에서 자유공간으로 방출된 테라헤르츠파를 기준으로 하기보다는 프로브 등으로 측정된 회로 내 파워를 중심으로 지표화 되어 있다. 따라서 일률적 비교는 어렵겠으나, 자유공간으로 방출시 상당한 파워 손실을 보이는 것으로 일부 확인되고 있다 (표2-5 참조)..

<표 2-3> 국내·외 포토닉스 기반 테라헤르츠 연구현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발 성과의 활용 현황
한국전자통신연구원	튜너블 THz 트랜시버 개발	포터블 실시간 시스템 개발중
서울대학교	테라헤르츠 바이노 응용기술	ERC센터 개소 및 관련 기술 연구 개발중
한국과학기술원	플라즈몬 기반 THz기술 개발	THz RF소자 및 응용시스템 연구
연세대학교	테라헤르츠 생체영상 기술	테라헤르츠 펄프-프로버 연구/ THz바이오 연구
한국원자력연구원	고출력 테라헤르츠 파원 개발	기술 개발중
표준연구원	테라헤르츠 콤팩트 기술개발	테라헤르츠 콤팩트 기술 활용 분광기술개발중
한국전기연구원	고출력 THz파 발생기술	고출력 테라헤르츠파 발생기술

한국해양대학교	테라헤르츠 도파로 기술개발	관련 기술 개발중
포항공과대학교	테라헤르츠 영상 분광기술	관련 기술 개발중
고려대학교	RF기반 THz파원 기술 개발	고출력 THz MMIC개발
UNIST	테라헤르츠 CMOS기술 개발	THz RF소자, 고출력 진공소자 기술 개발
HHI (독일)	광대역 포토믹서 기술개발	모듈 Toptica에 기술이전을 통한 상용화
NTT (일본)	고효율 UTC-PD 기술 개발	모듈 상용화
IEMN (프랑스)	고효율 포토믹서 기술 개발	고출력 광대역 테라헤르츠파 발생기술
JPL (미국)	고출력 테라헤르츠기술 개발	고출력 RF소자 및 응용시스템 기술
Darmstadt Univ.(독일)	광대역 포토믹서 기술 개발	고효율 포토믹서 기술개발중
Wright state univ.	광대역 포토믹서 기술 개발	고효율 포토믹서 기술개발중
Nagoya univ.	테라-바이오 기술 연구	테라헤르츠 바이오 기술개발중
Moscow state univ.	테라-비선형 연구	테라헤르츠 기술

<표 2-4> 테라헤르츠 분광기 상용화 현황

업체	$\lambda$ (nm)	방식	광원 형태	포토 믹서	SNR @300GHz	대역폭 (THz)	System size
Topica	850	연속 파	Two DFB	LTG- GaAs	>80dB	~1.8	One DFB: 228 x 80 x 80 mm <sup>3</sup>
Toptica	1550	연속 파	"	LTG- InGaAs	>70dB	1.2	Two-color diode laser 228 x 80 x 80 mm <sup>3</sup>
TeraView	~800	"	"	LTG- GaAs	>60dB	1.5	767 x 533 x 600 mm <sup>3</sup>
Emcore	780	"	"	ErAs:Ga As	>60dB	2	TX) ~ 200 x 100 x 100 mm <sup>3</sup> , RX) ~ 127 x 100 x 100 mm <sup>3</sup>
Advantest	1550	펄스	comb fiber laser	LTG-GaB iAs	>60dB	4	430x540x330mm <sup>3</sup>
Menlo	780	펄스	fiber	LTG-	>60dB	3	Optomechanical

			laser	GaAs			setup: 920 x 460 x 190 mm <sup>3</sup>
Menlo	1560	펄스	"	LTG-InG aAs /InAlAs	>60dB	3	Optomechanical setup: 450 x 450 x 200 mm <sup>3</sup>
Zemega	780	"	"	LTG- GaAs	>70dB	4	267 x 159 x 70 mm <sup>3</sup> 2014년 사업 중단
Picometrix	780	"	"	LTG- GaAs	>70dB	2	445 x 500 x 178 mm <sup>3</sup>
Microtech	780	연속 파	BWO's	multipl iers	50dB	1.4	
ETRI	13 10	연속 파	DML	LTG- InGaAs/ InAlAs	>80dB	>1.2	One dual-mode laser: 30 x 13 x 13 mm <sup>3</sup>
ETRI	850	연속 파	"	LTG- GaAs	>80dB	>2	-

<표 2-5> 전자소자 기반 테라헤르츠 광원, 증폭기 개발 현황

Type	주파수 대역	출력(dBm)/이득(dB)	적용기술	수행기관/발표년도
광원	247~263.5GHz	4.1 dBm (probe 측정)	65nm CMOS	코벨대 2014
	482GHz	-7.9dBm (probe 측정)	65nm CMOS	코벨대 2011
	317GHz	5.2dBm (probe 측정) 61uW (자유공간 방사파 측정)	130nm SiGe HBT	코벨대, 켈컴, STMicroelectronics 2011
	519~536GHz	-11.3dBm (자유공간 방사 파 측정)	130nm SiGe HBT	Wuppertal University IHP (Germany), 2014
	321.6GHz	1.6dBm (probe 측정)	130nm SiGe HBT	고려대, 2015
	276.4GHz	10dBm (probe 측정)	250nm InP HBT	고려대, 2017
	487.7GHz	-8.9dBm (probe 측정)	250nm InP HBT	Teledyne, JPL, Caltech 2011
	340GHz	270uW (probe 측정)	35nm InP HEMT	Northrop Grumman, JPL, 2008
증폭기 (LNA)	200~230GHz	20dB	130nm SiGe HBT	Wuppertal University IHP, Infineon, 2016
	480GHz	11.7dB	30nm InP HEMT	Northrop Grumman 2010
	670GHz	7dB, Packaged	30nm InP HEMT	Northrop Grumman 2011
	850GHz	11.1dB 최대출력 0.93mW	25nm InP HEMT	Northrop Grumman 2015
	1THz	9dB	25nm InP HEMT	Northrop Grumman 2015

증폭기 (Power amp)	240GHz	포화출력 7.5dBm	130nm SiGe HBT	Wuppertal University 2016
	220~325GHz	13.5dBm@301GHz Linear Gain=13.4dB	250nm InP HBT	서강대, 고려대, Teledyne, 2015
	580~680GHz	-0.7dBm@585GHz Linear Gain=20dB	130nm InP HBT	Teledyne, 2013
	338GHz	10dBm@338GHz Linear Gain=15dB	Sub 50nm InP HEMT	Northrop Grumman, JPL, 2010

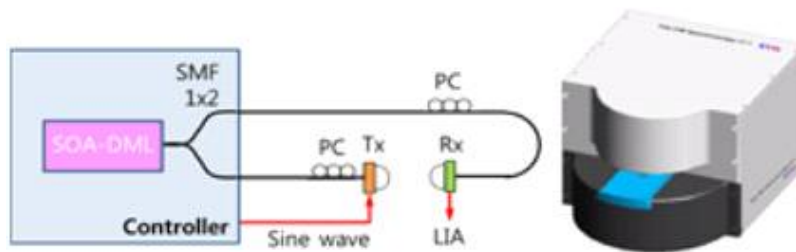
### 제 3 절 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발의 의미

THz포토닉스창의연구센터로부터 시작된 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발 단계, 단위 핵심 소자 성능 향상 및 이를 기반으로 하는 테라헤르츠 주요 응용분야인 영상, 분광, 통신 영역에서 지금까지 제공되지 못한 신개념의 테라헤르츠 기술 제공이 가능한 수준으로 발전하였다. 최종적으로는 한 개의 칩에 모든 기능을 집적화한 집적형 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발을 연구개발 목표로 하고 있으며 관련하여 소재부터 시스템까지 전 연구영역을 확보 추진중에 있는 테라헤르츠 전문 연구그룹이다. 단계별로 진행하면서 포토닉스 기반의 핵심 부품 개발을 넘어서 여러개의 파원의 위상을 적절히 제어하여 환경에 구애 받지 않고 임의 공간 정보를 추출 할 수 있을 것으로 기대하는 테라헤르츠 파면제어 기술을 최초 개발 추진중에 있다. 개발이 완료되었을 때 신개념의 통신, 영상, 분광 기능 제공은 물론이고 기존 RSA암호체계와 비교 불가 수준의 복잡도를 제공 가능한 물리기반의 암호생성, 전송 기술 개발이 가능할 것으로 생각한다. 테라헤르츠 기술 분야에서 지속적으로 가시적인 연구결과들을 창출하고 있으며 이를 기반으로 기술 선도 그룹 도약중에 있다. 인간중심의 대표적 미래기술인 테라헤르츠 기술 선점을 통한 국내 산업 견인으로 기존 산업 고도화 및 신융합산업 창출이 기대된다.

<표2-5> 자체 개발된 테라헤르츠파 발생 및 검출 핵심 부품 및 구동보드 기술

					
<b>Dual wavelength laser</b> • P <sub>out</sub> : 14dBm • SMSR: >50dB	<b>Dual-mode laser</b> • P <sub>out</sub> : >15dBm • SMSR: >55dB • Tuning: 1THz	<b>ECPD</b> • Screening effect • $\eta \sim 10^{-3}$ • Array extendable	<b>Photomixer</b> • Low temperature Grown GaAs/ML • $\tau = 2ps$	<b>Schottky barrier diode</b> • Zero biased • NEP: 25pW/√Hz	<b>Arrayed SBD</b> • P <sub>out</sub> : 14dBm • 1x60 ant. integrated
					
<b>Dual-mode laser</b>	<b>Photomixer</b>	<b>SBD WG package</b> • Horn Ant. • CPW on Quartz	<b>SBD package</b> • SMT • 20 frame • USB comm.		
<b>Butterfly package</b> • AS Lens, Isolator, mPD, TEC • Hermetic sealing	<b>ECPD package</b> • AS Lens, Si Lens • Flip chip bonding • SiOB	<b>Photomixer</b> • AS Lens, Si Lens • Flip chip bonding	<b>SBD WG package</b> • Horn Ant. • CPW on Quartz	<b>SBD package</b> • SMT • 20 frame • USB comm.	
					
<b>DML/DWL Module board</b>	<b>Digital Lock-in Amp. board</b>	<b>THz-FDS System (v1.1)</b>	<b>Arrayed SBD module</b>	<b>THz reflection Imaging setup</b>	<b>Portable THz Scanner system</b>

- 반도체 기반의 테라헤르츠 핵심 모듈 개발을 위한 소재부터 시스템 전 연구영역 경쟁력 확보
  - 한 개의 공진기를 활용한 신개념 테라헤르츠파 발생용 비팅광원 원천기술 개발
  - 안테나 집적된 고효율 테라헤르츠파 발생용 포토믹서
  - 저온성장 기반의 테라헤르츠파 발생 및 검출용 포토믹서
  - 나노 전극 기반의 고효율 PCA(photo-conductive antenna)개발 등
  - 나노 전극 기반의 신개념 테라헤르츠 검출기 개발중
  - InGaAs 쇼트키다이오드 칩 및 모듈 기술 개발
- 세상에서 가장 작은 연속파 테라헤르츠 분광시스템 개발
  - 차체 개발한 핵심 부품 사용으로 소재부터 시스템 구동 기술 까지 전 범위를 자체적으로 개발
  - 산업 현장에서 활용하기에는 많은 제약이 따르는 호모다인 시스템에서 벗어나 초고속의 쇼트키 다이오드로 구성되는 테라헤르츠 영상 시스템 시제를 개발 이를 활용 비파괴 측정 분야 산업 확산을 추진중임



<그림 2-7> 자체개발한 테라헤르츠 분광시스템

- 상용 제품과 ETRI 분광시스템의 특성 비교





TPS3000 (Teraview)		PB7200 (Emcore)		ETRI THz-Spectro v1.1	
Type	THz-TDS (pulse)	Type	THz-FDS (CW)	Type	THz-FDS (CW)
대역폭	0.06THz~4.2THz	대역폭	0.2~1.8 THz	대역폭	0.25~1.2 THz
Dimen.	100x60x132cm <sup>3</sup>	Dimen.	2.5kg(cont.)+4.5kg(Tx.)	Dimen.	22x18x14cm <sup>3</sup> , <2kg
Weight	220kg (fs-laser)	분해능	100 MHz	분해능	~100 MHz
SNR	70dB@0.3THz	SNR	100dB@0.3THz	SNR	80dB@0.3THz
특이점	펄스초 광섬유 레이저 활용으로 크기, 가격, 확장성에 제한적임	특이점	두 개의 독립광원 사용으로 가격, 크기, 확장성에 제한적임	특이점	집적형 비팅광원 활용 저가격, 초소형 분광 시스템 구현 가능

<그림 2-8> 상용제품과 ETRI 분광시스템 특성 비교

- 자체개발한 핵심 모듈 및 광학계로 구성된 테라헤르츠 비파괴 측정 시스템 시제를 개발하여 산업 제품의 품질 관리에 적용 활용 가능성 확보
  - 전자제품의 생산 라인에서 전기 커넥터 정상 체결 결함 유무 판단 기술 제시

- 촉감에 의지하고 있는 차량용 누수 검사방식을 테라헤르츠 수밀 계측 시스템을 적용가능성을 확보하여 상용화 추진중
- 2019년 초 상용화 되었을 경우 테라헤르츠 기술의 대기업 생산라인 탑재는 최초 적용 예상

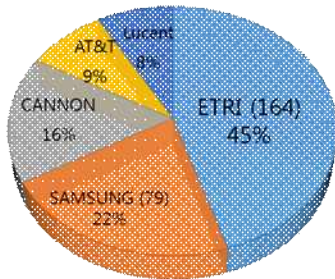
○ 2014년 Thomson Reuters 분석 테라헤르츠 부품 분야 전체 출원건 세계 2위 연구 그룹



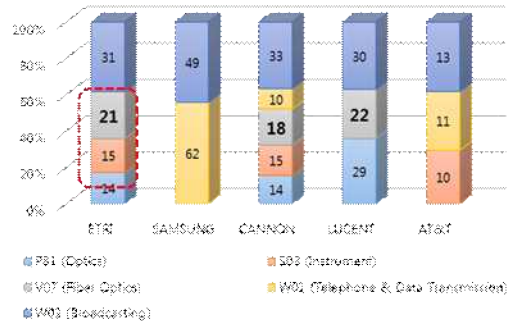
<그림 2-9> 2014년 테라헤르츠 부품 분야 특허 출원 분석

○ 2015년 Thomson Reuters 분석 테라헤르츠 부품 및 자유 공간 통신 분야 특허 주요 상위 출원인 등록 특허 보유 상위 그룹

● 주요 상위 출원인 등록 특허



● 출원인별 주력 기술 분야



<그림 2-10> 상위 출원인 주력 기술 분야 분석

- 2016년 9월 자체 개발된 테라헤르츠 핵심 부품을 활용 테라헤르츠 비파괴 측정 장비 개발 및 “꿈의 전자기파로 자동차 품질검사” 로 주요 언론 홍보
- 국제 최대 규모 광학회(OSA: Optical Society of America)에서 매년 개최하는 광학기술중 통신, 네트워크 분야에서 매년 65개국 이상에서 13000여명의 참가자와 1150여편의 논문이 발표되는 최대 규모와 권위를 갖는 OFC (optical fiber conference) 2017년 3월 초청논문 발표
- 광전시회 최대 학술대회인 SPIE Photonics West 초청논문 및 분과 기초논문 발표, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Application X 위원활동
- Advanced Laser Technologies 17 학술대회(2017.9.10.~9.15.) 부산 유치, 30개국에서 광 및 테라헤르츠 기술 관련 280명 참석

### 제3 장 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발

#### 제1절 당해년도 연구목표 및 내용

##### 1. 연구개발 목표

- 집적형 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발
  - 테라헤르츠파 발생 및 검출 단위 소자 특성@300GHz
    - 출력: >50 $\mu$ W, 검출 감도: >1000V/W @300GHz
  - 테라헤르츠파 1x2 분배기 및 결합기 기술 연구
  - 신개념 테라헤르츠파 검출기 기초 연구  
(Responsivity: >0.1, SNR: 10dB@300GHz )
- 테라헤르츠 파면제어 기초 연구
  - 테라헤르츠 영상 기반 QR 코드 재생 기술 연구
  - 테라헤르츠 영상용 투과형 렌즈 설계 및 개발
    - 테라헤르츠파 Telecentric f- $\theta$  렌즈 개발 (영상면적: 6x6cm<sup>2</sup>)
  - 2x2 공간 다중 테라헤르츠파 위상 제어 기술

##### 2. 연구개발 내용

- 집적형 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발
  - 집적형 테라헤르츠 트랜시버 구성용 핵심 모듈 기술 개발
    - 이득 제어형 고출력 광증폭기 집적형 비딩 광원 모듈 기술 (출력:>17dBm)
    - 매립형 도파로 집적 광대역 포토믹서 모듈 기술  
(Responsivity: >0.2@300GHz)
    - 안테나 공유형 집적형 포토믹서 기술 개발 (어레이수:>2)
    - 채널형 InGaAs 쇼트키 다이오드 기술 개발 ( $f_{3dB}$  : >300GHz)
  - 테라헤르츠파 1x2 분배기 및 결합기 기술 연구
    - 테라헤르츠파 필터 설계 및 집적화 기술 연구
    - 테라헤르츠파 도파로형 분배기 및 결합기 모듈 설계 기술
  - 신개념 테라헤르츠파 검출기 기초 연구 (저온성장법 미적용)
    - MOCVD로 성장된 어레이형 나노전극 구조를 채택한 테라헤르츠파 검출기 기술 연구  
(Responsivity: >0.1, SNR@300GHz:~15dB)
- 테라헤르츠 파면제어 기초 기술 개발
  - 테라헤르츠 영상 기반 QR 코드 재생 기술 연구
    - 6x6cm<sup>2</sup> 급 반사형 테라헤르츠 QR 코드 재생 기술 연구
  - 테라헤르츠 영상 응용 플랫폼 기술 개발

- 투과형 Telecentric f- $\theta$  렌즈 설계 및 개발 (영상면적:  $>6 \times 6 \text{cm}^2$ )
- 2x2 공간 다중 테라헤르츠파 위상 제어 기술
- 집적형 2x2 포토믹서 능동 위상 제어 기술
- 2x2 광 수동 위상 제어 기술

## 제2절 당해년도 연구결과

### 1. 테라헤르츠파 발생 및 검출 단위 소자 특성

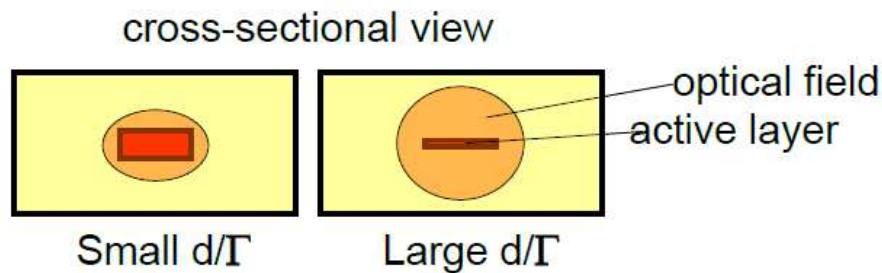
#### 가) 테라헤르츠파 발생용 광증폭기 집적형 비팅 광원 모듈 기술

SOA 및 DML의 활성층 및 도파로 구조 변경을 통해 THz 이미징 및 분광 시스템을 위한 비팅 광원으로 다양하게 적용 가능한 고효율 비팅 광원 개발이 필요하다 [4,5]. 비팅 광원과 SOA를 단일 칩으로 집적함으로써 저가격화 및 소형화가 가능하며, 향후 UTC-PD 까지 단일 칩 또는 하이브리드 집적하여 단일 패키지로 제작 가능할 것으로 기대된다. SOA의 출력향상을 위해서는 식 (1)에서 볼 수 있듯이 SOA의 saturation output power를 향상 시켜야 한다.

$$P_{sat} = \frac{dw}{\Gamma} \cdot \frac{hv}{a\tau_s} \quad \text{식(1)}$$

( $P_{sat}$ ;SOA saturation output power,  $d$ ; active layer 두께,  $w$ ;active layer 폭,  $\Gamma$ ;optical confinement,  $\nu$ ;optical frequency,  $a$ ; differential gain,  $\tau_s$ ;carrier lifetime)

즉, 식 (1)에서 볼 수 있듯이,  $P_{sat}$ 을 증가시키기 위해서는 mode cross section ( $dw/\Gamma$ )을 증가시키거나 활성층의 differential gain을 줄이거나, carrier lifetime을 줄이는 방법이 있다. Differential gain 또는 carrier lifetime을 줄이는 방법은 DFB LD 특성을 저해하는 요소이므로, 일반적으로 mode cross section을 증가시키는 방법을 통하여 SOA의 특성을 향상시킨다. Mode cross section을 증가시키기 위해서는 active layer의 optical confinement ( $\Gamma$ )을 줄이거나, active layer의 두께 또는 폭을 증가시키면 가능하다. 하지만, active layer 두께를 증가시키게 되면 optical confinement도 증가하게 되어, 어떤 최적의 활성층 두께가 존재하게 된다. 그림 3-1-1에서 볼 수 있듯이, 오히려 활성층의 두께를 줄이게 되면,  $d/\Gamma$ 가 증가하게 되어, mode cross section이 증가함을 볼 수 있다.



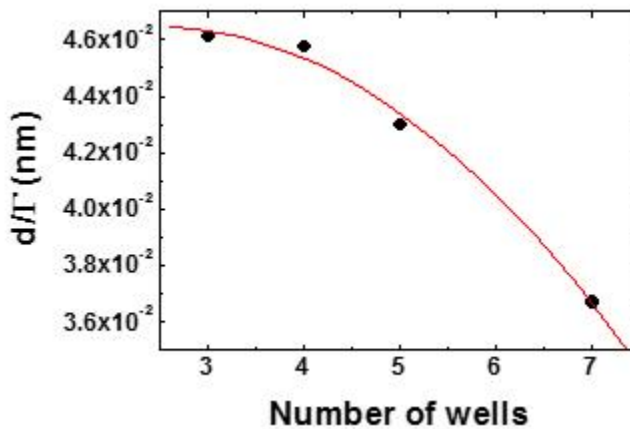
<그림 1-1> 활성층 두께에 따른 mode cross section의 변화

그림 3-1-2는 기존의 1.3  $\mu\text{m}$  SOA 집적 DML (SOA-DML)의 활성층 구조를 나타내었다. 7 pair 다중양자우물 (multiple quantum well;MQW) 에 2-step SCH (separated confinement heterostructure) 구조를 사용하였다. 고효율 SOA 구조를 위해 SCH 구조 및 well 두께를 고정하고, well 개수에 따른  $d/\Gamma$  값을 전산모사하였고, 그 결과를 그림 3-1-3에 나타내었다.

그림 3-1-3에서 볼 수 있듯이, well 개수가 줄어들면  $d/\Gamma$ 값이 증가하므로, 식 (1)에서 볼 수 있듯이, well 개수를 줄여 SOA의 포화출력광세기( $P_{sat}$ )를 증가시킬 수 있다. 하지만, SOA 이득은 식 (2)에서 볼 수 있듯이,well 개수가 감소함에 따른  $\Gamma$  감소로 인해 줄어들게 된다. 따라서, 높은 포화출력광세기를 얻기 위해 well 개수를 줄이게 되면, 낮아진 SOA 이득을 보상하기 위해 SOA 길이를 증가시켜 적절한 이득을 유지하도록 해야 한다.

p-InP(5e17), 500 Å
1.05Q SCH 850 Å
1.1Q SCH 400 Å
MQW(7) Well: 1.36Q, 60 Å (+0.5%) Barrier: 1.15Q, 100 Å (-0.3%)
1.1Q SCH 400 Å
1.05Q SCH 850 Å
n-InP Buffer (1E18) 300 Å
n-InP Buffer (1E18) 900 Å

<그림 3-1-2> 1.3 μm SOA 집적 DML의 활성층 구조



<그림 3-1-3> Well 수에 따른 d/Γ

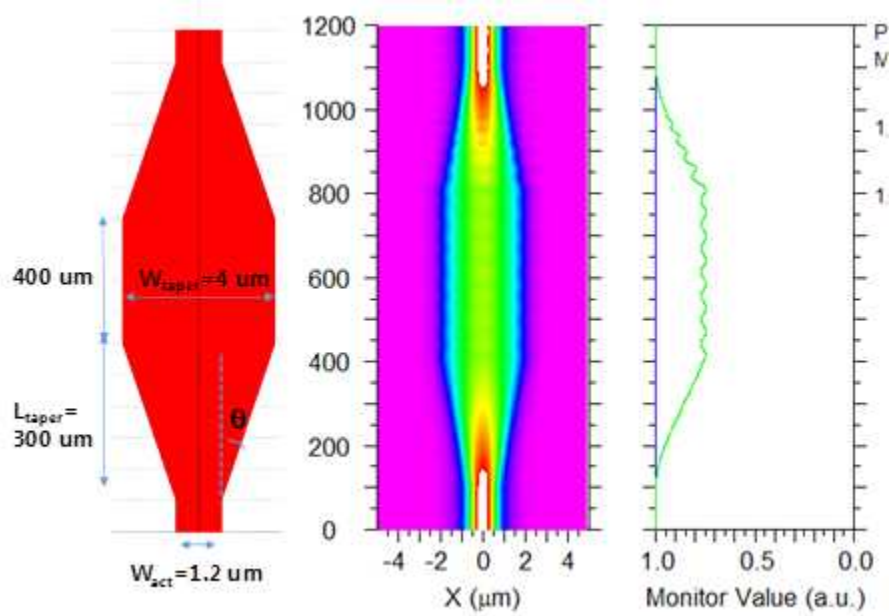
$$G = \exp\{[\Gamma \cdot a \cdot (N - N_0) - \alpha] \cdot L\} \quad \text{식(2)}$$

(G; SOA 이득, a; differential gain, N; Injected carrier density, N<sub>0</sub>; transparent carrier density, α; internal loss, L; SOA length)

그림 3-1-3의 전산 모사 결과로부터, d/Γ는 well 개수가 4개일 때 포화되는 경향을 보이고 있으므로, well 개수를 기존 7개에서 4개로 변경하였다. 또한, SOA 길이의 경우에도 Γ 감소를 고려하여 기존의 well 개수가 7개인 경우의 최적 길이인 700 μm에서 1500 μm로 증가시켰다.

SOA의 포화출력광세기를 증가시키는 또 다른 한 가지 방법은 식 (1)에서 볼 수 있듯이, SOA의 활성층 도파로 폭(w)을 증가시키는 것이다.

활성층 도파로의 폭을 증가시키더라도 DFB LD는 spatial single mode로 동작하여야 하므로, SOA의 폭의 크게 하되, DFB LD와 수동도파로는 단일모드 동작이 가능하도록 설정하였다. 또한, 서로 다른 폭을 갖는 소자를 단일 칩으로 집적하기 위해 adiabatic 하게 모드 변환이 가능하도록 tapering 구간을 설계에 포함하였다.



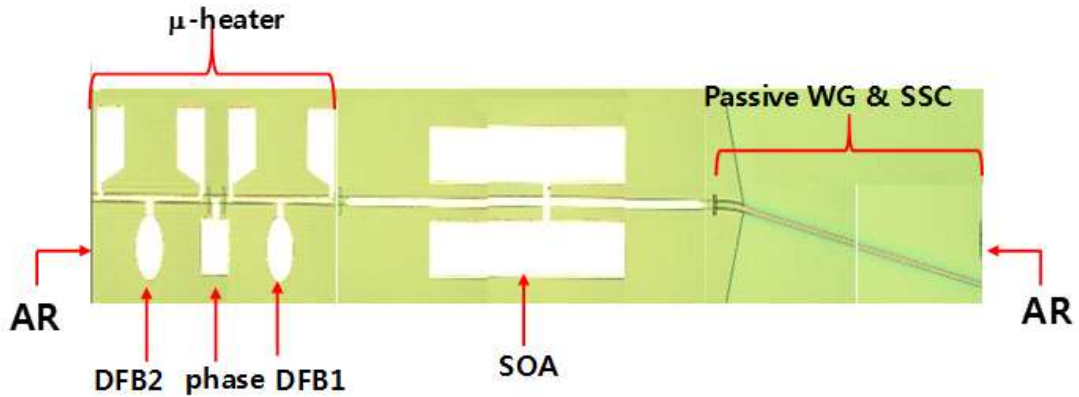
<그림 3-1-4> Tapering width 구조의 SOA 도파로에 대한 BPM 전산 모사 결과

그림 3-1-4에는 tapering width 구조를 가지는 SOA 도파로의 BPM (beam propagation method) 전산 모사 결과를 나타내었다. 입출력단은 DFB LD 및 수동 도파로와 연결되는 부분이므로, spatial single mode를 유지하도록 그 폭을 1.2  $\mu\text{m}$ 로 적용하였고, tapering 폭과 길이는 각각 4  $\mu\text{m}$  및 300  $\mu\text{m}$ 이다. 그림 3-1-4에서 볼 수 있듯이, width tapering에 따른 광 손실은 무시할만 한 것으로 나타났다.

표 3-1-1에 기존의 SOA-DML의 활성층 구조 및 도파로 구조와 높은 SOA 포화출력광세기를 확보하기 위해 변경된 구조를 나타내었다.

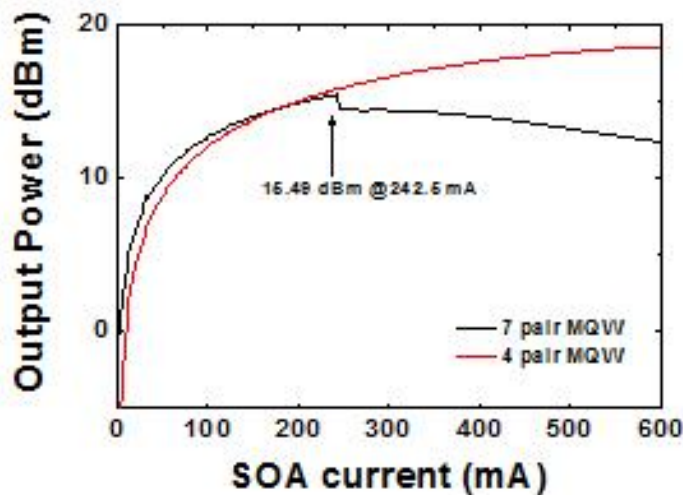
<표 3-1-1> 기존 및 고출력 SOA-DML의 구조 비교

	Waveguide structure of SOA	Active layer
prior		7 × MQW ( $\Gamma \sim 10\%$ )
present		4 × MQW ( $\Gamma \sim 5.3\%$ )

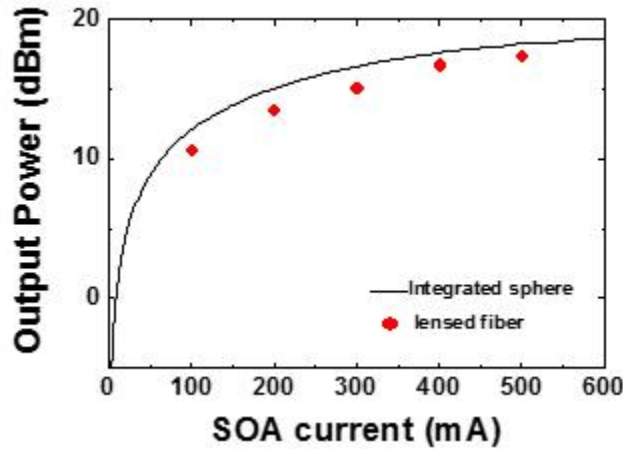


<그림 3-1-5> 고풍력 SOA-DML 칩 사진

그림 3-1-5는 제작된 고풍력 SOA-DML 칩 사진이다. 칩 전체 길이는 3.37 mm 정도이다. 그림 3-1-6에 제작된 기존의 7 pair MQW 활성층을 사용한 SOA-DML과 4 pair MQW 활성층을 사용한 MQW의 output power를 측정된 결과를 나타내었다. 이때, DFB LD1의 주입전류는 70 mA로 고정하였고, SOA의 주입전류는 600 mA 까지 변화시키며 출력 광세기를 측정하였다. 그림 3-1-6에서 볼 수 있듯이, 7 pair MQW의 활성층의 경우 상대적으로 confinement factor가 크기 때문에 SOA current가 낮을 때는 4 pair MQW 보다 높은 광세기를 나타내고 있으나, 242.5 mA에서 출력광세기가 급격히 감소되어 최대 출력 광세기는 15.48 dBm을 나타내었다. 4 pair MQW의 경우 600 mA 까지 출력 광세기가 계속 증가하여, 최대 출력광세기는 18.64 dBm을 나타내었다. 4 pair MQW의 경우 활성층의 폭도 넓혀져 있으므로, current density가 7 pair MQW에 비해 현저히 낮기 때문에 높은 주입전류에서도 breakdown이 발생되지 않는 것으로 생각되어 진다.



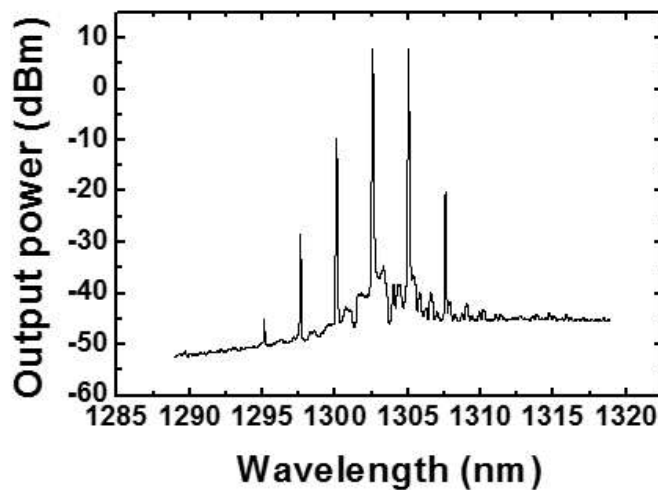
<그림 3-1-6> 기존 및 고풍력 SOA-DML 구조의 출력 광세기 비교



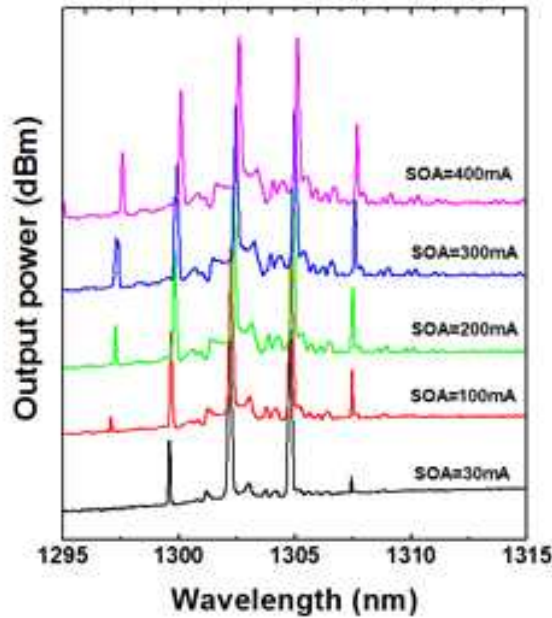
<그림 3-1-7> 고출력 SOA-DML 출력 측정; Integrated sphere (line), lensed fiber (symbol)

그림 3-1-7은 제작된 고출력 SOA-DML 칩의 출력광세기를 large area detector로 측정한 값과 lensed fiber를 이용하여 측정한 값을 나타내었다. 그림 3-1-7에서 볼 수 있듯이, coupling loss는 1.3 dB 정도로 광모드 결합기(SSC)가 잘 제작되었다고 생각되어 진다. SOA 주입전류가 500 mA일 때, lensed fiber에 결합된 광세기가 17.44 dBm을 나타내었다.

그림 3-1-8에 제작된 고출력 SOA-DML의 optical spectrum을 나타내었다. 동작조건은 SOA/DFB1/phase/DFB2의 동작조건은 350mA/50mA/-2.5V/70mA이다. 초기 비팅주파수는 440 GHz정도이고, power balance는 0.1dB이하이다. 깨끗한 FWM (four wave mixing) 피크로 볼 때, DFB LD1과 DFB LD2 사이에 높은 correlation이 이루어 짐을 볼 수 있다. 그림 3-1-9는 SOA 주입전류에 따른 optical spectrum을 나타내었다. 그림 1-9에서 볼 수 있듯이, SOA 주입전류가 증가할수록 DFB LD1 및 DFB LD2의 피크 파워가 증가할 뿐만 아니라, FWM 피크의 크기도 뚜렷하게 증가됨을 보이고 있다.



<그림 3-1-8> 고출력 SOA-DML의 optical spectrum;  
SOA=350 mA, DFB LD1=50mA, phase=-2.5V, DFB LD2=70 mA



<그림 3-1-9> 고출력 SOA-DML의 SOA 주입전류에 따른 optical spectrum;  
DFB LD1=50mA, phase=-2.5V, DFB LD2=70 mA

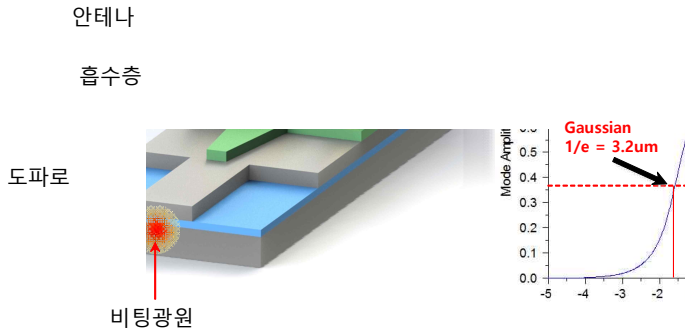
나) 매립형 도파로 집적 광대역 포토믹서 모듈 테라헤르츠 발생 기술

그림 3-1-10은 앞서 개발한 비팅광원의 스펙트럼과 전계를 나타낸 것으로, 두 레이저  $f_1, f_2$ 를 동일 편광의 공간상으로 중첩시키면 두 비팅광원이 믹싱(mixing)되어 차주파수( $f_1-f_2$ )와 합주파수( $f_1+f_2$ )에 해당하는 전기 오실레이션(electric field of beat signal)이 발생하게 되는데, 이를 포토믹싱(photomixing)이라고 한다. 포토믹싱된 비팅광원이 포토믹서의 흡수층에 흡수되어 차주파수( $f_1-f_2$ , envelope)에 해당하는 연속 전류가 발생하게 되며 이를 안테나를 통해 자유공간으로 방사시켜 차주파수와 동일한 주파수를 가진 전자기파를 발생시킬 수 있다 [6].

$$\left( \quad - \quad \right) \quad \text{E-field of Beatnote}$$

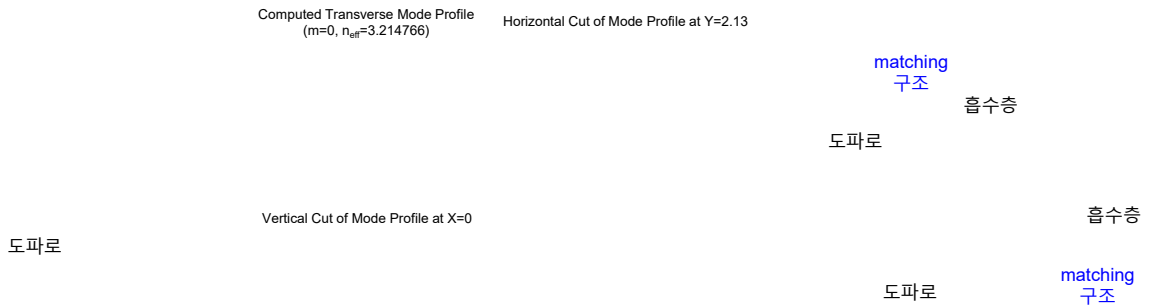
<그림 3-1-10> 비팅광원의 스펙트럼 데이터 및 전기 신호

소자의 중앙부에 위치한 포토믹서의 흡수층으로 비팅광원을 전달하기 위해 칩의 측면으로부터 포토믹서 흡수층 까지 도파로를 형성한다. 그림 3-1-11은 UTC-PD의 개략도 및 칩 측면에 정렬한 광파이버로부터 입사되는 모드 전기장의 공간 분포를 나타낸 것으로, 크기가  $3.2\mu\text{m}$ 이며 위아래/좌우 대칭인 가우시안 필드 분포를 가진다.



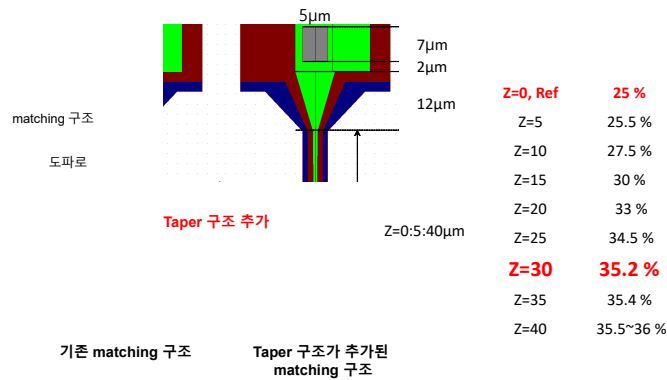
<그림 3-1-11> UTC-PD 개략도 및 광파이버로부터 입사되는 모드 사이즈

그림 3-1-12는 소자에 사용된 shallow ridge 도파로 구조의 좌우/위아래 모드 분포를 나타낸 그래프로, 앞서 광파이버로부터 입력되는 모드의 경우 좌우/위아래 모드가 대칭인 것에 비하여 도파로의 모드는 위아래 방향의 크기가 좌우방향의 크기에 비해 작은 비대칭 구조를 갖는다. 이러한 모드 형태의 불일치로 인해 BPM 시뮬레이션 결과 약 70 %의 에너지가 광파이버로부터 도파로로 결합됨을 확인하였다.



<그림 3-1-12> shallow ridge 도파로 구조 및 모드 사이즈, BPM 데이터

도파로에 결합된 비팅광원은 도파로 보다 굴절률이 높은 taper 형태의 matching 층을 통해 도파로에서 흡수층으로 전달되는데, 기존에 사용된 12μm 길이의 taper 구조의 경우, 도파로로부터 흡수층까지의 거리가 짧아 모든 에너지를 흡수층까지 전달하기가 어려워 흡수율이 약 25%인 것으로 확인되었다. 이를 개선하기 위해 matching 층을 2단 형태의 taper 구조로 제작하고, 그 폭이 0.5μm에서 1μm로 서서히 넓어지도록 설계하여 약 35%까지 흡수율을 높일 수 있었다. 비팅광원의 출력 에너지가 제한된 상황에서 추가적인 외부 광증폭기를 적용하지 않기 위해서는 가능한 높은 결합 효율의 도파로 및 matching 구조가 필요하다. 따라서 이 구조의 개선은 매우 중요하다.

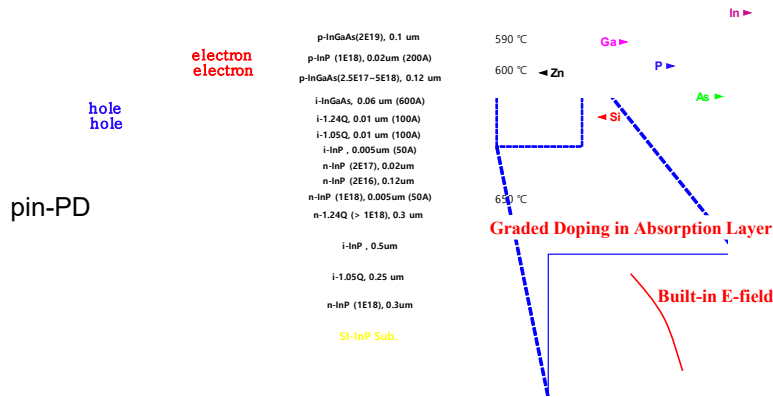


<그림 3-1-13> Taper 형태의 matching 구조와 흡수율

앞서 shallow ridge 도파로 구조는 모드 분포의 불일치로 인하여 70%의 낮은 결합 효율을 가진다. 이를 개선하기 위해 그림 3-1-14와 같이 13개의 Epi. 층들을 이용하여(shallow ridge 도파로 : 3층) 좌우/위아래가 대칭인 도파로 구조(Diluted 도파로)를 설계 하였다. 그 결과, 약 98 % 이상의 에너지가 광파이버로부터 도파로로 결합되어 약 28%의 결합 효율 향상이 가능하였다. 하지만, shallow ridge 도파로 구조의 경우, 대부분의 에너지가 위쪽의 좁은 영역으로 형성된 모드를 형성하므로 matching 구조를 통해 흡수층으로 전달하기가 용이한 반면, Diluted 도파로의 경우는 대부분의 에너지가 상대적으로 넓은 아래 영역에 분포하기 때문에, matching 구조를 이용하더라도 에너지를 흡수층으로 전달하는데 어려움이 있기 때문에, 최종적으로 흡수되는 비율은 shallow ridge 도파로 구조와 유사한 것으로 나타났다. 결국, 상황에 따라 4~5µm의 두꺼운 Epi. 성장이 요구되지만 모듈 제작시 파이버의 정렬이 용이한 diluted 도파로 구조를 채택하거나, 1µm의 부담이 적은 Epi. 성장과 주의 깊은 파이버 정렬이 필요한 shallow ridge 도파로 구조를 선택할 수 있다.

<그림 3-1-14> Diluted 도파로(Epi.) 구조 및 모드 사이즈

## UTC-PD



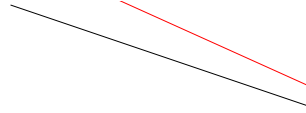
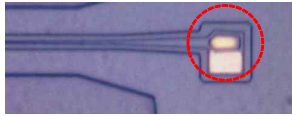
<그림 3-1-15> UTC-PD/pin-PD 밴드갭 구조와 UTC-PD Epi. 및 SIMS 데이터

기존의 도핑되지 않은 흡수층을 가진 pin-PD의 경우, 비팅광원이 흡수되면 전자-정공 쌍 (electron-hole pair)이 발생하며, 발생한 정공과 전자는 외부에서 인가된 역 전압으로 인해 전자는 (-), 정공은 (+) 전극을 통해서 빠져나가게 된다. 정공은 전자에 비해 이동도가 낮아, 최대 1/10의 느린 속도로 이동하므로, 이로 인해 고주파에서 낮은 광-THz 변환 효율을 갖게 된다. 또한 느린 정공으로 인해 흡수층에서 정공이 모두 빠져 나가지 못하게 되면, 이로 인해 외부 전계와 반대 방향의 전계가 내부에 형성되어(space-charge screening effect) 전자-정공의 이동이 어려워져 출력을 높이는 데 악영향을 미치게 된다. 결론적으로 정공의 느린 속도로 인해 소자의 성능이 제한되는 것이다. 이를 해결하기 위해 흡수층을 p-도핑( $>1e18$ )하여 정공이 다수 캐리어(Majority Carrier)가 되도록 하면, 흡수층에 생성된 정공이 relaxation process를 통해 빠르게 (relaxation time, 약 4psec) 사라지며, 상대적으로 속도가 빠른 전자만을 이용함으로써 고효율의 테라헤르츠파 발생이 가능하게 된다. 이를 Uni-Travelling Carrier Photo Diode (UTC-PD)라 한다. 그림 3-1-15는 성장된 UTC-PD의 에피 구조 및 성장된 에피 웨이퍼의 SIMS 측정 결과이다. 흡수층의 두께는 총 180 nm이며, 이 중 120nm 영역의 도핑 농도를 4단계(Step-doping profile)로 변화시키면서 성장하여, 이로 인해 내부 전위차(Built-in Field)가 발생되도록 설계 및 제작하였다. 이렇게 형성된 내부 전위차로 인해 전자가 빠른 속도로 이동할 수 있도록 하였다 [7].

포토믹싱을 이용한 테라헤르츠 연속파 발생의 핵심 소자인 UTC-PD도 다이오드 소자이기 때문에, 그 동작 주파수가 저항-정전용량 값의 영향을 받는다. 고효율의 테라헤르츠 파를 얻기 위해서는 작은 정전용량을 가져야 하며, 정전 용량을 줄이기 위해서는 포토다이오드의 흡수층 면적을 가능한 줄여야 한다. 하지만, 흡수층의 면적을 줄이면 광-전 변환 효율 및 광흡수 포화 수준이 낮아져, 고효율 테라헤르츠파 발생이 어렵게 된다. 따라서, 흡수층의 면적을 줄이면서도 광-전 변환 효율 및 광흡수 포화 수준을 유지할 수 있는 설계가 필요하게 된다.

● Active A : 35  $\mu\text{m}^2$

● Active B : 21.6  $\mu\text{m}^2$



<그림 3-1-16> 흡수 면적이 다른 UTC-PD와 측정된 데이터

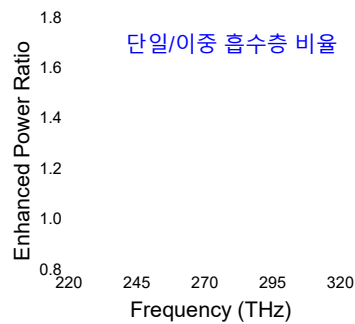
그림 3-1-16은 이러한 상반관계(trade-off)를 고려, 직사각형의 흡수 구조(Active A)를 좁은 폭의 Taper 구조(Active B)와 결합하여, 작은 면적의 흡수층으로도 동일 수준의 결합효율(Responsivity = 0.25)을 가지도록 설계하였다. 이를 통해 흡수층 면적을  $5 \times 7 = 35 \mu\text{m}^2$  (Active A)에서  $21.6 \mu\text{m}^2$  (Active B)으로 약 38%로 감소시켰으며, 이로 인해 정전용량이 감소, 200~300GHz 대역의 테라헤르츠파 출력을 30~40% 향상시킬 수 있었다.

도파로 matching 구조      도파로 matching 구조

단일 흡수층

이중 흡수층

Y-분배기



<그림 3-1-17> 단일/이중 흡수층(Y-분배기)의 UTC-PD와 측정된 파워 데이터

추가적으로, 앞서 좁은 폭의 Taper 흡수층 구조(Active B)를 갖는 UTC-PD를 그림 3-1-17과 같이 비팅 신호(여기 광)의 도파로에 수직 방향으로 나란히 배열하였다. 그리고 비팅 신호를 Y-분배기를 통해 나누어 각각의 UTC-PD에서 발생된 전류가 동위상이 되도록 하였다. 각각의 UTC-PD에서 발생된 전류는 두 소자가 공유하는 단일 광대역 안테나를 통해 방사되게끔 하였다. 이러한 이중 흡수층 UTC-PD는 단일 흡수층을 가진 UTC-PD에 비하여 두 배의 광신호를 입력해야 하며, 출력 광전류 또한 단일 UTC-PD에 비해 두배의 전류값을 가진다. 그 결과 220 GHz에서 약 1.7배, 300GHz에서 최대

1.3배의 출력 향상을 달성하였다. 300GHz에서 단일 UTC-PD의 테라헤르츠 출력은 275GHz 50 $\mu$ W 및 300GHz 38 $\mu$ W 확보하였으며, 이중 흡수층 UTC-PD의 출력은 약 50 $\mu$ W 이상으로 확인되었다. 비팅광원의 발진 파장이 1.3 $\mu$ m의 경우이고 새롭게 추진중인 1.5 $\mu$ m 기반 테라헤르츠파 발생 모듈 개발시 포톤 효율을 고려하였을 때 비약적인 출력 향상이 기대된다.

#### 다) 테라헤르츠파 검출 소자 기술

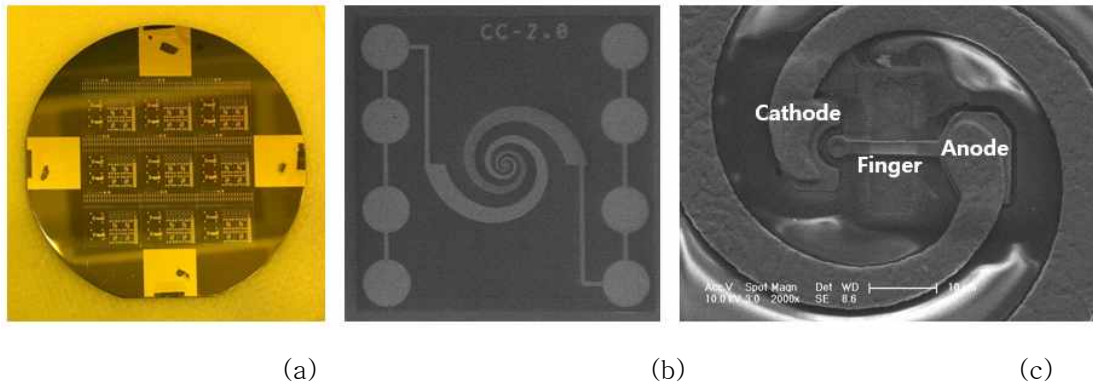
THz, IR 대역 detector로 사용되는 소자는 주로 thermal detector와 photon detector 2가지로 분류할 수 있다. Thermal detector는 IR, THz 광 흡수에 의한 온도 변화를 측정하는 소자이며, 정확한 에너지 측정이 가능하지만 반응 속도가 늦어 분광, 이미징, 통신등에 사용하기 어렵다. Photon detector는 반도체 등의 물질에 흡수된 빛이 전자-정공쌍을 형성, 이로 인해 발생하는 전류를 측정하는 소자이다. IR, THz 대역의 photon energy는 매우 작기 때문에, 이러한 photon detector를 제작하기 위해서는 매우 작은 bandgap energy를 갖는 물질을 사용해야 하지만, 현실적으로 사용 가능한 물질은 존재하지 않는다.

현재 개발 중인 SBD(Schottky Barrier diode)는 대표적인 THz 검출기중 하나로, 특히 상온 동작이 가능한 초고속 소자 검출기이다 [8-10]. SBD는 금속-반도체 접합에서 발생하는 다이오드 특성을 이용, 정류 작용을 통해 한 방향으로만 전자를 전달하여 측정 가능한 신호를 생성하며, 금속-반도체 접합의 특성상 역회복시간이 매우 빠르기 때문에 고속 동작에 유리하고 낮은 turn on voltage를 가지고 있어 저전압 동작이 가능하다. 측정된 신호는 low pass filter를 거쳐 load에 전달된다. 이때 SBD의 스위칭 속도는 THz 전자기파에 효과적으로 반응할 수 있을 정도로 빨라야 한다. 따라서 THz 측정에 사용되는 쇼트키 다이오드는 mobility가 큰 GaAs나 InGaAs 물질에 기반하여 제작된다. GaAs는 mobility가 높고, 항복 전압이 큰 장점이 있어 1990년대 GaAs 쇼트키 다이오드에 관한 많은 연구가 진행되었다. 본 과제에서 필요한 소자는 THz detector이므로 효율과 함께 노이즈 (noise) 특성을 고려하여야 한다. InGaAs 쇼트키 다이오드는 GaAs 쇼트키 다이오드보다 turn-on voltage가 낮고 0 V 바이어스(bias) 동작이 가능하다. 0 V 바이어스 동작이 가능하면 샷 노이즈(shot noise)를 줄일 수 있으며, 별도의 바이어스 회로가 필요하지 않아 전체회로를 단순하게 만들 수 있는 장점이 있다. SBD의 차단 주파수는 다음과 같이 정의 된다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s(C_{j0} + C_p)} = \frac{1}{2\pi R_s C_{total}} \quad \text{식 (3)}$$

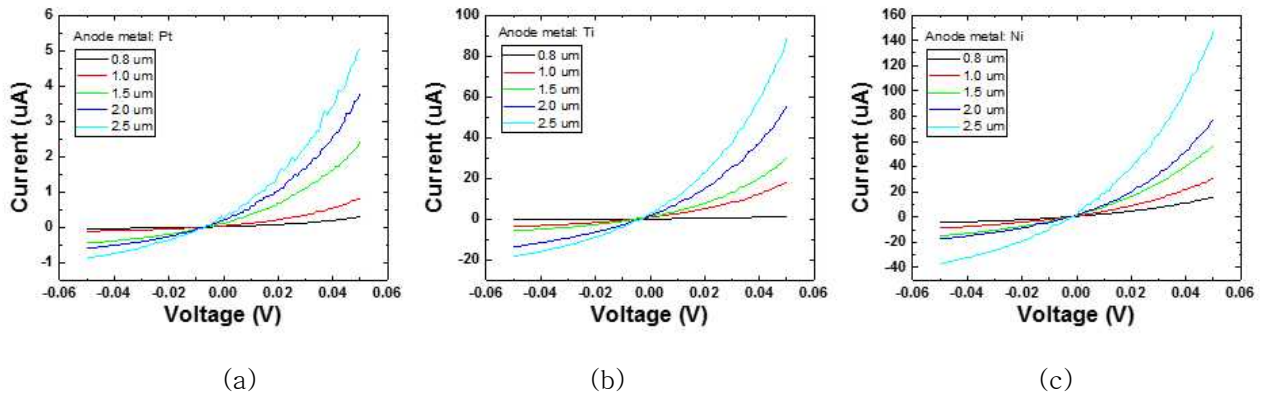
여기서  $R_s$ 는 쇼트키 다이오드의 시리즈 저항,  $C_{j0}$ 는 쇼트키 다이오드의 접합(junction) 정전용량,  $C_p$ 는 쇼트키 다이오드의 기생(parasitic) 정전용량이다.  $f_c$ 를 높이려면  $R_s$ 와  $C_p$  값을 줄여야 하며  $R_s$ 와  $C_p$ 는 에피구조와 쇼트키 다이오드 구조에 의해 결정된다. 특정 주파수에서 쇼트키 다이오드 성능을 최적화하기 위해서는 도핑, 두께와 같은 에피 구조 파라미터와, 애노드 지름과 같은 구조에 관련된 여러 파라미터를 조절해야 한다. 도핑레벨을 높일 경우  $R_s$ 와 hot electron 노이즈가 줄어드는 효과가 있으나 정선 정전용량이 커지는 문제가 발생한다. 쇼트키 다이오드에서 제일 중요한 파라미터 중 한 가지는 애노드 면적이다. 애노드 면적을 줄이면 정전용량이 작아져  $f_c$  값이 커져 고주파 성능이 향상되는 반면,  $R_s$ 와 hot electron noise는 증가하게 된다. 100 GHz미만 저주파 영역에서는 쇼트키 다이오드를 variable capacitance나  $R_s$ 와 같은 stray parameter로 기술할 수 있다. THz 영역에서는 stray parameter 이외에 skin effect나 carrier scattering, carrier transit time, dielectric relaxation과 같은 고주파 프로세스가 쇼트키 다이오드 특성에 중요한 영향을 미쳐, 이러한 복잡한 상관관계로 인해 정확한 설계가 어렵다.

본 실에서는 제로(Zero) 바이어스 동작이 가능한 InGaAs SBD로 THz 검출기를 제작하였다. 에피 구조는 Semi-insulating InP:Fe(100) 기판위에 오믹 콘택트(ohmic contact) 층으로 사용될 도핑 농도  $1.25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 인 n+ InGaAs를  $1.0 \mu\text{m}$  두께로 성장하고, 그 위에 쇼트키 콘택트(Schottky contact) 층으로 사용될 도핑 농도  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 인 n+ InGaAs를  $0.2 \mu\text{m}$  두께로 성장한 구조이다. 마지막으로 공정 상에서 Schottky layer를 보호하기 위하여 InP capping layer를  $0.1 \mu\text{m}$  성장하였다. Capping layer는 애노드메탈 증착전에 제거하며, RIE (reactive ion etching)를 이용하여 애노드(anode) 메사(mesa)를 만든 뒤에 오믹 메탈(Ohmic metal)을 증착 후 RTA (rapid thermal annealing) 공정을 통하여 오믹 콘택트를 형성하였다. 그 후 애노드 메탈을 증착하여 쇼트키 콘택트(애노드)를 형성하였다. 이후 정전용량을 줄이기 위하여 benzocyclobutene (BCB)를 이용하였다. 공정변수를 줄이고 anode metal만의 특성을 확인하기 위해 test 샘플들은 air-bridge 공정을 하지 않았다. 쇼트키 다이오드에 연결할 안테나는 광대역 특성을 갖는 log spiral 안테나로 결정하였다. 그림 3-1-18은 실제 제작한 SBD THz detector의 사진과 log spiral 안테나, SBD의 SEM 이미지이다. SBD의 anode 크기는  $0.8, 1, 2 \mu\text{m}$ 로 고정 시켰고 log spiral 안테나의 방향은 시계방향 및 반시계방향으로 형성되었다.

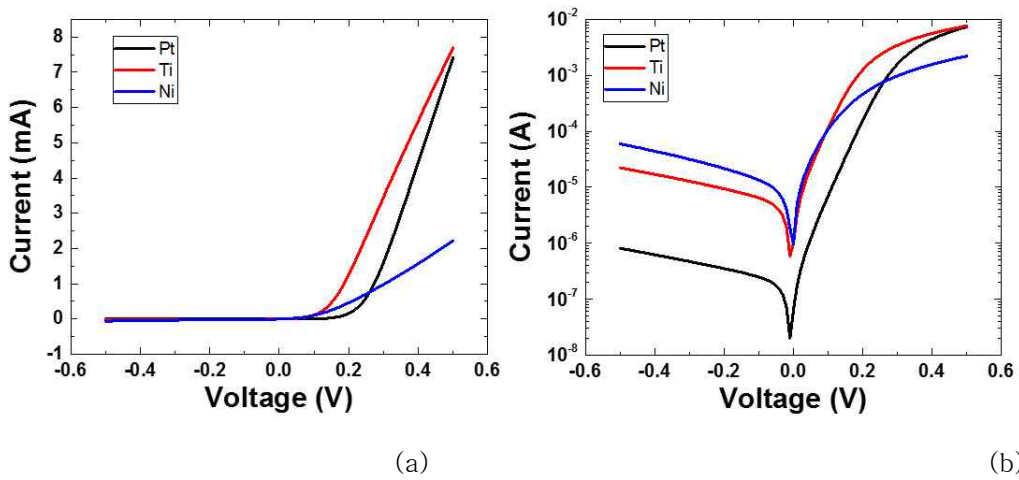


<그림 3-1-18> (a)제작된 SBD웨이퍼 사진과 (b) 안테나가 연결된 SBD 칩 (c) SBD부분의 SEM이미지

그림 3-1-19는 anode metal의 종류 및 크기에 변화를 주어 제작한 쇼트키 다이오드 소자들의 I-V 특성 측정결과이다. 일반적으로 InGaAs의 쇼트키 금속은 Pt, Ni, Ti, 등이 있고 쇼트키 장벽 높이는 각각 0.3, 0.2, 0.15 eV이다. 쇼트키 장벽 높이가 높을수록 turn on voltage가 높아지지만 쇼트키 특성이 안정적이고, 쇼트키 장벽 높이가 낮을수록 turn on voltage는 낮아지지만 ohmic 특성이 나타날 가능성이 높다. Ti와 Ni이 Pt에 비해 저항이 낮아 50 mV의 저전압일 때 약 10배 많은 전류가 흐르는 것을 확인 할 수 있다. 또한 애노드 크기에 따라서 암전류는 증가하고 저항은 감소하는 특성을 확인하였다. THz 전기장 세기가 아주 약하기 때문에, 저전압 특성이 중요한 요소 중 하나이다.



<그림 3-1-19> 애노드 크기별 전류레벨 변화 애노드 금속은 (a) Pt (b) Ti (c) Ni



<그림 3-1-20> 제작한 SBD의 I-V특성 (a) linear scale, (b) log scale

그림 3-1-20은  $\pm 0.5$  V의 전압 범위에서 측정된 I-V 그래프이다. SBD의 스위칭 속도의 중요한 파라미터중 하나인 turn on voltage가 Pt, Ti, Ni 각각 0.24, 0.14, 0.14 V로 나타났으며, 이때  $R_s$ 는 각각 34, 46, 165  $\Omega$ 로 나타났으며, ideality factor는 1.1 ~ 1.2로 계산 되었다.

SBD의 노이즈 특성을 확인하기 위하여 noise equivalent power (NEP)를 측정하였다. NEP는 측정하고자 하는 주파수에서 Noise spectral density를 Responsivity 로 나눈 값이다. 그림 3-1-21은 Noise spectral density 측정을 위한 측정 셋업의 개념도이다. 잡음 차단을 위해 샘플은 probe station 내에서 probe를 통해 측정하였고, stanford research system사의 low-noise preamplifier (SR560)와 HP사의 electrical spectrum analyzer (E4402B)를 사용하였다. SBD가 없는 상태에서 probe끼리 쇼트 시켜 노이즈를 먼저 측정하여 셋업 노이즈를 측정한 다음, SBD를 연결한 상태에서 노이즈를 측정하여 셋업노이즈를 빼 주어 SBD만의 노이즈를 측정하였다.



<그림 3-1-21> SBD의 Noise 측정 셋업의 개념도

그림 3-1-22는 0.8  $\mu\text{m}$ 의 anode size와 Pt, Ti, Ni의 anode metal을 사용하였 때 log-spiral antenna와 집적한 SBD소자의 노이즈 값이다. 측정결과 노이즈는 Pt, Ni, Ti 순으로 나왔다. SBD의 노이즈 특성은 metal과 반도체간의 junction 저항에 관계가 있어 저항이 작을수록 노이즈도 작아지는 특성을 보인다. 또한 Ti가 Ni, Pt 보다 반도체,  $\text{SiO}_2$ 와 접촉력이 좋아서 junction이 보다 안정적으로 이루어졌다고 볼 수 있다. 이후 열처리를 통해 SBD의 rectifying 특성이 유지되면서 저항과 노이즈를 최소화하는 실험을 진행할 예정이다.

<그림 3-1-22> LNA와 ESA를 이용한 노이즈 측정

Noise spectral density를 구하기 위하여 소자에서 측정된 노이즈에서 장비에서 발생하는 노이즈를 빼준다. Noise power spectrum을 voltage noise density spectrum 으로 변환하고, 그래프 값들의 중간값으로 NEP를 계산 한다. 그림 3-1-23은 주파수에 따른 Noise spectral density 그래프이다. Noise spectral density값은 Ti, Ni, Pt 각각 30, 60, 100  $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타났다.

<그림 3-1-23> anode metal 별 Noise spectral density

Log-spiral antenna가 집적된 SBD의 경우 안테나에서 노이즈가 생길 가능성이 있다. 그래서 똑같은 구조를 가진 horn antenna용 SBD를 같이 측정해 비교해봤다. 안테나가 없을 경우 20 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정이 되 Log-spiral antenna 대비 2/3 감소한 것을 확인 할 수 있었다.

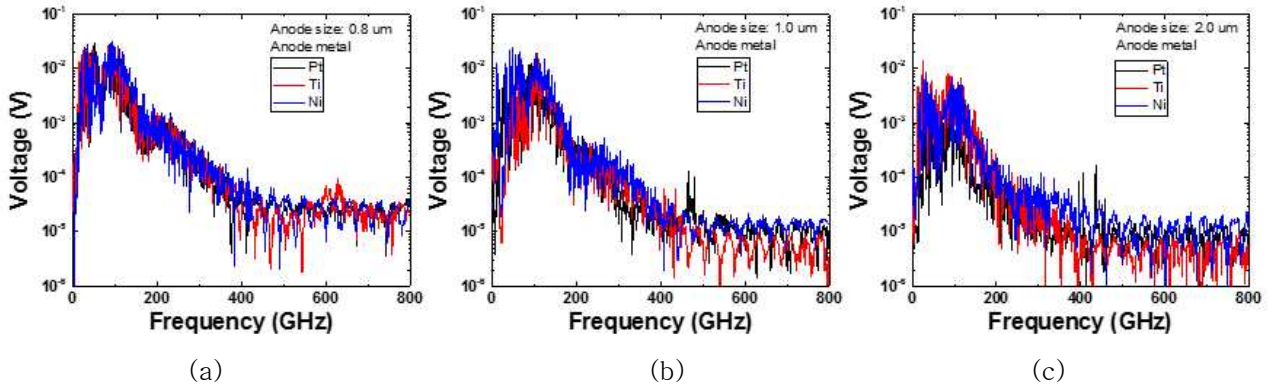
<그림 3-1-24> Antenna 별 Noise spectral density

표 3-1-2는 Pt, Ti, Ni의 200 GHz에서 각각 NEP 값이다. 계산된 값은 100, 30, 60 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 를 보이고 있었다. 예상과 마찬가지로 저항이 낮을수록 NEP가 낮게 나오는 것을 확인하였다. 본 실에서 제작한 horn antenna 집적형 SBD 소자의 경우 타겟 주파수에서 Responsivity가 Log-spiral antenna 대비 약 5배 이상 높은 값을 보여줬고 그 값을 적용해보면 4 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$  정도의 NEP 값을 기대할 수 있다.

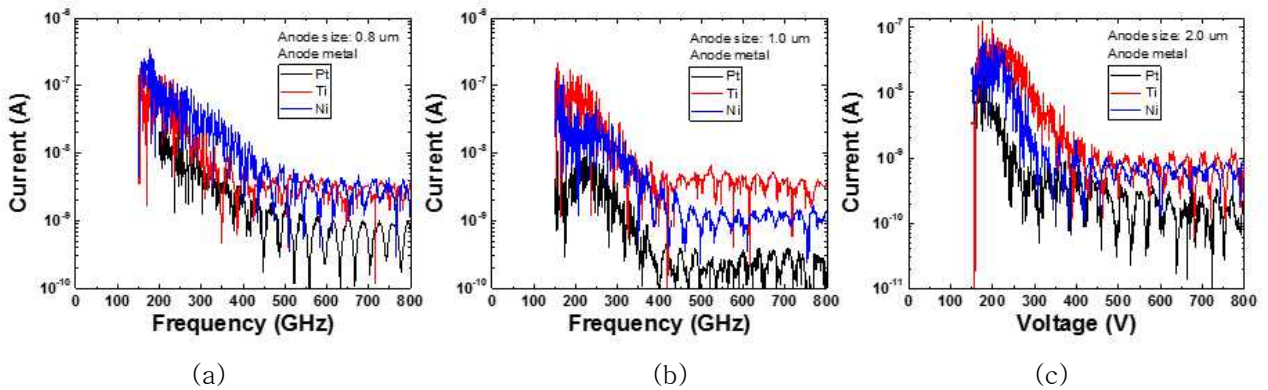
<표 3-1-2> Antenna별 noise spectral density

Metal (antenna)	Noise spectral density	Responsivity	NEP
Pt (Log-spiral)	100 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1000 V/W	100 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ti (Log-spiral)	30 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1000 V/W	30 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ni (Log-spiral)	60 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1000 V/W	60 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$

그림 3-1-25는 SBD의 THz spectrum이다. THz 발생기는 본실에서 제작한 bowtie antenna 집적형 UTC-PD를 사용하였다. 애노드 사이즈에 따라서 Pt, Ti, Ni를 비교해 봤을 때, 애노드 사이즈가 작을수록 신호와 cutoff frequency가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 애노드 메탈에 따른 변화는 찾아보기 힘들었다.



<그림 3-1-25> (a)0.8, (b)1.0, (c)2.0 um 의 애노드 크기에서 애노드 메탈에 따른 전압스펙트럼



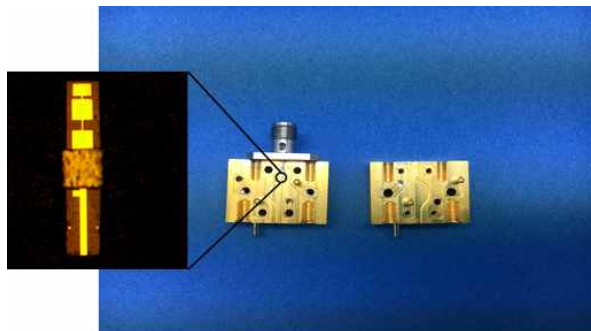
<그림 3-1-26> (a)0.8, (b)1.0, (c)2.0 um 의 애노드 크기에서 애노드 메탈에 따른 전류스펙트럼

그림 3-1-26은 SBD의 THz spectrum를 lock in amplifier에서 전류로 읽은 것이다. 쇼트키 장벽높이의 차이에 의한 IV 특성이 변화하였기 때문에 전류값이 달라질 것이라고 추측을 하였다. 그 결과 I-V 결과와 비슷하게 Ti와 Ni이 Pt에 비하여 200GHz 기준 약 8배 높은 값을 보였다. 일반적으로 사용되고 있는 신호처리가 전류증폭을 이용한 시스템이 많이 구성되어 있으므로 Ti가 가장 효과적인 애노드 금속이라고 생각된다. 하지만 쇼트키 장벽 높이가 가장 낮기 때문에 옴릭 특성이 나타나기 쉬워, 공정과 후속 처리에 각별한 주의가 요구된다.

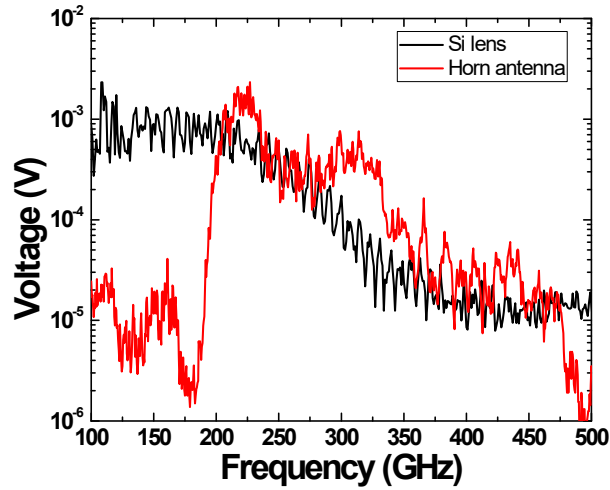
그림 3-1-27은 channel형으로 air-bridge 공정을 진행한 SBD의 검출신호이다. 측정결과 사용소자(virginia diode)에 근접한 responsivity (1000V/W 이상)와 cut-off frequency를 가지고 있는 것으로 확인이 되었다. 300 GHz까지는 air-bridge가 없는 SBD 소자들과 같은 모습을 보이면서 air-bridge 공정으로 인한 cut-off frequency 증가를 확인 할 수 있었다.

<그림 3-1-27> VDI와 ETRI SBD의 THz 스펙트럼 비교

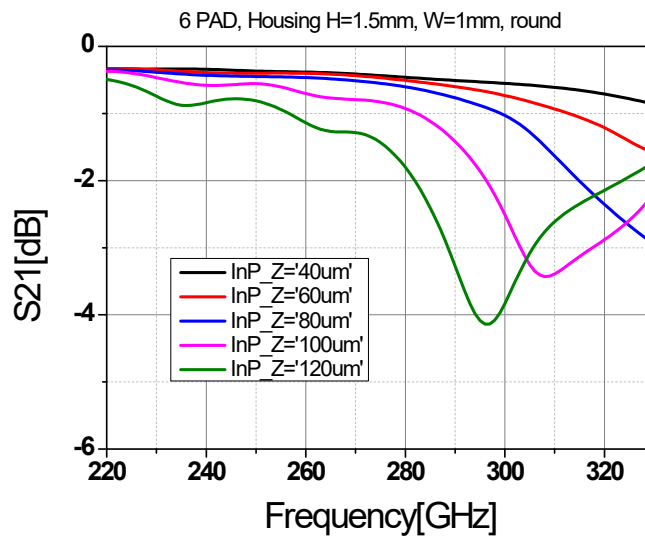
Horn안테나 집적형 SBD THz 검출기를 제작하였다. 그림 3-1-28에 제작된 검출기의 사진이 나타나 있다. 이 검출기의 THz에 대한 응답 특성은 그림 3-1-29에 나타나 있다. 응답특성을 전체적으로 보면, 220~330GHz대역에서 높은 response를 보였다. 이는 소자 제작에 사용된 WR3.4의 주파수 대역 특성에 의한 것이다. 전체적으로 실리콘 렌즈 집적형 검출기에 비해 7~8배 높은 응답특성을 보였다. 따라서, Horn 안테나 집적형 검출기가 실리콘 렌즈 집적형 검출기에 비해 대역이 좁지만, 더 높은 응답특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 270GHz근처 대역에서 낮은 응답 특성을 나타내었는데, 이는 horn 안테나 집적형 검출기 내에 SBD 소자를 flip-chip bonding하는 과정에서 나타난 것으로 판단되었다. 그림 3은 HFSS를 통해 전산모사한 flip-chip본딩의 손실 특성이다. 그림에서 SBD의 기판이 얇을수록 특성이 향상되는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 SBD기판의 두께는 약 110 $\mu$ m였으며, 이 두께 범위에서는 동작주파수 대역에서 손실이 증가됨을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다.



<그림 3-1-28> 제작된 THz 수신기

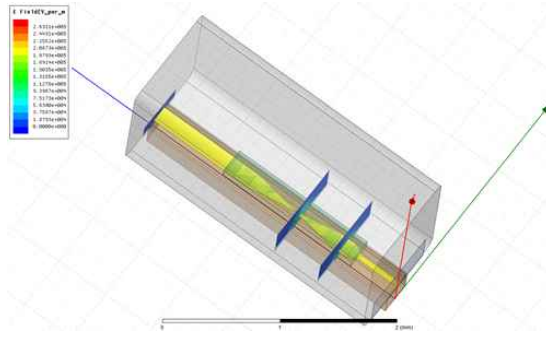


<그림 3-1-29> THz수신기의 응답특성



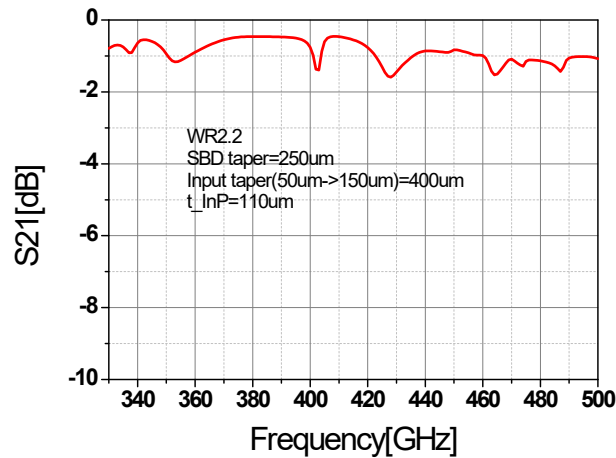
<그림 3-1-30> HFSS로 시뮬레이션된 SBD감지기의 두께에 따른 flip-chip 본딩의 손실

위의 제작과 특성평가에서 나타난 문제점을 극복하기 위하여, SBD기판의 두께 효과에 의한 손실을 줄일 수 있는 구조를 설계하였다. SBD의 active부분과 flip-chip본딩이 되는 기판의 PAD사이에 taper 구조를 포함함으로써 특성을 개선할 수 있을 것으로 생각된다. 그림 3-1-31 이러한 taper 구조를 나타내었다.

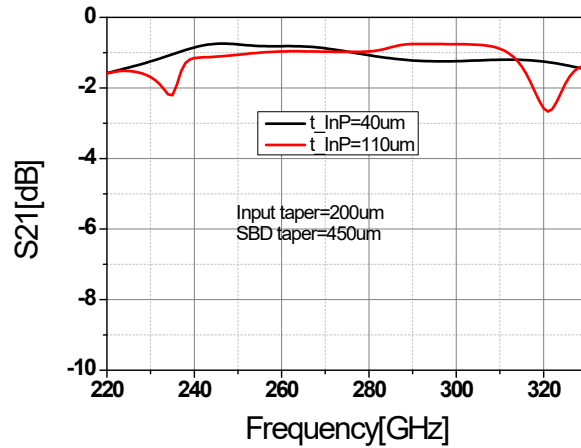


<그림 3-1-31> Taper 구조

그림에서 최적 taper 길이는 동작 주파수 대역에 따라 달라진다. 시뮬레이션 결과, WR3.4의 대역에서 최적 taper 길이는 450 $\mu\text{m}$  근처임을 알 수 있다. WR2.2의 대역에서 최적 taper 길이는 250 $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 그림3-1-32와 3-1-33은 각각 WR3.4와 WR2.2 대역 에서의 flip-chip본딩의 손실에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 3-1-32에서 보듯이 taper 구조를 적용할 경우 SBD기판이 두껍더라도 flip-chip본딩에서 낮은 손실 특성을 나타낼 수 있음을 보여준다.



<그림 3-1-32> WR3.4 대역에서의 flip-chip본딩의 손실 시뮬레이션 결과



<그림 3-1-33> WR2.2 대역에서의 flip-chip본딩의 손실 시뮬레이션 결과

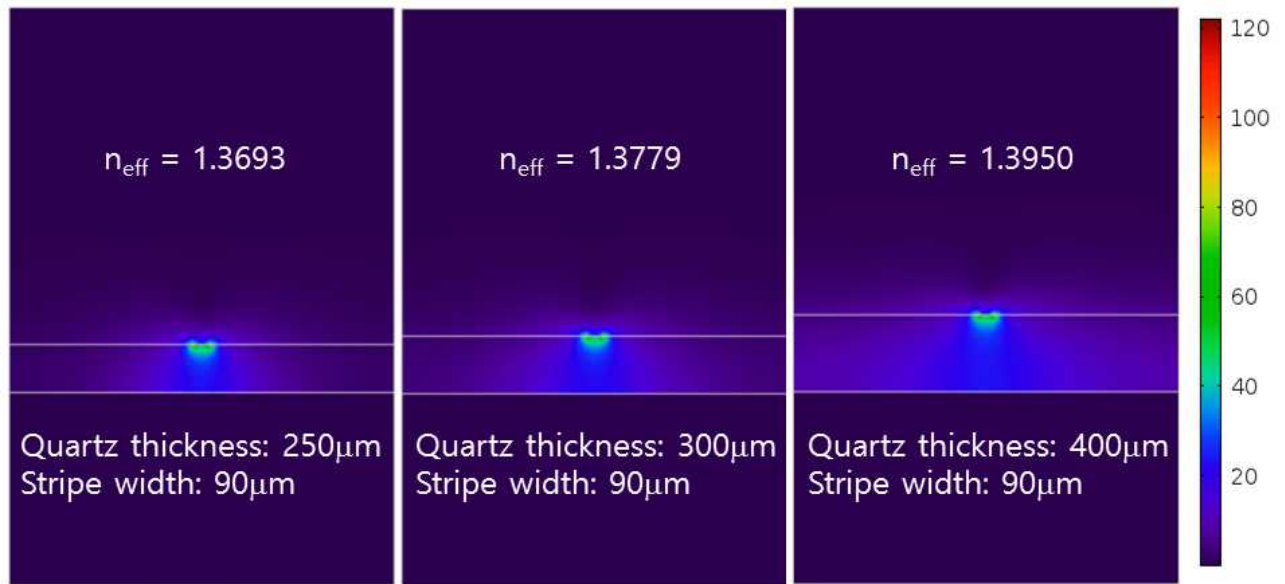
2차 제작과 특성평가에서는 위의 taper 구조를 적용할 예정이다.

#### 라)테라헤르츠파 1x2 분배기 및 결합기 기술 연구

연속파 기반 테라헤르츠 기술은 작고 가벼우며 경제적인 테라헤르츠 응용에 있어 많은 경쟁력을 갖고 있으나, 아직까지는 테라헤르츠파의 출력 면에서 개선을 위한 연구 개발의 필요가 높다고 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 근본적인 접근은, 작고 가벼우며 경제적인 특성을 유지하면서도 더욱 높은 효율을 얻을 수 있도록 새로운 소자를 만들어 내거나 기존 소자의 효율을 획기적으로 올리는 것이 가장 좋은 해결방안이라 할 수 있다. 그러나, 이러한 근본적인 접근은 많은 연구 개발의 시간과 노력, 그리고 자원의 투입을 필요로 한다. 본 연구과제에서는 새로운 소자에 대한 연구와, 기존 소자의 효율을 높이기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 조만간 가시적인 성과를 내는 소자들이 개발 될 것으로 기대한다.

또한, 테라헤르츠파의 분배기와 결합기는, 단순히 테라헤르츠파의 출력 향상을 위한 목적 뿐 아니라, 각 분배, 또는 결합용 채널 또는 도파로 암(arm)에 위상 변조기를 결합함으로써, 테라헤르츠 통신 뿐 아니라, 테라헤르츠 파면제어 기술과 같이 보다 고도화된 테라헤르츠 응용 기술을 위한 기초 기술을 제공하는 기본적인 소자라 할 수 있다. 이러한 관점에서, 이번 년도에는 간단한 전산모사를 통하여 테라헤르츠 분배기와 결합기를 설계하였다.

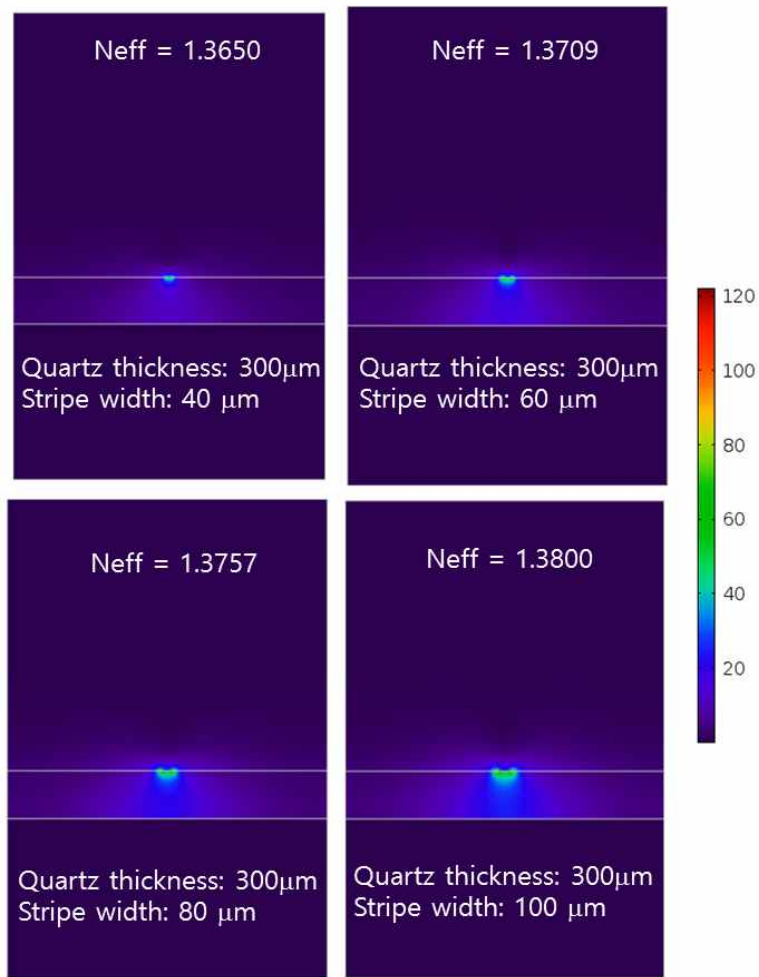
이를 위하여 먼저 테라헤르츠 연속파를 대상으로, 300GHz 단일 주파수에 대하여 1x2 분배기를 설계하였다. 분배기의 설계를 위하여, 테라헤르츠 도파로의 도파 특성을 먼저 살펴보기 위하여 테라헤르츠파의 도파 모드를 먼저 계산하였다.



<그림 3-1-34> 테라헤르츠 마이크로스트립 도파로의 기판 두께에 따른 유효 굴절율( $n_{\text{eff}}$ ) 값의 변화와 그 때의 모드의 필드 분포

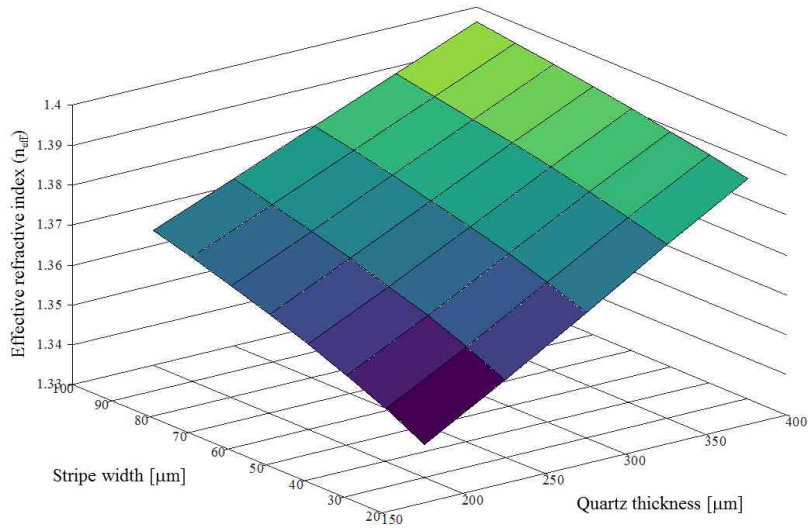
그림 3-1-34에 나타낸 것과 같이, 도파로의 기판인 quartz 기판(굴절율  $n=1.4585$  가정)의 두께를 변화시키며 300GHz 주파수에서 테라헤르츠 마이크로스트립 라인(micro strip line)의 도파 모드를 계산한 결과, 조사 대상인 150~400 $\mu\text{m}$  범위에서 기판 두께의 증가에 따라 유효 굴절율이 단순 증가하는 것 외에는 전반적으로 도파가 잘 이루어지는 것으로 관측되었다.

테라헤르츠 도파로의 마이크로 스트립 폭을 변화시키며 계산한 도파 모드의 결과가 그림 3-1-35에 나타나있다. 그림과 같이, 선폭의 변화에 따라 선폭이 증가하면 모드의 유효 굴절율도 증가하는 것으로 나타났으나, 역시 큰 변화폭을 갖지 않기 때문에 잘 도파되는 것으로 확인되었다.



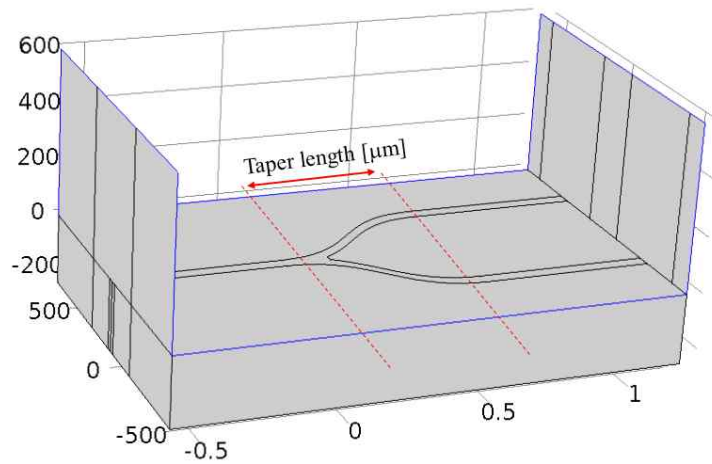
<그림 3-1-35> 테라헤르츠 마이크로스트립 도파로의 선폭 변화에 따른 유효 굴절율( $n_{eff}$ ) 값의 변화와 그 때의 모드의 필드 분포

이처럼 기판의 두께와 마이크로 스트립의 선폭을 변화시키며 계산 한 모드의 유효 굴절율을 다음 그림 3-1-36에 나타내었다. 이 결과에서 보듯, 도파로의 기하학적 구조값 즉, 기판의 두께와 마이크로스트립의 선폭과 같은 값에 대하여 유효 굴절율 값의 변화가 있으나, 단조 증가 형태의 의존성을 보이기 때문에, 조사 범위 내에서 테라헤르츠파를 도파시키는 데에는 큰 무리가 없을 것으로 예상된다. 이러한 특성은, 테라헤르츠 도파로의 분배기, 결합기 등을 제작함에 있어 구조적 변화가 존재하는 구간에서도 모드의 정의가 비교적 잘 되어 큰 손실 없이 도파로형의 디바이스를 구성 할 수 있다는 의미로 해석 할 수 있다.



<그림 3-1-36> 테라헤르츠 마이크로스트립 도파로의 구조에 따른 유효굴절율 변화

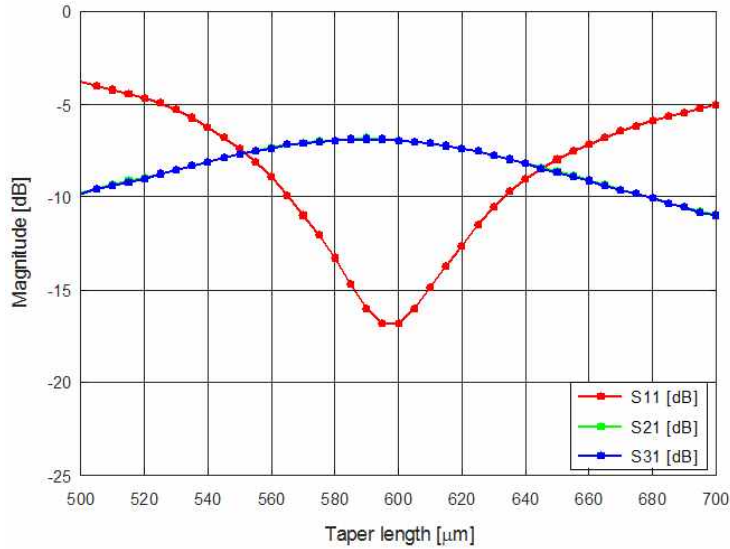
이로부터 도파로형 분배기를 설계하였다. 계산에 사용된 1x2 분배기의 구조를 그림 3-1-37에 나타내었다. 그림에서 좌측이 입력 포트이고, 우측에 두 개의 출력 포트가 존재한다. 계산에 사용된 기판의 두께는 250 $\mu\text{m}$ , 마이크로스트립 선폭은 50 $\mu\text{m}$ 로 가정하였으며, 중간 분배기 길이를 변화시키며 도파된 테라헤르츠파가 양단의 포트에 잘 전달되는 길이를 찾아보았다.



<그림 3-1-37> 테라헤르츠 마이크로스트립 도파로 1x2 분배기

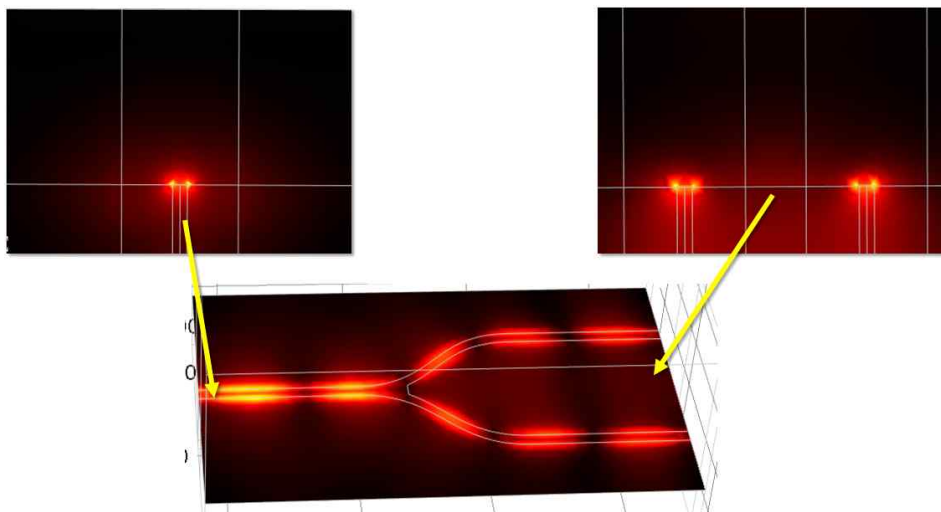
전산 모사를 통한 계산 결과가 3-1-38에 나타나있다. 그림의 결과에서 볼 수 있듯, 원활한 분배를 위해서는 테이퍼의 길이를 적절하게 설정하는 것이 중요한 것으로 나타났다. 이 계산 결과, 가장 반사(S11)가 적은 테이퍼 길이는 약 590 $\mu\text{m}$ 로 관측되었으며, 이 때 양단에 분배되는 테라헤르츠파의 출력 손실은 약 6.7dB로 관측되었다. 도파 손실을 무시 할 경우, 포트당 3dB의 출력 손실값을 얻어야 하겠으나, 주어진 조건 하에서 임피던스 부정합으로 인한 산란 등에 의한 손실이 크게 작용 하였을 것으로 추정된다. 통상 마이크로파에서 사용하는 마이크로스트립 도파로형 분배기나 결합기에는 이러한 임피던스 부정합을 보상하기 위하여 추가적인 저항 등을 부가하여주는 등의 기법을 사용하나, 테라헤르츠 대

역에서는 도파로의 구조 등을 통하여 이러한 기능을 구현 하여야 한다. 따라서 보다 손실이 적은 도파로 구조를 얻어내기 위하여 추후에는 도파로 결합부의 디자인을 변경하는 등의 보다 다양한 구조적 접근이 필요 할 것으로 예상된다.



<그림 3-1-38> 테라헤르츠 마이크로스트립 도파로 1x2 분배기

위와 같이 S11이 최소값을 갖는 조건일 때 도파되는 테라헤르츠파의 필드 세기 분포를 그림 1-39에 나타내었다.



<그림 3-1-39> 테라헤르츠 마이크로스트립 도파로 1x2 분배기에서 테라헤르츠파의 필드 세기

테라헤르츠 결합기의 경우, 위의 분배기의 포트를 역으로 생각하면 된다. 그러나, 분배기의 경우와는 달리, 결합기의 경우, 두 개의 입력 포트가 존재하기 때문에, 이들 입력 포트의 위상을 동일하게 맞추어 주는 것이 중요하게 된다. 이러한 관점에서, 향후에는 도파로 형태의 결합기 전단에 위상 조절기를 집적 하여주는 방식의 접근이 필요할 것으로 보인다.

마) 신개념 테라헤르츠파 검출기 기초 연구

여기서는 신개념 테라헤르츠파 검출 소자를 위한 기초 연구 결과에 대해 기술한다. 광전도 기반 테라헤르츠 검출 소자는 그 주파수와 위상이 검출하고자 하는 테라헤르츠파의 주파수 및 위상과 일치하는 광원을 이용하여 전극 사이에 형성된 화합물 반도체의 전도도를 변조하는 photonic frequency down-conversion을 통해 테라헤르츠파의 전기장 세기에 비례하는 직류 신호를 생성한다.

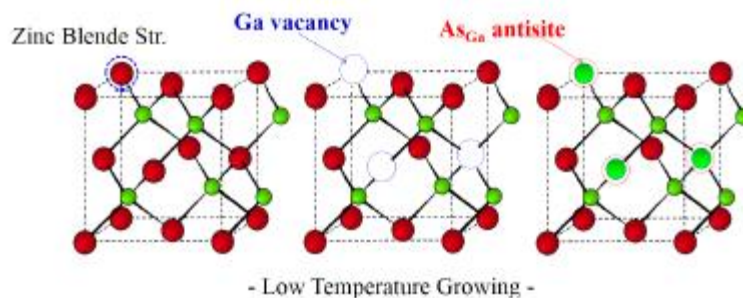
이러한 photomixing 과정에서 가장 중요한 요소는 화합물 반도체의 전기 전도도를 얼마나 빠르게 변조할 수 있는지의 여부이다. 대략적으로, 1 THz의 주기가 1 피코초라는 사실과 일반적인 반도체 물질의 평균전하수명시간이 수 나노초 이상임을 감안할 때, 일반적인 반도체 물질로는 이러한 초고속 소자를 제작하기 어렵다.

테라헤르츠 발생 소자의 경우는 외부의 전압원을 통해 강하게 바이어스된 광전도 물질 혹은 광전도 물질을 포함하는 구조에 광을 입사시켜, 광전도 물질의 전도도를 변조하여 테라헤르츠파를 발생시킨다. 이 경우, 강한 전기장에 의해 광에 의해 생성된 전자-정공 쌍이 전극으로 빠르게 이동할 수 있다. 이 경우 광전도 물질의 전자-정공 재결합에 의한 평균수명시간의 영향에 비해 전자/정공이 전극까지 이동하는데 걸리는 유효 시간에 의해 그 성능이 결정된다. 따라서 물질의 한계가 큰 영향을 주지 않는다.

반면, 테라헤르츠 검출 소자의 경우 전자 혹은 정공의 포집은 검출하고자 하는 테라헤르츠파가 제공하는 전기장에 의해 이루어진다. 이 테라헤르츠파의 전기장 세기는 외부에서 인가한 전기장에 비해 매우 약하다. (1/1000 이하로 추정된다.) 따라서 전하 이동 시간에 의한 유효 전하수명시간의 단축 효과를 기대하기 어렵다.

이러한 이유로, 광전도 현상을 이용한 테라헤르츠 검출 소자에 있어서 가장 핵심적인 요소는 결국 어떤 방법으로 전하의 평균수명시간을 피코초 수준으로 줄이는가 하는 부분이며, 이와 관련해 지난 20년간 개발된 방법은 광전도 물질 내에 대량의 결정 결함을 생성하여, 이러한 결정 결함들이 전자-정공 쌍들을 빠르게 흡수, 이를 통해 평균전하수명시간을 피코초 수준으로 단축하게끔 하는 기법들이다. 이러한 물질 관련 연구는 최근까지도 소자 연구의 중요한 주제가 되어 왔다.

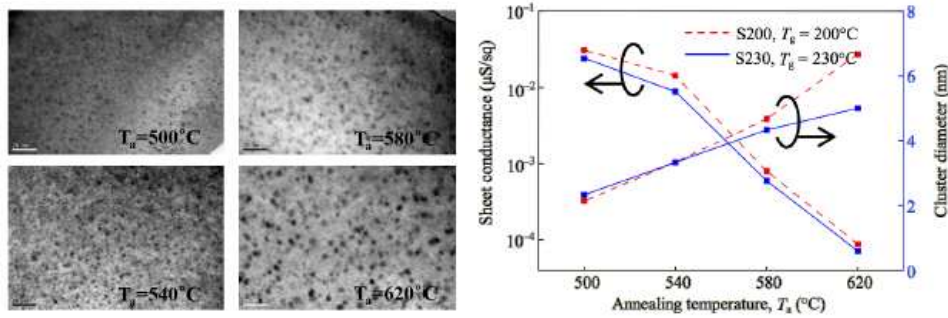
대표적인 물질로써 분자선 증착법 (molecular beam epitaxy, MBE)을 통한 저온성장 반도체들을 들 수 있다. 아래 그림을 통해 간략히 설명하고자 한다.



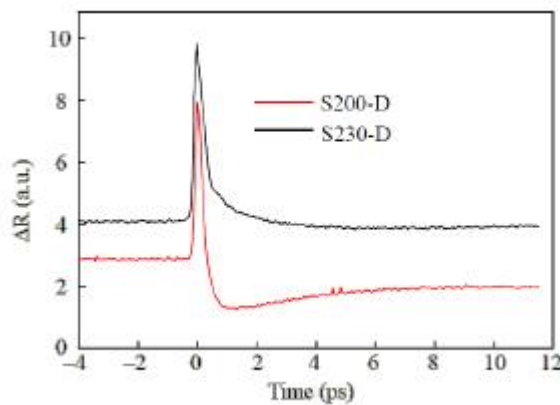
<그림 3-1-40> 저온 성장 원리

위 그림 3-1-40에 보인 바와 같이, GaAs와 같은 III-V족 반도체 물질을 통상적인 성장 온도인 600~700도 사이에서 성장하지 않고, 이보다 훨씬 낮은 온도인 200도 근방에서 성장하게 되면, 본래 결정 구조에서 Ga와 같은 III족 원소가 자리해야 할 위치에 As와 같은 5족 원소가 자리하게 된다 (As antisite). 이로 인해 격자 상수가 기관과 상이하게 되며, 결정 구조는 여전히 유지하기 때문에 X-ray 회절법을 통해 얼마나 많은 양의 As antisite가 존재하는지를 측정할 수 있다. 이러한 As antisite들은

전자-정공을 붙잡는 deep center의 역할을 함으로써 평균전하수명시간을 단축하여 1 피코초 이하의 수명시간을 가능하게 한다. 반면, 그 자체로 매우 전도성이 높기 때문에, 광이 입사하지 않은 상태에서도 전류를 잘 흐르게 하여, 이 자체로 테라헤르츠 소자를 제작할 수 없다. 추가적인 열처리 과정을 통해 암전류를 줄일 수 있으며 이를 통해 테라헤르츠 소자의 제작에 적합한 특성을 가진, 즉, 암전류가 작고 전하평균수명시간이 피코초 수준인 물질을 얻을 수 있다. 아래 그림에 열처리로 인한 물질, 전도도 및 전하수명시간의 변화를 보였다.



<그림 3-1-41> 열처리에 의한 arsenic cluster 형성 (좌) 전기전도도 및 cluster 직경 변화 (우)



<그림 3-1-42> Transient reflectance 기법을 통한 물질 평균전하수명시간 측정 결과

이러한 저온 성장 GaAs 물질은 800nm 대역의 펄스/연속파 광원을 이용한 테라헤르츠 발생/검출 소자에 주로 사용되어 왔다. 1300 nm/1500 nm의 광통신 대역에서 테라헤르츠 소자를 제작하기 위한 물질로써 저온성장 InGaAs 및 저온 성장 InGaAs/InAlAs 다층구조 등이 개발되었다 [11-13].

그러나, 이러한 물질의 제작을 위해서는 많은 복잡한 공정이 필요하다. 특히 MBE 법이 문제가 되는데, 그 이유는 일반적으로 MBE 법의 경우, 고품질의 진공 유지를 위해 상당히 긴 유지보수 기간이 필요하며, 통상적으로 600도 이상에서 결정 성장을 전제로 하기 때문에 저온 성장에 사용되는 200도 내외의 낮은 온도 범위에서 성장 온도의 제어가 매우 어렵다. 또한 부가적인 열처리 공정이 수반되기 때문에, 개발 및 양산에 있어서 많은 어려움을 야기한다. 이러한 저온 성장을 일반적인 광소자 제조에 널리 사용되는 유기금속화학증착법 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)을 통해 수행할 수 있다면 좋겠지만, 이 기법에서는 원료가 되는 유기금속을 cracking 하는데 최소 350도 이상의 온도가 요구되기 때문에, 별도의 증착 장비 개발 없이는 저온 성장을 수행하는 것이 불가능하다.

본 연구의 목적은 지난 20년간 테라헤르츠 광전도 검출기의 제작에 필수적인 요소로 간주되어 온 저온 성장 반도체 및 결합 생성된 반도체에서 벗어나, 양산성과 안정성이 보장된 기존 화합물 반도체 물

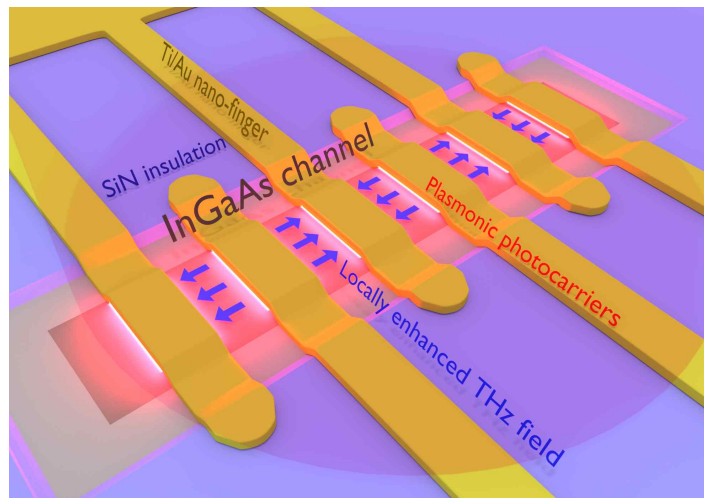
질 및 공정 기술을 통해 광전도 테라헤르츠 검출기를 개발하는 것이다. 이러한 시도는 세계 최초이며, 실제 테라헤르츠 기술의 적용을 위해서 매우 중요한 기술이라고 할 수 있다.

테라헤르츠 검출용 포토믹서의 개발을 위해 광전도도의 변조 속도를 빠르게 하는 것이 중요하다. 광전도 물질의 전하수명시간을 물질 특성을 통해 제어할 수 없는 상황에서, 변조 속도를 빠르게 하기 위해서는 광 여기에 의해 생성된 전자-정공 쌍을 빠른 시간 내에 포집해야 한다. 특히 전기장의 세기가 매우 약한 상황에서 동작해야 하는 검출용 소자에서, 이와 같은 목적을 달성하기 위해서는 나노구조의 개발이 필수적이다.

빠른 전하 포집을 위해 동원할 수 있는 수단으로써, 다음 세 가지를 들 수 있다.

1. 나노전극의 작은 크기에 의한 테라헤르츠 전기장 증폭 효과.
2. 나노전극의 플라즈몬 모드를 이용, 전극 주변의 국소 영역에서 전자-정공 생성.
3. 광 흡수 영역의 부피를 최소화 함으로써, 포집해야 할 전자-정공 개수의 최소화.

위에 나열한 세 가지 고려 사항들을 반영, 나노포토믹서의 구조를 대략적으로 설계하였다.

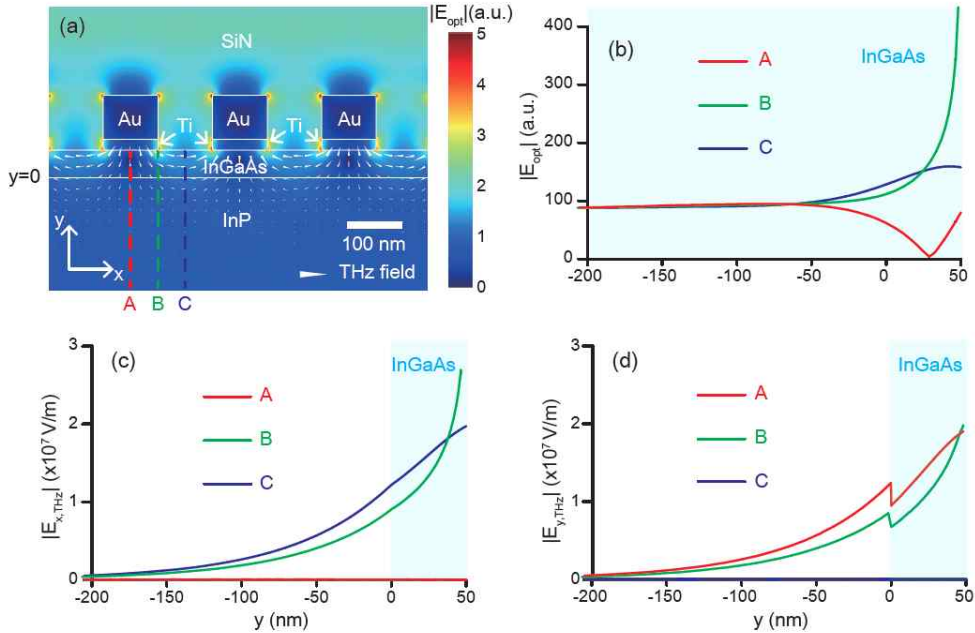


<그림 3-1-43> 나노 포토믹서 개념도

위 그림에 나노포토믹서의 개념을 보였다. 기본적으로 이 구조는 절연성 InP 기판상에 MOCVD법으로 성장된 InGaAs 광흡수층을 기반으로 한다. 광흡수층은 습식 식각을 통해 매우 작은 크기의 메사 구조를 형성하고, 이 위에 나노전극을 서로 깎지긴 형태로 위와 같이 형성한다. 나노전극은 테라헤르츠 안테나에 연결되어, 안테나에 입사된 테라헤르츠파는 나노전극의 두 극 사이에 일정 크기의 전위차를 형성하며, 이 전위차에 의해 광흡수 영역에 생성된 전자-정공 쌍이 포집되게 된다. 테라헤르츠파와 여기광의 파장과 위상이 일치하면, 소자에 연결된 전류계를 통해 전류가 측정되며, 이는 테라헤르츠파가 생성한 전위차에 비례하게 된다. 따라서 테라헤르츠파를 검출할 수 있다.

이러한 설계에서 의도하는 바는, 첫째로 플라즈몬 효과를 이용하여 전극 주변에 국부적으로 전자-정공 쌍을 형성, 빠른 포집을 가능하게 하는 것과, 둘째로 전극간 간격을 최소화하여 같은 전위차에 대해 되도록 큰 전기장을 형성함으로써 전하의 포집을 원활하게 한다는 것, 그리고 셋째로 매우 얇고 작은 면적의 광흡수층을 사용하여 포집해야 할 전자-정공 쌍의 개수를 적절하게 제어하는 것이다. 따라서, 소자 설계의 핵심은 (1) 광흡수층의 두께 및 면적, (2) 나노전극의 전극 개수, 간격 및 주기 등이다 [14-16].

이러한 세부적인 설계 요소를 확정하기 위하여 COMSOL을 이용, 수치 해석을 통해 전극 주변부의 광 분포 및 전기장 분포를 계산하여 보았다. 그 결과를 다음에 보였다.



<그림 3-1-44> 나노포토믹서 구조에서 전계향상 및 광분포. (a) 나노 전극 단면에서, 광 및 전기장의 2차원 분포. (b) (a)에 표시된 A, B, C 점선상의 광 세기 분포. (c) A,B,C 점선상에서 x방향 전기장 세기. (d) A,B,C 점선상에서 y방향 전기장 세기

그림 3-1-44 (a)에 나노포토믹서에 입사된 1300 nm 파장의 레이저가 여기한 광 분포와 전극간에 인가된 2 V 바이어스에 의해 형성된 전기장의 분포를 보였다. 화살표는 전기장의 크기와 방향을 의미하며, 매핑된 색깔은 광의 세기를 의미한다. 보다 정량적인 분석을 위하여, 그림 3-1-44 (a)에 표시된 A, B, C 점선을 따라, 광 세기와 전기장 세기를 보였다. 계산에서, 입사광은 나노전극 방향에 수직 방향의 편광으로, 소자 표면에 수직 입사하는 것으로 가정하였다.

그림 3-1-44 (a)에서 관찰할 수 있는 사실은 다음과 같다. 첫째로, 나노전극 주변부에서 강화된 광 분포를 통해 플라즈몬 효과가 일정 부분 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나, 그 효과는 이전 논문들에서 발표된 바와 같이 크지는 않으며, 그 이유는 금속 나노전극의 adhesion을 높이기 위한 Ti 막의 흡수 유전율이 1300 nm 대역에서 그리 크지 않기 때문에 플라즈몬 효과가 제한적이기 때문인 것으로 생각된다. 둘째로, 전기장 분포가 InAs 표면에 국소화되어 있음을 알 수 있다. 이는 서로 깎지킨 전극 구조로 인한 것으로, 서로 다른 전극을 갖는 나노전극이 멀리 떨어져 형성된 경우와 비교하였을 때, 표면 국소화 효과는 매우 큰 것으로 생각된다.

플라즈몬 효과는 전극의 주기에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 본 소자에서 이 효과를 극대화하기 위해 주기를 조절할 이유는 없는 것으로 판단하였다. 따라서, 전극의 주기는 기존 사용하던 200nm를 그대로 사용하는 것으로 정하였다. 또한, 전기장의 표면 국소화 정도가 매우 커 보이므로, 이를 그림 3-1-44 (b)-(d)를 통해 보다 자세히 살펴보았다.

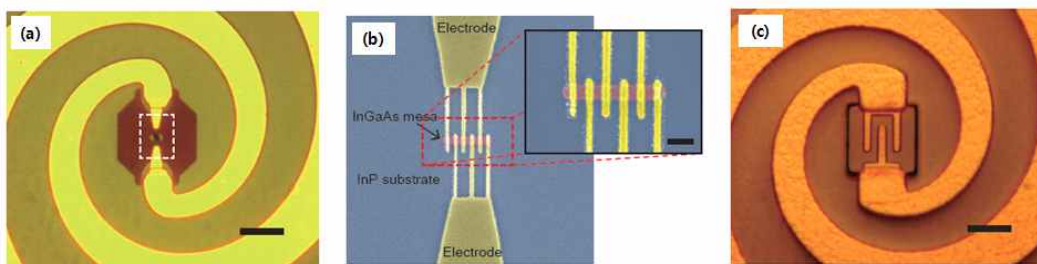
그림 3-1-44 (b)에 A,B,C 점선을 따라 그린 광세기를 보였다. 이 계산에서는 전극 아래의 물질이 모두 광을 흡수하는 InGaAs 물질인 것으로 가정하였다. 그 이유는 광 흡수층의 두께를 결정할 때,

InGaAs에 의한 광 흡수를 고려하기 위해서이다. 그림 3-1-44 (c),(d)에는 같은 선상에서 x 및 y 방향의 전기장 세기를 보였다. 그 결과, 광 분포는 플라즈몬 효과에 의해 전극 및 표면에서 일부 국소화되나, 표면에서 100 nm 이상 떨어진 깊은 위치에서도 최대 세기의 1/4이하의 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 따라서, InGaAs 광 흡수층의 두께를 매우 두껍게 할 경우, 표면에서 비교적 멀리 떨어진 깊은 위치에서도 상당량의 전자-정공이 여기될 것임을 알 수 있다. 반면, 전기장 세기는 표면에서 멀어짐에 따라 빠르게 감소하여, 200 nm 이상의 깊이에서는 거의 0에 가까워짐을 알 수 있다. 따라서, InGaAs층의 두께를 두껍게 하면, 전기장 세기가 매우 약한 위치에서 상당량의 전자-정공이 생성될 것이며, 이는 전극에 의해 제대로 포집될 수 없을 것이다. 따라서, 이와 같은 소자 구조에서 흡수층은 전기장이 강한 표면 200nm 이내에 형성되어야 한다. 최대의 포집 효율을 위해 흡수층 두께는 50nm로 결정하였다.

나노전극의 크기 효과에 의해, 2V 전위차에 대해 전기장 세기는 대략  $10^7$  V/m 수준으로 향상되는 것으로 나타났다. 후술하겠지만, 대략 3mV 정도의 전위차가 0.25 THz의 테라헤르츠파에 의해 형성될 경우, 전자의 이동도를 고려하면 전자는 2 피코초 동안 42 nm를 이동하는 것으로 생각된다. 이는 나노전극간 간격의 절반에 해당되는 거리로, 어느 정도 적절한 범위 내에서 설계된 것으로 생각할 수 있다.

광 흡수층의 면적을 결정하는 데 있어서, 중요한 고려 사항은 나노전극에 의한 소자 capacitance 증가이다. 기존 포토믹서의 경우, 대략 10  $\mu$ m 길이, 1  $\mu$ m의 폭을 갖는 전극을 1.5  $\mu$ m 간격으로 3개 배치하는데, 이 경우 1~3 fF의 capacitance를 갖는 것으로 알려져 있다. 소자와 함께 집적되는 안테나의 방사저항과 이 capacitance를 고려하면 대략 600 GHz~1THz에서 주파수 제공에 반비례하는 roll-off 특성이 나타나는 것으로 알려져 있으며, 실제로는 안테나의 capacitance로 인해 더 낮은 주파수에서 이러한 특성이 나타난다. 나노전극 소자의 경우, 매우 작은 전극간 간격으로 인해 소자의 capacitance가 매우 커질 가능성이 있으며, 이를 고려하면 나노전극이 교차하는 영역의 크기를 최소화하여 capacitance 증가를 최소화해야 한다. 따라서, 전극의 교차부는 대략 500 nm가 되게끔 설계하였고, 이를 고려하여 흡수 영역의 폭은 200 nm로 제한하였다. 나노전극의 개수가 지나치게 늘어날 경우 전계 향상 효과가 충분하지 않을 수 있고, 소자의 capacitance도 커지기 때문에, 2개, 6개, 12개, 18개로 제작, 그 효과를 실험적으로 확인할 수 있도록 하였다.

표준 화합물 반도체 공정을 통해 소자를 제작하였다.

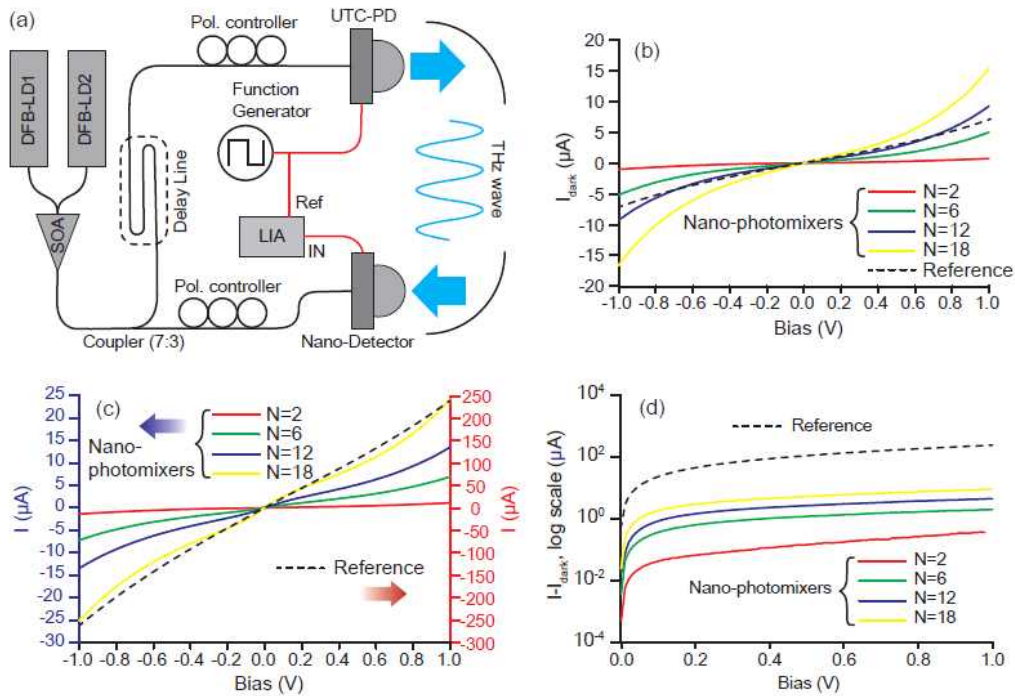


<그림 3-1-45> 제작된 소자 사진 (a) 광학현미경 사진 (b) 광전도부 SEM 사진 (c) 기존 소자. 광학현미경 사진의 scale bar는 10 $\mu$ m, SEM사진의 scale bar는 300nm.

널리 사용되는 바와 같이, 광대역 log-spiral antenna를 집적하였다. 광흡수 영역은 e-beam lithography 기법으로 패터닝하여 습식 식각을 통해 형성하였다. 전극은 역시 e-beam lithography, e-beam evaporation 및 lift-off 공정을 통해 형성하였다. 광흡수 패터닝에는 HSQ를, 전극 형성에는 PMMA P6 photoresist를 이용하였고, 전극의 두께는 20 nm Ti layer, 80 nm Au layer를 사용하여 총 100 nm이다. 나노전극 형성 이전에 50 nm 두께의 SiN을 PECVD를 통해 증착하고, 광흡수 영역상의 SiN을 습식 식각으로 제거하여, 전극이 InP 기판상에 직접 증착되지 않게끔 하여, 암전류를 최소화

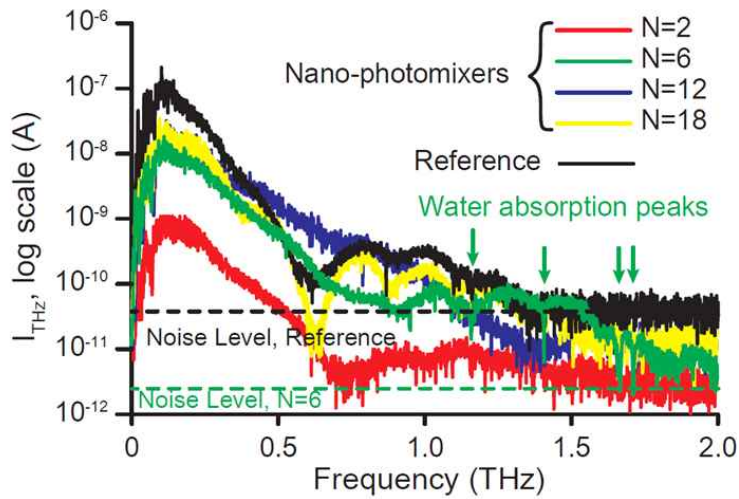
하였다. 이후 표준적인 공정을 통해 안테나 패턴을 형성하였다. 특히 흡수층의 손상을 막기 위해 dry etching process는 적용하지 않았다. 기존 소자와의 비교를 하기 위해, 저온 성장된 InGaAs/InAlAs 다층막 (12nm/8nm, 100 pairs) 기반 포토믹서를 그림 3-1-45 (c) 와 같이 제작하였다. 저온 성장은 310도에서 수행되었으며, 510도에서 성장한 700 nm 두께의 InAlAs 버퍼 위에 성장하였다. 열처리는 560도에서 10분간 수행하였으며, 수명 시간은 1.12 피코초, 면 저항은 30 k $\Omega$ -cm 이상으로 나타났다. 최고 수준의 저온 성장 기관은 아니지만, 일정 수준 이상의 성능을 가진 소자를 제작 가능하다.

이렇게 제작된 소자를 기존 연속파 테라헤르츠 분광 시스템을 통해 측정하였다. 분광 시스템은 UTC-PD를 테라헤르츠 발광 소자로 사용하며, 두 대의 DFB-LD를 사용하여 반복 주파수 조절이 가능한 비팅광원을 생성하여 광대역 측정을 수행하였다. SOA를 통해 추가로 비팅 광원의 출력을 향상시켰다. UTC-PD 모듈은 25 mW의 광출력으로 구동하였고, peak-to-peak 크기가 1V이고 오프셋이 0.5 V 인 1kHz 구형파로 바이어스를 인가하였으며, lock-in-amplifier를 이용한 호모다인 법으로 테라헤르츠 파를 검출하였다. 제작된 포토믹서는 10mW의 비팅광원으로 구동하였으며, SOA 로 증폭된 비팅광원을 7:3 coupler로 나누어 각각 발생 및 검출에 활용하였다. 측정 구성과 테라헤르츠 측정 이전에 측정된 dark I-V 및 photo I-V 특성과 이의 차이를 아래 그림에 나타내었다.



<그림 3-1-46> (a) 측정 셋업 개략도. (b) dark I-V curve (나노전극 개수별) (c) photo I-V curve (나노전극 개수별) (d) 전류 차

위 그림에서 볼 수 있듯이, 나노포토믹서의 경우 기존 저온성장 기반 포토믹서에 비해 현저히 낮은 photocurrent값을 가진다. 암전류를 제외하면, 그림 3-1-46 (d) 에 나타낸 바와 같이, 대략 1/100 이하의 photocurrent를 보여 준다. 이는 나노포토믹서의 광흡수 영역이 매우 작기 때문인데, 실제 나노포토믹서의 광 흡수 영역의 부피는 6개 나노전극 소자를 기준으로, 기존 소자의 1/20000 정도이다. 동일 바이어스, 동일 광량에서 전류가 작다는 것은 테라헤르츠 검출 효율이 낮다는 것으로 받아들여질 수 있겠지만, 실제 중요한 것은 피코초 수준의 짧은 시간 내에 전극으로 포집되는 전자의 개수이므로, 오히려 포집 효율 면에서는 나노포토믹서가 더욱 우수할 수 있고, 테라헤르츠 검출 감도 역시 더욱 우수할 수 있다.

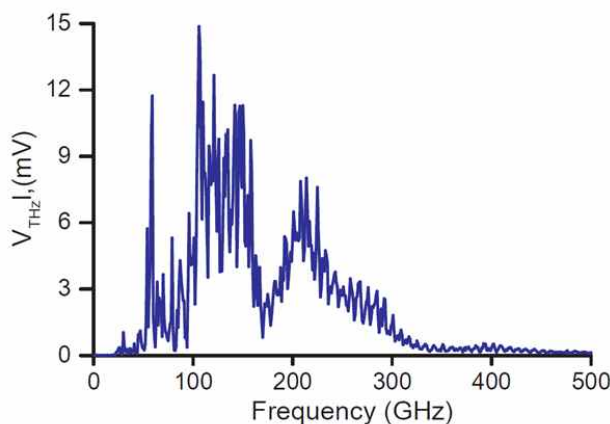


<그림 3-1-47> THz 측정 스펙트럼

위 그림 3-1-47에 나노포토믹서를 검출기로 사용하여 수행한 광대역 스캔 결과를 보였다. 흑색 선은 기준 소자를 이용하여 얻은 결과이며, N은 나노전극 개수를 의미한다. 잡음 수준은 테라헤르츠 빔 경로를 금속 판으로 차단한 상태에서 동일한 측정을 반복하여 얻었다.

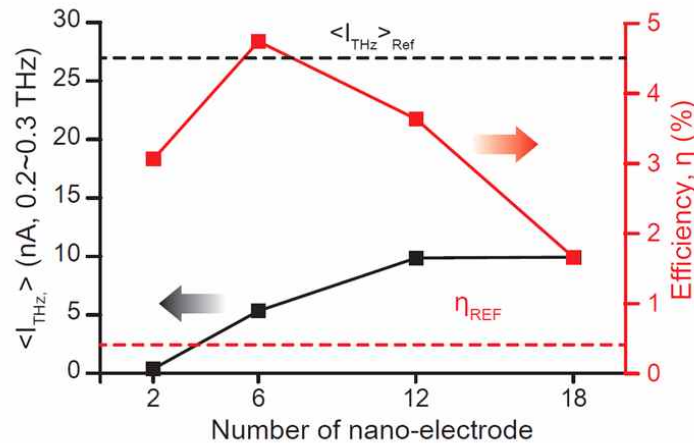
측정 결과, 나노전극 개수가 증가할수록 측정 감도는 높아지는 것으로 나타났다. 기존의 저온 성장 소자의 신호 강도가 2~3배 정도 높은 것으로 나타났지만, 나노포토믹서의 경우 전반적으로 잡음 수준이 기존 저온 성장 소자의 1/10 이하 수준으로 보다 나은 특성을 보였다. 결과적으로, 나노전극 개수가 6개인 소자의 경우, 2 THz까지 측정 가능하였다. 참고로, 이 측정은 UTC-PD와 검출용 나노포토믹서를 100% 성능으로 구동하여 얻은 결과가 아니며, 상호 비교를 위한 실험 결과이다.

소자의 효율과 나노전극 개수의 효과를 보다 정량적으로 확인해 보기 위해서는 실제 포토믹서의 전극에 테라헤르츠파에 의해 형성되는 전압이 얼마인지를 알아야만 한다. 이를 정량적으로 계측하기 위해 Schottky barrier diode (SBD) 검출기를 사용, 동일 측정을 반복하였다. SBD는 정류 작용을 통해 테라헤르츠파를 검출하므로, 그 출력 전압이 테라헤르츠파에 의한 전압의 실효치에 해당되는 것으로 해석할 수 있다. 물론, 안테나 효율 등이 상이할 것이나, 대략적인 정량화의 목적으로 활용할 수 있다.



<그림 3-1-48> SBD로 측정된 테라헤르츠 스펙트럼

위 그림에 보인 바와 같이, 200~300 GHz 구간에서 대략 3 mV 가량의 전압이 측정된다. 따라서, 만일 나노포토믹서, 혹은 기존 저온성장 물질을 사용한 포토믹서에서 전하 포집 효율이 100%라면, 그림 3-1-46 (d)에서 3mV에 해당되는 전류 값이 테라헤르츠 포토믹서에서 측정되어야 할 것이다. 그러나 실제로는 그렇지 않으며, 따라서 100% 수집을 가정한 전류 값과 실제 측정된 테라헤르츠 전류의 비를 전하 포집 효율로 정의할 수 있을 것이다.



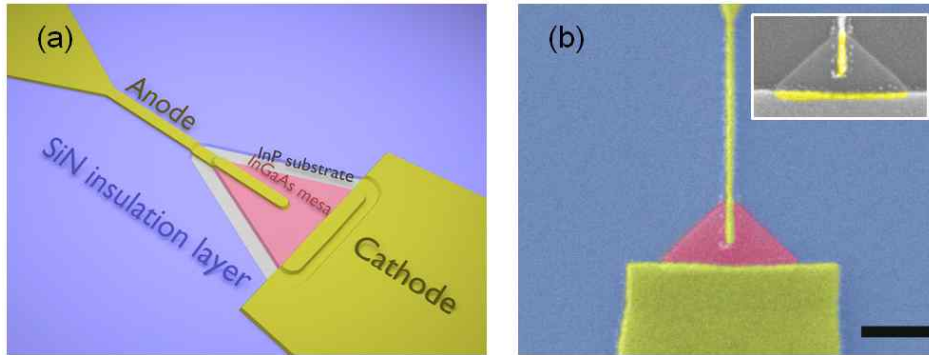
<그림 3-1-49> 평균 테라헤르츠 전류 및 전하수집효율

각 소자의 전하 포집 효율을 위 그림에 나타내었다. 결론적으로, 기존 저온성장 포토믹서의 경우 0.5%에 불과한 전하포집효율을 보이는 반면, 나노소자의 경우 개수에 따른 차이는 있지만, 최대 5%이상의 전하수집 효율을 나타내었다. 따라서 근본적으로 MOCVD로 성장한 박막을 이용한 나노전극 포토믹서가 기존 소자에 비해 우수하다는 결론을 얻었다. 이 결과는 세계 최초이며, 현재 저널에 투고되어 리뷰 과정에 있다.

현재까지 개발된 최고 성능의 포토믹서의 경우 3.8 THz까지 측정 가능하다. 본 소자의 개념을 보다 발전시켜 세계 최고 수준을 능가하는 새로운 소자를 개발하고자 한다. 이를 위해 현재 소자에 내재되어 있을 수 있는 문제점을 몇 가지 들고자 한다.

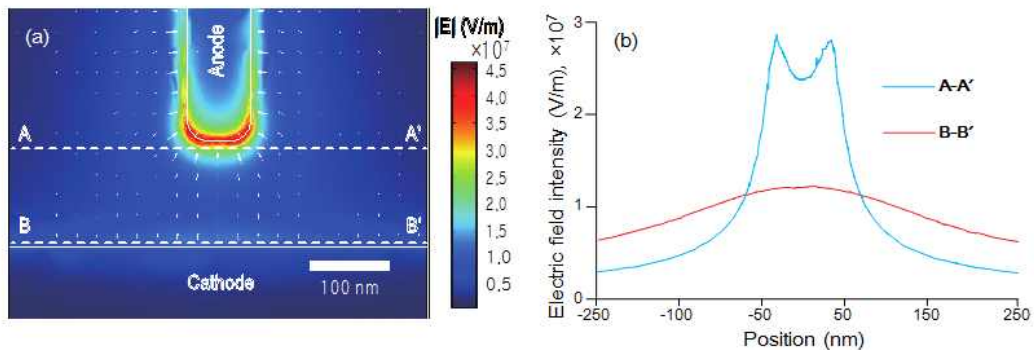
첫째로, 반도체와 나노전극 사이에 유한한 크기의 Schottky barrier가 존재한다. 이는 I-V 곡선상에서 알 수 있다. 그림에서는 잘 나타나지 않으나, 비선형적인 구간이 0V 근처에 존재하며, 이는 Schottky barrier에 의한 것이다. 이는 전자의 이동을 어렵게 하여 포집효율을 떨어뜨리게 되는데, 이를 개선할 필요가 있다. 두 번째로, 정공의 이동도 문제가 있다. 일반적으로 정공의 유효질량은 전자에 비해 수 배 이상으로, 결국은 이로 인해 전하의 이동도에 제한을 받는다. 동작 원리상 정공의 영향을 받을 수 밖에 없으므로, 이를 추가적으로 개선할 필요가 있다. 셋째로, 현재 안테나는 반도체 기판상에 제작되어 있는데, 이 기판 물질을 제거하거나 BCB 등을 삽입하여 안테나의 capacitance를 낮추게 되면, 전체적으로 3배 이상의 감도 향상을 기대할 수 있게 된다. 이러한 개선이 성공적으로 이루어진다면, 소자의 성능이 추가적으로 더욱 개선될 수 있을 것이다.

다음으로, 비대칭 나노전극의 정류 효과를 이용한 테라헤르츠 나노 렉테나 (rectenna) 소자에 관해 설명한다. 지난 연구 과정에서, 나노 전극이 비대칭적으로 형성된 경우, 이에 따라 소자의 I-V 특성이 비대칭적으로 나타나는 현상을 발견하였다. 이를 활용하면 정류 특성을 이용하여 광 없이도 테라헤르츠파를 직접 검출할 수 있는 소자를 제작할 수 있을 것이라고 생각되어, 아래 그림에 보인 바와 같은 구조의 소자를 제작하였다.



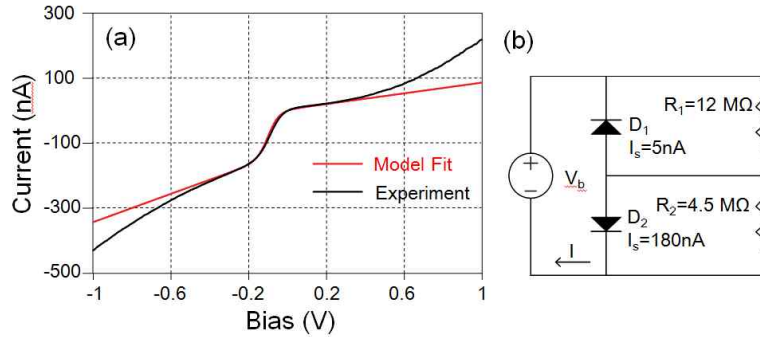
<그림 3-1-50> (a) 나노리본 소자의 개념도 (b) 소자의 SEM 사진. Scale bar는 500 nm

위 그림에 보인 바와 같이, 소자는 삼각형의 50nm 두께 InGaAs 메사 위에 비대칭적으로 형성된 전극으로 구성되어 있으며, 포토믹서의 경우와 마찬가지로 log-spiral 안테나에 집적되었다. 그림 3-1-50 (b)의 inset에 InGaAs 영역과 금속 전극의 contact 영역을 보였다.



<그림 3-1-51> 나노전극 첨점 부근에서의 전기장 분포 계산

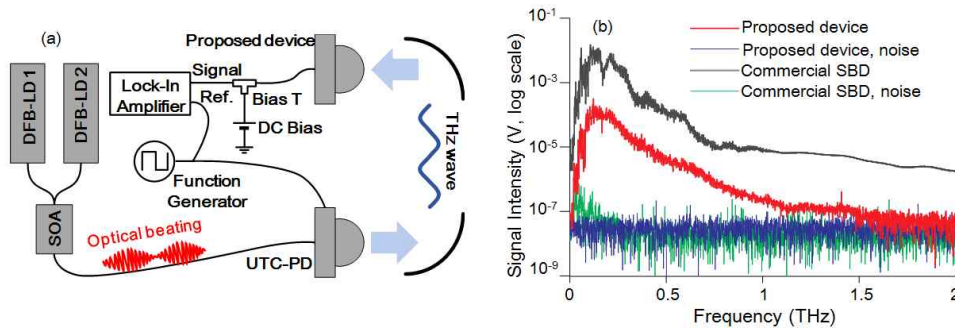
이러한 비대칭적인 전극 형상의 영향으로 인해, anode에 해당되는 나노전극 끝 부분에서는 강하게 전계 향상 효과가 나타난다. 반면, 평평한 모양의 cathode에서는 이와 같은 강한 전계향상 효과가 나타나지 않았다. 그 차이는 대략 3배 전도로 나타나며, 국소화된 정도는 나노전극 끝부분에서 매우 강하다. 따라서 비록 InGaAs층과의 접촉 면적 자체는 anode와 cathode의 경우 비교적 비슷하지만, 전류는 나노전극의 경우 그 끝부분에 집중되는 반면, cathode에 흐르는 전류는 분산될 것이 예측된다. 비대칭 효과는 이로 인해 나타날 것으로 추정할 수 있다.



<그림 3-1-52> (a) 소자의 I-V 특성 및 등가모델 계산 결과 (b) 등가모델 및 파라미터

제작된 소자의 I-V 특성을 측정해 보았다. 그림에 보인 바와 같이, 비대칭적 특성이 나타났으며, 이를 적절한 등가회로 모델로 fitting 하였다. 그 결과 실제 중요한 영역인 0 바이어스 근방에서의 I-V 특성이 정확하게 설명될 수 있었다. 금속-반도체-금속 접합 구조를 서로 역방향으로 직렬 연결된 다이오드 2개로 모델링 하였고, 다이오드의 포화전류 값은 36배 차이가 나는 것으로 나타났다. 일반적으로 다이오드의 포화 전류는 다이오드의 단면적에 비례하는데, 이와 같은 금속-반도체 접합의 경우, 접합 면적에 해당된다. 위 그림에 보였드시피, 이 접합 면적상의 차이는 거의 없으며, 따라서 이와 같은 비대칭성은 금속 전극의 비대칭성에 의한 전류 국소화 현상에 의한 것으로 이해되어야 한다.

실제로 이러한 비대칭성이 정류 작용을 통해 테라헤르츠파를 검출할 수 있게끔 하는지를 확인하기 위해 앞서 포토믹서 측정 시스템과 유사한 연속파 시스템을 구성하여 테라헤르츠 측정을 수행하였다.

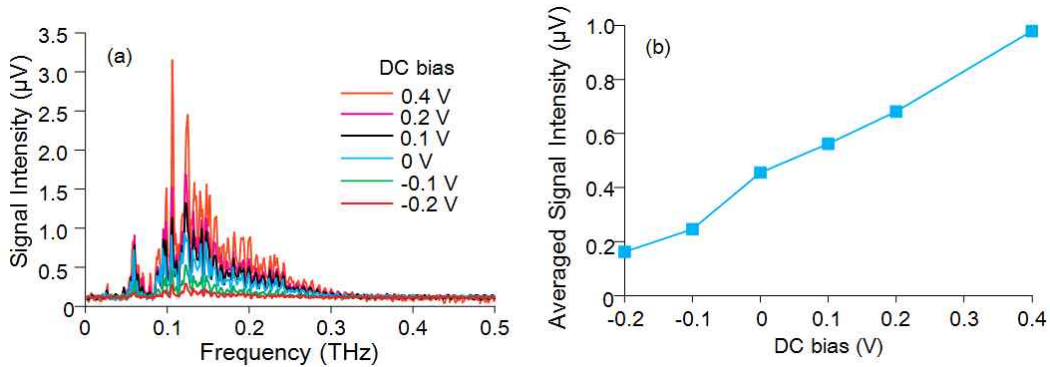


<그림 3-1-53> 측정 setup 및 측정 결과

특성 비교를 위해 미국 버지니아 다이오드 사의 상용 SBD 소자와 비교하여 보았다. 위 그림에 보인 바와 같이, 소자의 성능은 상용 소자에 비해 1/100 수준으로 나타났다. 상용 소자와 비교했을 때, 본 나노소자의 responsivity는 10 이상으로, 이번 연도 과제 목표를 초과달성 하였으나, 여전히 많은 개선이 필요한 상황이다. 측정 밴드 폭은 대략 1.5 THz에 이르는 것으로 판단된다. 노이즈 수준의 앞의 실험에서와 같이, 테라헤르츠 빔 경로를 금속 판으로 차단한 후 동일 측정을 반복하여 측정하였다. 결과, 300 GHz에서 SNR은 20dB 이상으로 나타났다.

등가 회로 모델의 결과와 실제 측정 결과를 통해 판단했을 때, 정류 작용은 나노전극과 반도체 사이에 존재하는 Schottky barrier에서 발생하는 것으로 판단된다. 다이오드의 포화전류간의 불균형으로 인해, 작은 전극에서 다이오드에 의한 정류작용이 발생하는 한편, 넓은 전극은 소전류에서 마치 Ohmic

contact으로 작용하는 것으로 판단된다. 바이어스에 따른 측정 감도의 변화를 확인하기 위해, bias-T를 이용하여 측정해 보았다. 그 결과를 아래 그림에 보였다.



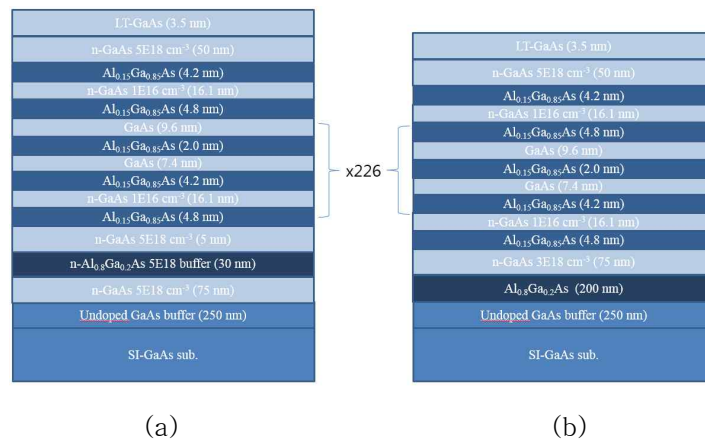
<그림 3-1-54> 바이어스 크기에 따른 측정 신호 변화 (100 GHz~200 GHz 평균)

결과, DC 바이어스가 증가함에 따라 신호 강도가 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 나노전극에 형성된 barrier가 낮아질수록 그 감도가 향상됨을 나타내는 것이다. 따라서, 현재 수준에서 상용 SBD 대비 낮은 sensitivity를 높일 수 있는 방안으로써, 현재 도핑하지 않는 InGaAs layer에 n-type doping을 적용하고, 넓은 전극과 InGaAs간 contact 특성을 높은 도핑 농도를 갖는 InGaAs막을 선택적으로 성장함으로써 소자 특성을 개선할 수 있을 것으로 보인다. 부가적으로 etching process등을 통해 안테나 capacitance를 낮춤으로써, 예상컨대 대략 20배 이상의 향상된 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

본 소자는 기존 SBD 소자와 달리 그 전극 크기를 매우 작게 형성할 수 있고, planar 공정으로 공정 수율을 대폭 향상시키는 것이 가능할 것으로 기대된다. 본 결과는 현재 논문 투고되어 심사 과정에 있다.

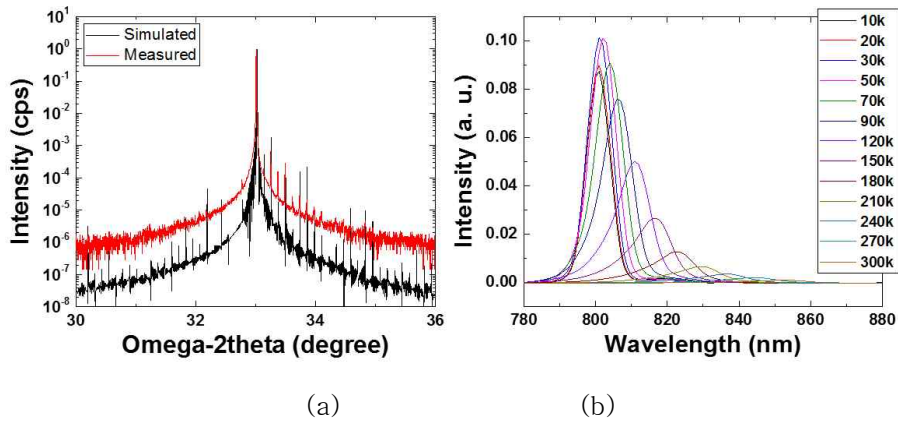
바) 테라헤르츠 양자폭포 레이저 기초 연구

지난 연차의 조각 웨이퍼를 이용한 QCL 에피 특성 평가 및 공정 연구에 이어, 당해 연도에는 레이저 공정을 위한 3인치 웨이퍼 2매를 추가로 입수하여, THz QCL 기초 연구를 수행하였다. THz QCL은 그 목적에 따라 크게 두 종류의 도파로를 이용한다. Semi-insulating surface plasmon waveguide(SISP)의 경우 mode confinement가 0.2 정도로 낮기 때문에 threshold current가 크고 고온동작이 제한적이며 최대 동작온도가 ~100 K 정도로 낮지만, 낮은 optical confinement로 인해 coupling이 용이하여 250 mW이상의 높은 출력과워를 가지고 있다. 반면 metal-metal waveguide (MM)의 경우 mode confinement가 1에 매우 가까우므로 낮은 threshold current와 ~200 K 정도의 높은 동작온도가 가능하지만 최대 출력과워는 25 mW 정도로 SISP 도파로에 비하여 1/10 수준이다. 초기 연구임을 감안, 과거 THz QCL을 시연한 그룹에서 사용한 활성층 구조를 이용하여, 다음 그림에 보인 두 가지 구조의 에피를 성장하였다 [17].



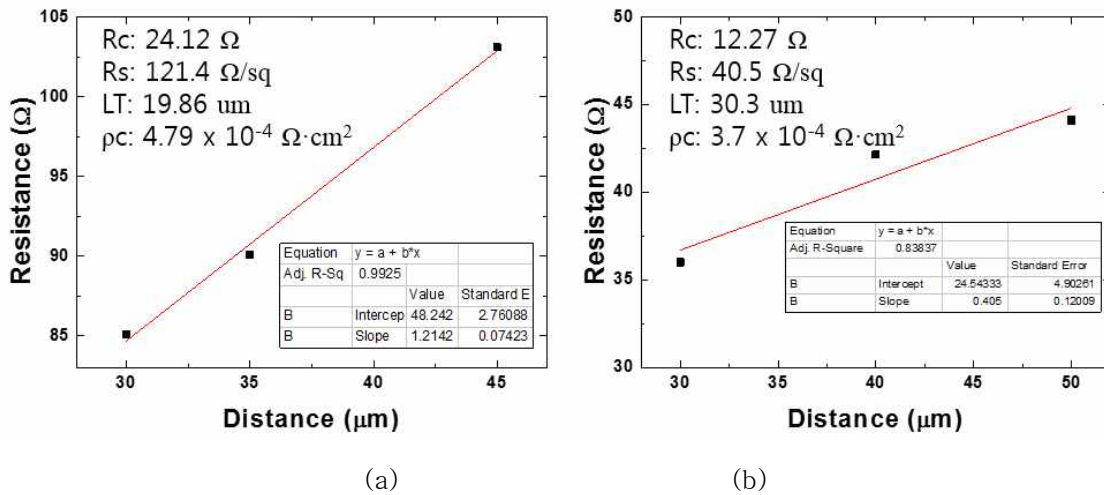
<그림 3-1-55> MBE로 성장된 (a)SISP와 (b)MM 도파로 THz QCL 구조.

그림 3-1-55는 서로 다른 도파로 구조를 위한 THz QCL 에피 구조이다. Active layer구조는 4.8/9.6/2.0/7.4/4.2/16.1 nm(bold: barrier)로 3 THz 발진으로 전산모사된 구조이다. SISP의 경우 10μm의 식각을 정교하게 제어하는 것이 매우 어렵기 때문에 etch-stop layer를 이용하였다. Selective etchant인 citric acid를 이용하여 하부전극이 증착될 박막 상단에 위치한 etch-stop layer까지 식각을 하고, HF solution을 이용하여 etch-stop layer를 제거한 후 전극을 올리는 구조이다. MM의 경우 QCL박막과 n-GaAs substrate를 wafer-bonding 기법으로 붙인 후 공정을 하게 된다. 이때 bonding 방법은 thermocompression wafer bonding으로 Au를 10 μm이상 증착을 하여 400 °C에서 5 MPa 로 1시간동안 힘을 가해주는 조건을 이용하였다. Wafer bonding이후 lapping과 etching을 통하여 SI-GaAs substrate를 제거를 하고 후속 공정을 진행하였다.



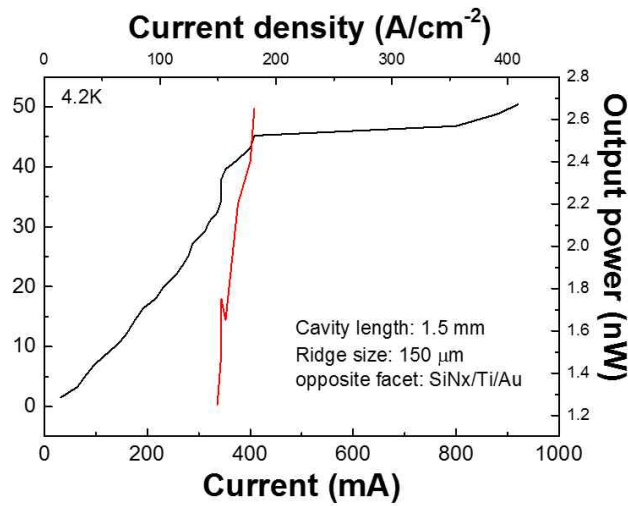
<그림 3-1-56> QCL의 (a)HR-XRD 와 (b)온도의존성 PL

공정 수행 전, 웨이퍼의 기본 특성을 평가하기 위해 측정을 수행하였다. 그림 3-1-56(a)는 THz QCL의 HR-XRD 기법으로 측정된 결과이다. XRD 측정 결과를 전산모사 결과와 비교함으로써, 성장 두께의 정확성을 확인할 수 있는데, 결과 설계한 두께와 실제 웨이퍼의 두께가 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Etching 후 실측한 두께와 비교하였을 때, 오차는 1% 미만으로 나타나, XRD 측정 및 전산모사의 정확성을 확인할 수 있었다. 그림 3-1-56(b)는 10 K부터 300 K까지 온도변화에 따른 photoluminescence (PL) 측정값이다. 여기광은 532 nm 반도체 레이저를 2 watt 파워로 사용하였고 검출은 InGaAs photodetector를 이용하였다. 측정 온도 증가에 따라 800 nm 부터 852 nm 까지 PL peak이 red shift하고 intensity 가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 3barrier/3well 구조이지만 PL peak이 3 개가 나오지 않고 한 종류의 peak만 확인 할 수 있었는데, 그 이유는 barrier의 두께가 너무 얇음으로 인해 각 well의 전자 에너지 레벨들이 서로 간섭하여 나타난 현상이다.



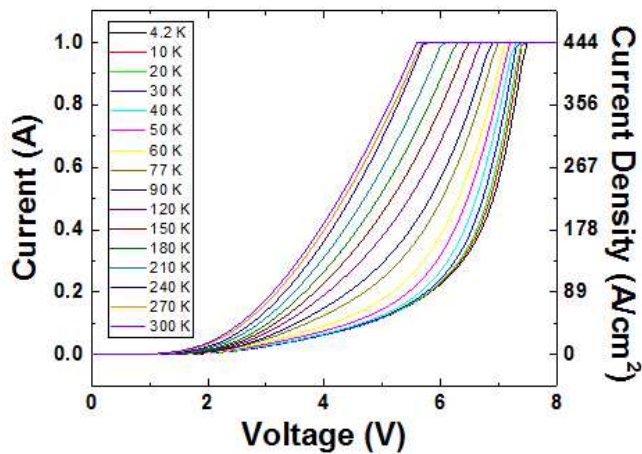
<그림 3-1-57> SISP THz QCL 의 (a)하부전극, (b)상부전극 비저항

전류 주입을 위해 반도체와 금속 전극간의 컨택 저항이 매우 중요하다. 그림 3-1-57은 별도로 형성된 TML pattern을 통해 추출한 컨택 저항을 보여준다. Series 저항은 contact layer의 얇은 두께 때문에 높은 값을 보였지만, 하부전극과 상부전극의 컨택저항은 각각  $4.79 \times 10^{-4}$ 와  $3.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 일반적인 n-GaAs 반도체의 컨택저항과 비슷한 값을 보였으므로, 컨택 저항 문제는 없는 것으로 판단된다.



<그림 3-1-58> SISP THz QCL의 IV특성과 LI특성

그림 3-1-58은 공정 완료 후 SISP 도파로 구조를 가지는 THz QCL의 4.2K에서 I-V 및 L-I 특성을 나타낸다. THz 측정을 위해 function generator를 사용하여 5Hz의 반복률을 갖는 바이어스를 인가하여 pulse 모드로 동작하게끔 하였다. 테라헤르츠파의 측정에는 pyroelectric detector를 이용하였다. 측정 결과 높은 저항으로 인해 소자의 동작이 저해되는 것을 확인하였으며, 높은 저항의 원인은 하부전극과 콘택을 형성하는 n+ GaAs layer의 두께가 75 nm 에 불과하기 때문에 발생하는 병목 현상인 것으로 판단되었다.



<그림 3-1-59> MM THz QCL의 IV특성

그림 3-1-59는 MM 도파로 구조를 가지는 THz QCL의 4.2K I-V 특성이다. 그림에서 볼 수 있듯이, SISP 소자에 비해 저항이 낮아진 것을 확인 할 수 있었다. 이는 MM 소자의 경우 콘택 구조상 병목 현상이 일어나지 않기 때문이다. THz파 측정 셋업은 SISP와 동일하게 4.2K에서 진행을 하였는데, I-V 특성에 문제가 없음에도 불구하고 THz 발생을 확인할 수 없었다. 소자의 구조상 에피 성장에 관련된 문제가 가장 주된 원인일 것으로 생각되나, 현재 공정, 측정 셋업 등을 포함한 모든 과정의 문제점들을 확인하기 위한 작업들이 진행 중이다.

## 2. 테라헤르츠 파면제어 기초 기술 개발

### 가)테라헤르츠 영상 기반 QR 코드 재생 기술 연구

테라헤르츠 파는 페인트를 잘 투과하는 반면, 금속에서는 거의 100% 반사된다. 이러한 특성을 이용하면, 자동차 제조 공정에서 각 차량의 이력 관리를 위한 QR 코드 재생에 테라헤르츠 기술을 적용할 수 있다.

일반적인 자동차의 제조 공정 과정은 금속을 가열하여 제작하는 부품 생산을 시작으로 프레스, 차체 조립, 도장, 의장 공정 및 완성차량의 검수까지 5단계의 과정으로 구성된다. 각 공정을 자세히 설명하면 아래와 같다.

(1) 프레스 공정 : 자동차를 만드는 첫 과정으로 고압 프레스 기계에 금형을 장착 후 강한 압력으로 철판을 변형시켜 패널을 제작하는 공정

(2) 차체조립 공정 : 프레스 가공으로 만든 패널들을 조립, 용접하여 차의 모양을 만들며, 높은 정밀도와 안전성을 확보하는 중요한 공정

(3) 도장 공정 : 부식으로부터 소재 보호, 아름다운 색채로 외관 향상, 그리고 다른 차량과 구별하는 기능을 위한 페인팅 공정

(4) 의장 공정 : 차체에 실내외 부품을 장착하고 기계 부품을 조립하며 전장부품과 배선, 배관 작업을 함으로써 차량을 완성하는 공정

(5) 검수 : 의장 공정을 통해 완성된 차량을 수밀 검사 및 기능 검사를 수행하여 각종 성능과 안전을 최종 검수 공정

프레스 공정을 통해 제작된 차량의 금속 패널 표면에 차량 이력 관리를 위한 정보를 포함하는 코드를 레이저를 이용하여 마킹하며, 정보를 포함한 코드로 기존에 바코드와 함께 많이 사용되는 QR 코드를 이용할 수 있다.

### 기존의 바코드

### QR 코드

정보없음

가로배열 역시  
정보를 가지고 있음

세로배열에 정보를 가지고 있음

세로배열에 정보를 가지고 있음

<그림 3-2-1> 기존의 바코드 및 QR 코드

QR 코드란, 작은 정사각형의 점을 가로 세로 같은 수 만큼 병렬시킨 매트릭스형 2차원 코드로, 한 번에 21개가 나열 된 [버전1]에서, 177개가 나열 된 [버전40]까지, 40가지의 사양이 있다. 버전이 한 단계 높아질수록 한 번의 Cell의 수는 4개씩 늘어나며 점의 숫자가 많을수록 많은 정보를 기록 할 수 있으나, 필요한 면적이 넓어지게 된다. 코드의 3개의 모서리에는 [回]자 형의 심볼(파인더 패턴, finder pattern)이 배치되어 있어서, 360도 어느 방향에서도 인식하여 정확한 정보를 얻을 수 있다.



<그림 3-2-2> QR 코드 버전

기록 가능한 정보량은, 버전40의 경우 최대 23,648비트이다. 독자적인 문자 코드를 사용하므로, 일반 가나(일본 문자)나 한자의 경우 1,817문자, 알파벳과 숫자의 경우 4,296문자, 숫자만 사용할 경우 7,089문자까지 기록 할 수 있다. 데이터에는 보완성을 갖도록 하여, 손실로 인해 일부 영역을 인식할 수 없게 되더라도 데이터를 복원할 수 있다. 오차 정정률은 4단계로 설정 할 수 있으며, 가장 낮은 것이 약 7%, 가장 높은 것이 약 30%까지 손실 되었을 경우 대응 가능하며 오차 정정률은 높을수록 보다 많은 보완 데이터가 필요하므로, 기록 할 수 있는 데이터량은 그만큼 줄어든다. QR코드는 일본에서 가장 많이 보급된 2차원 코드로 간판, 광고, 제고 관리, 정보저장 등에 쓰여진다. 최근에는 휴대전화에 QR코드 인식 기능이 탑재되어, 인터넷 URL등 버튼을 여러 번 눌러야만 입력할 수 있는 데이터를 간단히 입력하는 수단으로 보급되고 있다.

25mm

25mm

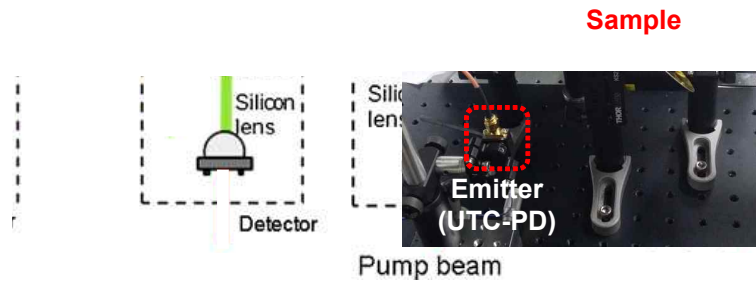
<그림 3-2-3> (a) 페인트 도색 전 시료      (b) 페인트 도색 후 시료

그림 3-2-3은 실제 차량에 사용되는 금속 패널 표면에 레이저를 이용하여 마킹한 QR 코드로 (a) 차체 조립 공정 및 (b) 도장 공정 후, 두꺼운 페인트가 도포된 상태의 QR 코드 샘플이다. 본 실험에서는 QR 코드 버전1(21×21cell)을 테스트 정보로 사용하였다. 페인트 도색 전의 마킹 된, QR 코드는 시각적으로도 명확하게 식별이 가능하지만, 두꺼운 페인트 도포 후의 시료는 기존의 카메라를 이용한 코드 식별이 어려워 차체에 정보코드로 사용하기 어렵다.

반면, 앞서 언급하였듯이 시각적으로는 두꺼운 페인트 아래의 QR 코드가 잘 보이지 않지만, 테라헤르츠파는 페인트에 높은 투과율을 보이기 때문에 페인트의 유무에 관계없이 페인트 도색 후의 시료로부터 QR 코드 정보를 추출할 수 있다. 이를 확인하기 위해, 그림 3-2-4와 같이 2차원 라스터 스캔(Raster Scan)이 가능한 시스템을 구성하였다. 발생 소자(UTC-PD)로부터 800 GHz의 테라헤르츠 파가 실리콘 렌즈로부터 방사되며, 이미지 해상도를 높이기 위하여 4개의 parabolic mirror를 사용하여 측정 대상 샘플에 포커싱되도록 하였다. 그리고 샘플 QR 코드는 linear stage를 이용하여 400µm 간격으로 x-y 2차 평면으로 이동되도록 하였고, 이 때 레이저 마킹으로 인해 표면이 거칠어진 QR 코드 패턴과 평평한 표면에 의해 서로 다른 크기의 반사된 테라헤르츠 파가 검출 소자(SBD)를 이용하여 검출된다.

(a)

(b)

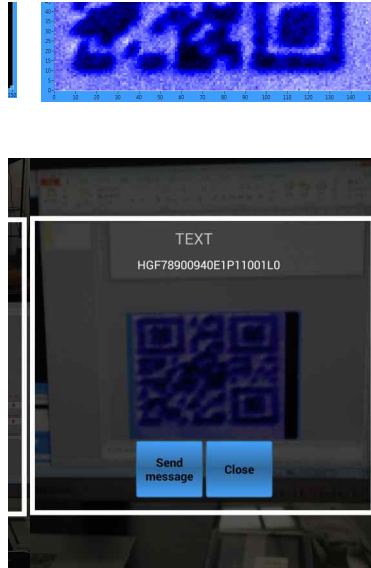


<그림 3-2-4> 반사형 테라헤르츠 2차원 레이저 스캔 시스템

그림 3-2-5는 페인트가 도포된 QR 코드 샘플을 레이저 스캔으로 측정된 데이터이다. 도포된 페인트로 인해 시각적으로는 패턴이 일부만 보이거나 끊어져 있어 명확하지 않은 QR 코드의 패턴이 테라헤르츠 파를 이용하여 측정된 데이터에서는 명확하게 인식이 되었다. 테라헤르츠 파의 경우, 페인트는 잘 투과하여 투명하게 보이며, 레이저로 마킹된 패턴은 금속 요철로 느껴져 난반사되어 검출소자까지 도달하지 못하게 되기 때문이다. 이는 패턴 하나하나가 중요한 정보로 사용되는 QR 코드이기 때문에 일부 패턴의 정보를 인식하지 못하거나 잘못 인식될 경우, 전혀 다른 정보로 판단 될 수 있어 자동차 양산 과정에서 자동차 생산 이력 관리 시스템으로 사용하기 위해서는 도포된 페인트 두께에 관계없이 QR 코드가 인식이 되어야 한다.

<그림 3-2-5> 페인트가 도포된 QR 코드 샘플과 측정된 데이터

그림 3-2-6은 앞서 반사형 테라헤르츠 2차원 레이저 스캔 시스템을 이용하여 페인트가 도포되지 않은 QR 코드와 도포된 QR 코드 샘플을 레이저 스캐닝 한 후, 휴대폰에서 다운 받을 수 있는 QR 코드 스캐너 어플을 사용하여 테스트한 그림이다. 각각의 샘플에서 문자와 숫자가 결합된 21자리의 정보(페인트가 도포 되지 않은 샘플 : GFF123456941D010T10R1, 페인트가 도포된 샘플 : GF78900940E1P11001LO)가 인식되었으며, 이는 실제 공정 라인에서 하루에 생산 가능한 자동차의 수를 고려하였을 때 충분한 정보량으로 앞으로 저속의 레이저 스캔이 아닌, 고속의 갈바노미터 및 어레이 에미터/디텍터를 이용한 2차원 이미징 스캔을 적용할 경우에 실제 산업 현장에서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.



<그림 3-2-6> 실제 측정된 QR 코드 샘플 데이터와 휴대폰 어플을 이용하여 스캔된 사진

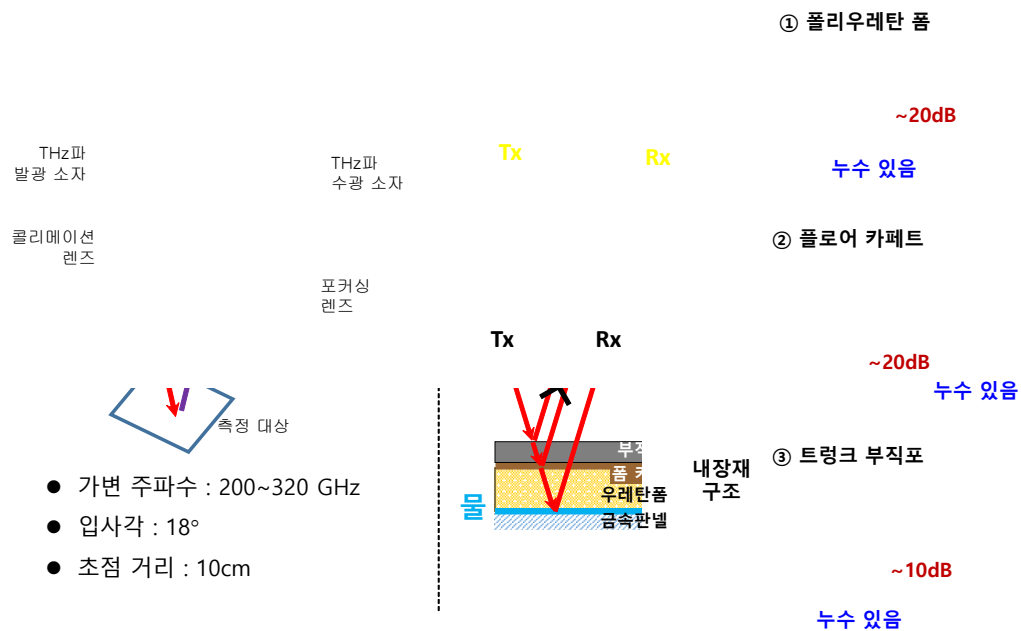
### 나) 누수 검출이 가능한 휴대용 테라헤르츠 연속파 시스템 개발

자동차 생산완료 후 실시하는 주요 검사 중 하나로 수밀 검사가 있다. 수밀 검사는 완성차에 물을 고압 분사한 후 검사원이 차량 내부에 물 유입여부를 육안 검사하는 방식으로 진행된다. 대부분의 완성차 검사 기술이 차량 품질향상을 위하여 점차 개선되고 있는 반면에, 수밀 검사는 완성차의 손상 없이 누수 검출 가능한 신뢰성 있는 검사 기술이 존재하지 않아 수십 년 전과 동일하게 육안검사로 진행하고 있다. 차량은 각종 재질의 내장재로 덮혀 있어 누수 불량을 검출하기 어려운 검사 조건을 갖고 있다. 그런데 검사원의 오감에 단순 의지하는 수밀 검사는 작업자 모랄과 컨디션에 따라 검사 신뢰성이 더욱 떨어질 수 있다. 그러므로 차량 내장재로 가려진 부위에 숨어있는 물을 검출하여 육안검사를 보완, 대체할 만한 신뢰성 있는 검사기술 개발이 필요하다.



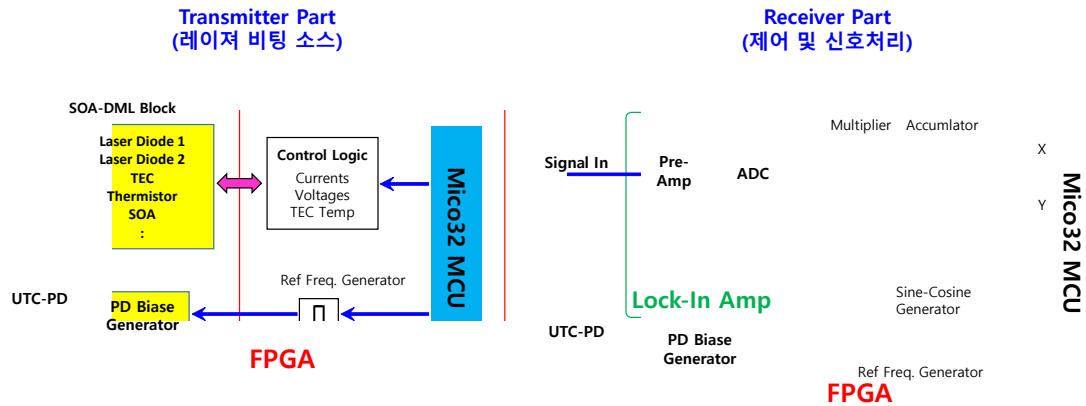
<그림 3-2-7> 대표적인 차량 내장재 3종류 및 테라헤르츠파 투과도 그래프

완성차 누수 발생시 물은 바닥으로 이동하므로 수밀 검사 공정에서는 차량 실내 바닥과 트렁크 바닥을 주로 검사한다. 그리고 차량 내 바닥 부위는 재질 및 구조에 따라 크게 3종류로 구분 가능하다. 우선 앞좌석(그림 3-2-7 ①)에서 대쉬 판넬과 접하는 부위는 엔진룸에서 넘어오는 소음을 줄이기 위하여 대쉬 판넬과 센터 플로어 판넬 위를 우레탄폼으로 덮고, 그 위를 다시 부직포로 덮고 있다. 다음으로 앞/뒷자석(그림 3-2-7 ②) 에 플로어 카페트로 덮힌 부위가 있으며, 우레탄폼으로 덮힌 부위를 제외하면 차량 실내 모든 부위에 해당한다. 마지막으로 트렁크 내부(그림 3-2-7 ③)는 판넬 형상에 맞춰 얇은 부직포로 덮혀 있다. 각 내장재에 대한 테라헤르츠파의 투과율을 측정된 결과, 가장 투과율이 낮은 플로어 카페트의 경우, 200 GHz 대역에서 약 20%의 투과율을 보이며 만약, 반사형태의 측정 시스템에서 왕복하여 이동 경로가 두 배가 되더라도 20dB 이하의 신호 감쇠가 일어나기 때문에 측정 시스템의 신호 대 잡음비가 35dB 이상임을 가정하면 누수 검출 측정이 가능할 것으로 판단된다.



<그림 3-2-8> 누수 검출 시스템 구성도 및 실제 측정된 데이터 그래프

그림 3-2-8은 내장재 아래의 누수 여부를 검출하기 위한 시스템 구성도와 실제 내장재와 차량 금속 판넬 사이의 물의 유무에 따른 측정 데이터이다. 일반적으로, 플라스틱, 종이, 세라믹, ③ 부직포 등과 같은 물질들은 굴절률이 낮고 흡수가 작기 때문에 이러한 물질의 경계면에서 반사된 신호는 금속으로부터 반사된 신호에 비해 상대적으로 작다. 따라서 물질의 경계면과 금속판넬에서 반사된 신호들 간의 간섭이 작아서 누수에 따른 신호 변화의 확인이 가능하다. 하지만, 흡수가 상대적으로 높은 ① 우레탄폼, ② 플로어 카페트 등의 경우에는 테라헤르츠파가 금속판넬에 도달하기 전에 흡수되어 금속으로부터 반사 후, 다시 검출소자에 도달되는 신호가 20~30 dB 이하의 아주 미약한 신호가 된다. 이런 경우 첫번째 경계면에서 반사된 신호가 금속에 반사되어 측정되는 신호보다 더 크기 때문에, 이 두 신호간의 간섭이 발생할 경우, 측정된 신호가 누수에 의한 것인지 표면에서 반사된 신호 때문인지 구분하기 힘든 경우가 발생한다. 따라서, 누수 조사 시 표면에서 반사되는 테라헤르츠 신호 보다 최종 모든 매질을 투과 후, 반사되어 검출기에 측정되는 값이 현저히 적을 경우에는 그림 3-2-8과 같이 입사각을 가지고 테라헤르츠파를 입사시켜 각 경계면에서 반사된 신호들은 측정이 되지 않고 금속판넬로부터 반사된 신호만이 측정 가능하도록 시스템을 구성하였다. 그 결과, 모든 내장재에서 누수 여부에 따라 약 10 dB 이상의 신호 감소로 검출이 가능하였다.



<그림 3-2-9> 레이저 비팅 소스 제어와 신호처리를 위한 PCB 보드의 설계 및 실제 제작된 보드

그림 3-2-9는 테라헤르츠파를 발생하기 위한 레이저 비팅 소스의 제어 및 수신된 작은 신호의 검출을 위해 설계된 PCB 보드의 설계 및 실제 제작된 모습이다. 비팅 소스 및 발생소자의 전류, 전압, 온도 등의 고속의 병렬 제어와 1nV 이하의 작은 신호의 검출을 위한 저 잡음 증폭기를 FPGA(Field Programmable Gate Array, 설계 가능 논리 소자와 프로그래밍가능 내부선이 포함된 반도체 소자)를 사용하여 구현하였다.

제어기

레이저  $f_1, f_2$  신호처리기

파장 가변

발생소자 검출소자

테라헤르츠파

Tx Rx

예) 물이 없을 때

예) 물이 있을 때

물 샘플 구조  
매질3 금속

<그림 3-2-10> 휴대용 테라헤르츠 누수 검출 시스템 및 이를 실제 차량에 적용하는 모습

그림 3-2-10은 휴대가 가능한 경사 입사형의 테라헤르츠 검출기를 제작한 것으로 일반 성인이 한 손으로 들 수 있는 사이즈와 무게로 prototype이 제작되었다. 먼저, 입사각 18°, 초점거리 10cm의 반사 측정용 테라헤르츠 광학계를 구성하였다. 그리고 휴대가 가능하도록 명령 및 측정 데이터 분석을 위한 LCD 모듈과 독립 전원(бат테리)을 장착하였다. 따라서, LCD 화면을 통해 테라헤르츠 발생 및 검출 명령을 보내면, 제어 및 신호처리 PCB 보드에서 신호 발생 및 검출을 통하여 그 결과를 분석 후, 화면에 그래프로 나타나도록 하였다. 실제 구동시, 전력 소모량은 400~500mAh로 최소 6시간 이상 연속 동작이 가능하였다. 개발된 초소형 테라헤르츠 검출 시스템을 실제 차량에 적용하고 있는 모습으로, 완성된 차량의 앞좌석 바닥에는 엔진룸에서 넘어오는 소음을 막기 위한 소음 진동 흡수재가 존재하는데 눈으로는 이 내장재 아래에 물이 있는지의 여부를 확인하기 어렵다. 이를 개발된 시스템을 이용하여 측정한 결과, 물이 있을 때에 물에 의한 높은 흡수율로 인하여 10 dB 이상 작은 신호가 검출 되어 내장재 아래에 물의 유무의 확인이 가능하였다. 추가로, 현장의 다양한 환경에서의 측정 결과를 바탕으로 신호처리 및 광학계 구성 등의 추가 개선 중에 있다.

## 다)테라헤르츠 영상용 투과형 렌즈 설계 및 개발

테라헤르츠파를 이용한 영상 시스템을 위해서는 테라헤르츠 대역에 적합하게 설계된 광학 시스템을 구성하여야 한다. 이를 위하여 이미 전년도에 테라헤르츠 대역에서 범용으로 활용 할 수 있는 테라헤르츠 광학계를 위한 렌즈의 물성에 대한 분석을 통하여 HDPE (high-density polyethylene) 물질을 테라헤르츠 렌즈용 물질로 선정, 이를 활용하여 테라헤르츠 대역의 f-theta telecentric 렌즈와 이를 활용한 기초적인 광학 시스템을 구성 한 바 있으며, 이를 통하여 테라헤르츠 이미징이 가능함을 확인하였다. 이번 년도에는 이러한 결과를 발전시켜, 보다 향상된 테라헤르츠 영상용 광학계를 구성하고자, 다양한 시도가 이루어졌다.

우선 기존에 설계 및 제작을 하였던 telecentric f-theta 렌즈의 종류를 다양화하여, 테라헤르츠 빔의 직경과 시스템 사양 상 요구되는 초점거리 등에 따라 다양한 telecentric f-theta lens를 설계, 제작하였다. 테라헤르츠 평행빔을 만들기 위한 THz 대역의 collimation 렌즈를 평행빔의 직경에 따라 여러 가지 형태로 설계, 다양한 응용 환경에 대응 할 수 있도록 구성 하였다. 특히, 지난해에 개발한 테라헤르츠 광학계의 문제점으로 도출된 스캔 속도의 문제를 해결하기 위하여, 1차원 고속 회전 스캐너 형태를 포함한 다양한 스캐너의 구조가 시도되었으며, 이를 위한 렌즈계와 광학계가 새로이 설계되었다.

본 절에서는 이번 연구년도에 설계되거나 제작된 다양한 테라헤르츠 대역의 렌즈계 및 영상 시스템에 대하여 살펴보고자한다.

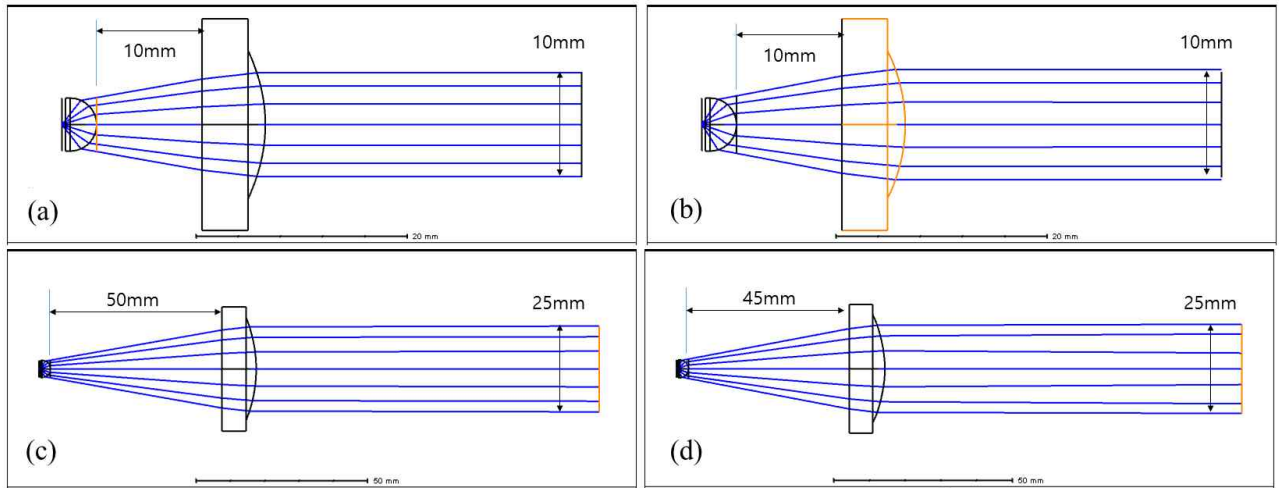
### 다-1) 테라헤르츠 평행빔 성형 렌즈 및 평행빔 기준 포커싱 렌즈의 설계

우선적으로, 테라헤르츠 영상계를 위하여 테라헤르츠 발생 모듈인 UTC-PD에서부터 렌즈를 거쳐 나오는 빛을 여러 직경을 갖는 평행빔으로 성형하기 위한 렌즈를 제작하였다. 지난해의 경우에는 모듈 자체에 부착된 실리콘 렌즈로부터 방사되는 테라헤르츠파가 평행빔을 이루고 있을 것으로 가정하고 이후의 테라헤르츠 렌즈 및 광학계를 구성하였으나, 이번 년도에는 보다 정확하게 평행빔을 구현하기 위하여 평행빔 성형 렌즈 (collimating lens)를 포함하여 보다 체계적인 테라헤르츠 광학계의 구성이 될 수 있도록 하였다.

이번 년도에는 테라헤르츠 빔이 직경이 10mm인 경우와 25mm인 경우의 두 가지 경우에 대하여 평행빔을 만들어주는 렌즈를 설계하였다. 이를 위하여 테라헤르츠 발생 모듈의 실리콘 렌즈를 통한 발산각을 50도인 경우와 55도인 경우의 두 가지로 상정하고, 각각의 경우에 대하여 collimation 렌즈를 설계한 결과가 3-2-11에 나타나 있다.

그림에서 볼 수 있듯, 10mm 직경의 평행빔을 만들기 위한 렌즈는 중심각이 50도인 경우와 55도인 경우 모두 모듈의 실리콘 렌즈로부터의 거리를 10mm 로 하여 렌즈의 곡면 프로파일에 약간의 변형을 주는 것 만으로 설계가 가능하였다. 이는 10mm 직경의 평행빔을 만드는데 있어, 실리콘 렌즈로부터의 방사각이 전체 시스템의 성능에 주는 영향이 그만큼 미미하다는 의미로 해석 할 수 있으며, 따라서 광학계의 구성에 있어서도 10mm직경의 테라헤르츠 평행빔의 성형은 시스템 tolerance가 비교적 크다고 볼 수 있다.

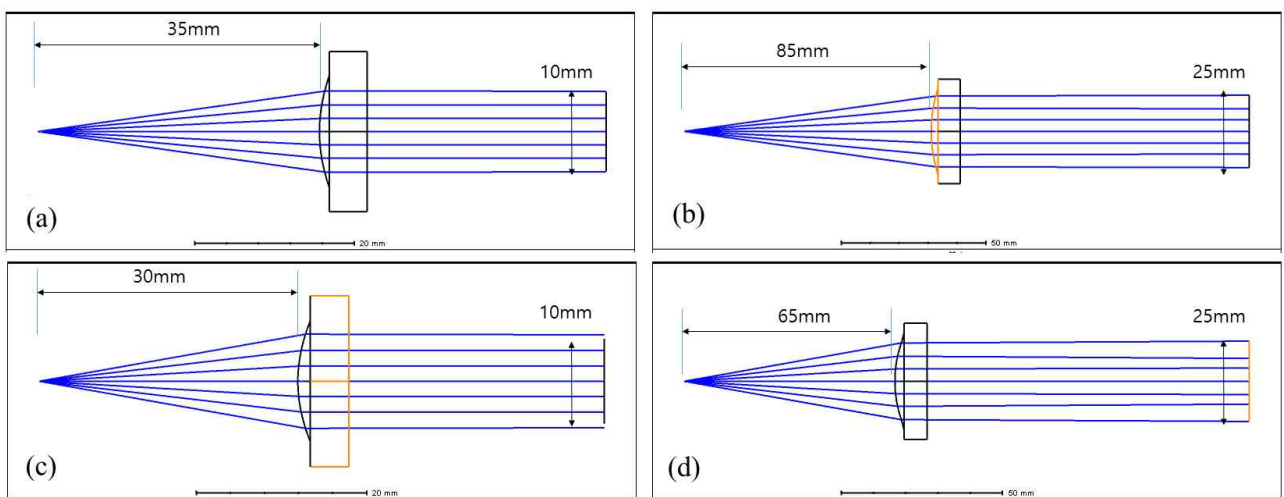
그러나, 테라헤르츠 영상 시스템에 있어 보다 높은 해상도를 얻기 위해서는 직경이 큰 빔을 이용하는 것이 유리하기 때문에, 25mm 직경의 빔을 성형 할 필요성이 존재하였다. 이를 위하여 렌즈를 설계 할 경우, 25mm의 빔을 만들기 위한 초점거리는 같은 길이로 맞추어지기 어려움을 그림 3-2-11의 결과에서와 같이 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 일반적으로 가급적 단순한 형태의 렌즈를 만들고자 할 경우, 통상적으로 원하는 평행빔의 직경이 정해진다면, 그러한 평행빔을 만들기 위한 렌즈의 초점거리는 소스의 방사각에 의해 결정되기 때문이다.



<그림 3-2-11> 테라헤르츠 평행빔 성형 (collimating) 렌즈 (a) 방사각 50도인 경우, 평행빔 직경 10mm용 렌즈, (b) 방사각 55도인 경우, 평행빔 직경 10mm용 렌즈, (c) 방사각 50도인 경우, 평행빔 직경 10mm용 렌즈, (d) 방사각 55도인 경우, 평행빔 직경 25mm용 렌즈

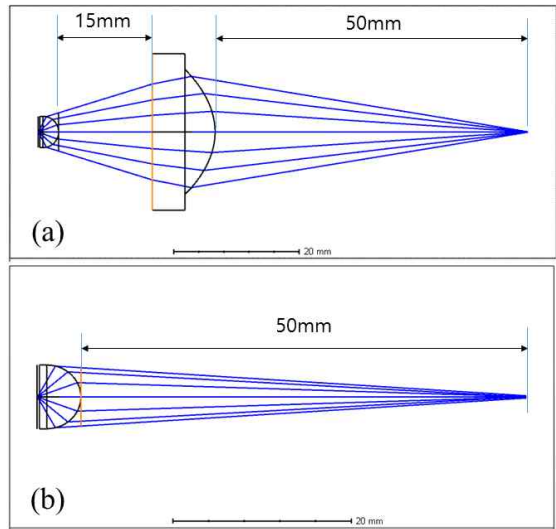
평행빔을 수신기에 전달하기 위하여, 수신기의 수신 각 이내로 빔을 모아주는 초점 형성 렌즈 역시 설계되었다. 원론적으로는 앞에서 설계한 렌즈들도 이러한 목적으로 사용이 가능하기는 하나, 통상 좁은 수신각 (cone angle)을 갖는 horn 형태의 안테나에 테라헤르츠 빔의 에너지를 효율적으로 집속하기 위하여 전용 목적의 렌즈에 대한 설계가 필요하였다. 이에 따라 수신각이 8도인 경우와, 10도인 경우의 두 가지 경우를 상정하고, 각각의 경우에 대하여 평행빔의 직경이 105mm인 경우와 25mm인 경우에 대한 포커싱 렌즈를 그림 3-2-12과 같이 설계하였다.

이 경우에도 앞에서 살펴 본 바와 같이, 수신각의 크기와 평행빔의 크기가 정해지면, 자연스러운 초점을 형성하기 위한 초점거리가 결정되기 때문에, 그림의 경우에서와 같이 네 가지 경우에 대한 렌즈가 설계되었다.



<그림 3-2-12> 테라헤르츠 평행빔 성형 (collimating) 렌즈 (a) 수신각 8도인 경우, 평행빔 직경 10mm용 렌즈, (b) 수신각 10도인 경우, 평행빔 직경 10mm용 렌즈, (c) 수신각 8도인 경우, 평행빔 직경 10mm용 렌즈, (d) 수신각 10도인 경우, 평행빔 직경 25mm용 렌즈

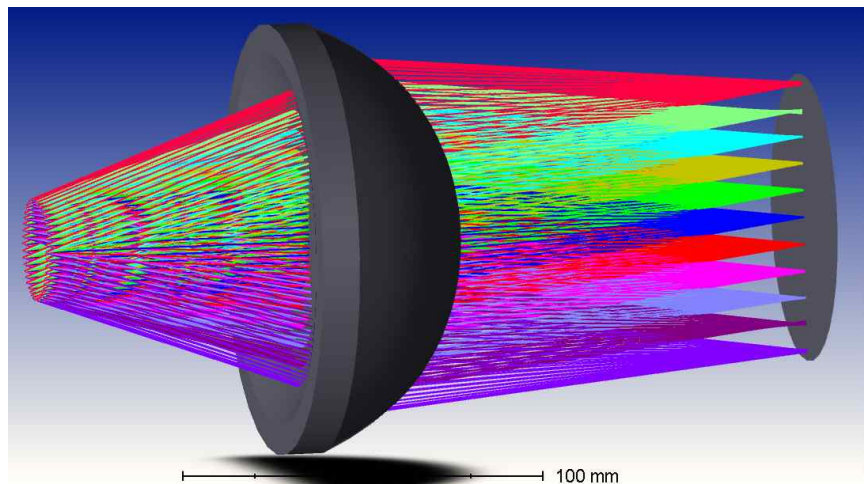
이와 별개로, 테라헤르츠 빔을 스캔 하는 경우와 달리, 매우 짧은 거리에 대하여 한 점에 테라헤르츠 빔을 모으는 응용이 존재 할 수 있다. 이러한 응용에 사용 할 수 있도록, 평행빔의 단계를 거치지 아니 하고 바로 테라헤르츠빔을 원하는 초점 거리에 집속하는 렌즈 역시 설계하였다. 그림 3-2-13은 초점거리 50mm 떨어진 시료에서 반사되어 오는 테라헤르츠 빔을 수신기로 수신하는 경우를 상정하여, 송신용 초점 형성 렌즈와 수신용 초점 형성 렌즈 각각을 설계한 결과이다.



<그림 3-2-13> 초점거리 50mm 에 위치한 반사형 시료 측정을 위한 테라헤르츠 초점 형성 렌즈  
(a) 송신기용 (b) 수신기용

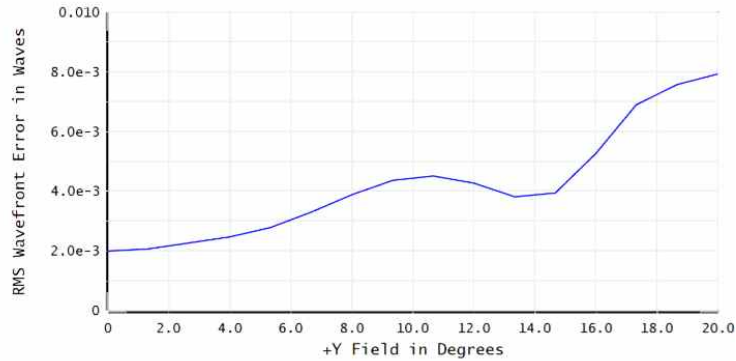
다-2) 테라헤르츠 영상 시스템용 광학계 설계

지난해의 두 개의 렌즈를 이용한 f-theta telecentric 렌즈 설계에서 더 나아가, 시스템의 단순성을 높이고자 단렌즈로 구성된 THz f-theta telecentric 렌즈를 그림 2-10과 같이 설계하였다. 그림에서 볼 수 있듯, 설계된 f-theta telecentric 렌즈는 하나의 렌즈를 가지고, 설계상 28mm의 직경을 갖는 빔에 대하여 f-theta telecentricity를 잘 만족하도록 설계 된 것을 확인 할 수 있다.



<그림 3-2-14> 초점거리 100mm 로 설계된 telecentric f-theta 단렌즈

설계된 렌즈의 품질을 확인하기 위하여 그림 3-2-15에 스캔 각도에 따른 파면 오차 (초점에서 위상 오차, 혹은 optical path difference와 관계되어 수차 등을 판별 할 수 있는 지표 값)의 RMS(root mean square)값을 나타내었다. 결과에서 보듯, 설계된 렌즈는, 스캔각이 커질수록 대체로 파면 오차가 증가하는 양상을 보이고 있다. 따라서 두 개의 렌즈를 사용하는 경우에 비하여 외곽부에서 수차 등의 보정에 다소 부족한 부분이 있는 것으로 나타났으나, 대면적의 이차원 테라헤르츠 반사형 영상을 얻기 위한 테라헤르츠 스캐너용 렌즈로서의 기본적인 성능은 어느 정도 보이는 것으로 확인되었다.



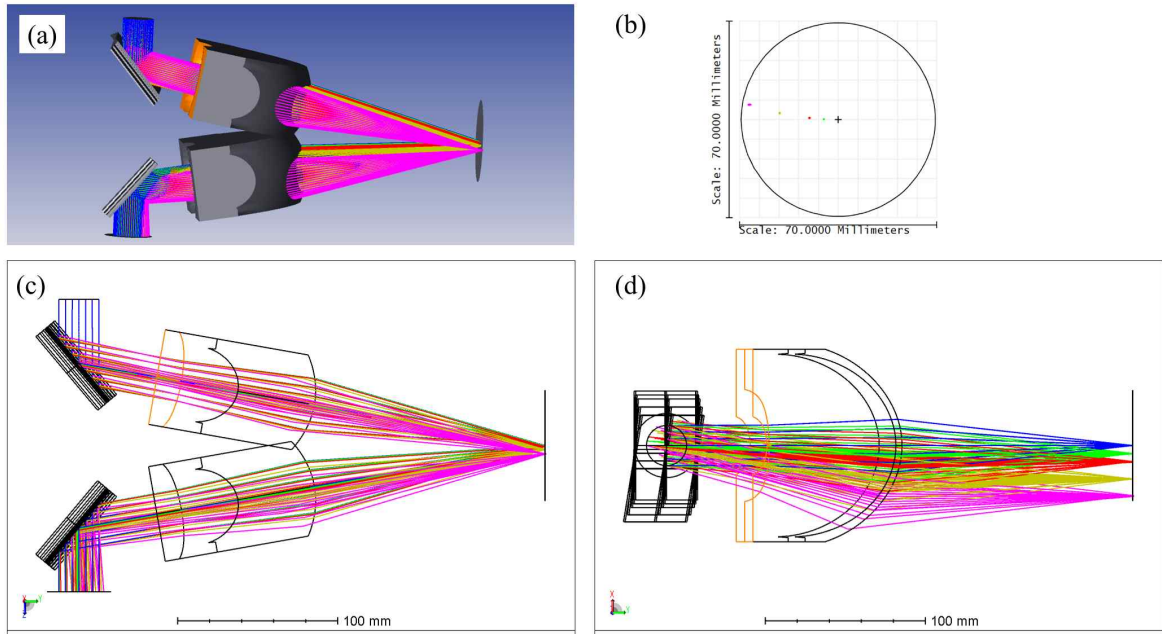
<그림 3-2-15> 스캔 각도에 따른 파면오차값 변화

설계된 f-theta telecentric 렌즈로 2-D 갈바노 스캐너를 이용한 이차원 테라헤르츠 영상 시스템을 구성한 결과, 약 8cmx8cm 가량의 면적에 대하여 분해능은 중앙부에서 약 1.5mm, 외곽부에서 약 3mm 가량을 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

보다 균일한 품질의 분해능을 전체 영상 면적에서 얻기 위해서는 수차 보정을 위하여 두 개 이상의 렌즈를 사용한 광학계의 설계가 필요하며, 이는 시스템의 크기와 가격 모두에 상승 요인이 되기 때문에, 그러한 렌즈를 설계 할 것인지는 향후 시스템을 실제 현장에 적용 하는 결과 추이에 따라 결정되어야 할 것으로 보인다.

갈바노 미러를 사용하는 반사형 영상 시스템의 경우, 샘플에 입사되는 광 경로와 샘플로부터 반사되는 광의 경로가 일치하기 때문에, 이를 분해하기 위하여 빔 스플리터가 사용되게 된다. 그러나 빔 스플리터는 그 원리상, 소스로부터 얻을 수 있는 출력빔의 세기의 최대 25%만을 검출에 사용 할 수 있기 때문에, 시스템의 출력과 감도 등에 부담을 안기게 되는 방식이다.

이를 피하기 위하여, 폴리머 미러를 이용하여 빔 스플리터 없이 기울어진 입사-반사 형태로 영상을 획득 할 수 있는 시스템의 광학계를 설계하였다. 설계된 시스템을 그림 3-2-16에 나타내었다.



<그림 3-2-16> 빔 스플리터가 없이 사용 할 수 있는 기울어진 영상 시스템용 f-theta telecentric 렌즈 시스템의 설계 결과 (a) 조감도 (b) 샘플면에서 초점의 거동 (c) 측면도 (d) 상면도

그림에서 확인 할 수 있는 바와 같이, 샘플면의 초점은 기울어진 폴리곤의 회전에 의한 왜곡의 영향으로 직선이 아닌 곡선 형태의 궤적을 따라 이동하게 된다. 이러한 영상의 왜곡은 후처리를 통하여 해결할 수 있으나, 가능하다면 광학계에서 보정하는 것이 바람직하다. 또한 사입사 방식의 이차원 스캔은 영상 왜곡이 심하게 발생하고, 특히 입사빔의 크기가 클수록 이러한 수차를 보정하는 일의 난이도가 증가하게 되어, 이번 년도에는 일차원 스캐닝을 하는 시스템을 설계하는 것으로 가능성을 확인하는데 그쳤다. 향후에는 보다 전문적인 이차원 스캐닝 시스템의 기법을 적용하여 보다 성능이 향상된 시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대한다.

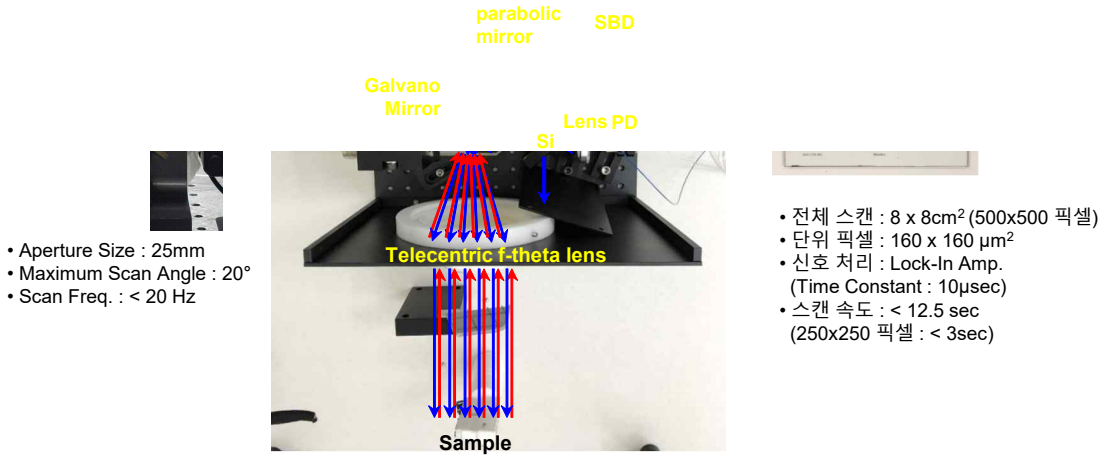
#### 라) 이차원 갈바노 미러 기반 고속 테라헤르츠 영상 시스템

단일 테라헤르츠 발생 및 검출 소자를 이용하여 이차원의 영상 이미지를 얻기 위해서는 마치 CRT(Cathod-Ray Tube, 음극선관) 모니터의 이미지 표현방식과 유사한 래스터 스캔 방식이 있으며 이는 상용 제품의 이차원 갈바노 미러를 이용하여 구현이 가능하다. 그림 3-2-17은 이차원 갈바노 미러 기반의 고속 테라헤르츠 영상 시스템 구성도 및 제작된 프로토타입 시스템이다. 사용된 갈바노 미러는 전압  $-10V \sim 10V$ 에 따라  $-10^\circ \sim 10^\circ$ 로 회전하며 테스트 결과, 반복  $\pm 10^\circ$  회전시 최대 속도 약 20Hz까지 반응하였다. 앞서 설계 및 제작된 telecentric f-theta 렌즈와 결합하여  $8 \times 8 \text{cm}^2$  크기의 이미지를 얻기 위해서 갈바노 미러의 한 축(좌우)은 20 Hz로 고속 반복 회전하며 다른 한 축(상하)은 1/9Hz로 회전시켰다. 이 때, 픽셀  $500 \times 500$ 의 반사형 이미지를 얻는 데 걸리는 시간은 약 12.5sec( $500 \text{line} / 40 \text{Hz}$ )이며, 단위 픽셀 사이즈는  $160 \times 160 \mu\text{m}^2$ 의 높은 픽셀 해상도를 가진다. 단위 픽셀의 크기 설정에 따라 수 초 이내로 스캔 속도는 감소가 가능하며 이미지 스캔 속도는 갈바노 미러의 물리적인 회전 속도(20Hz)에 의해 측정 속도의 한계를 가진다. 그림 3-2-17과 같이 평행빔의 380 GHz 테라헤르츠 신호와 빔가르개를 사용한 반사형 광학계, 갈바노 미러, telecentric f-theta 렌즈, 검출기 SBD 등을 이용하여 시스템을 구성한 후, 기준 금속 패턴을 측정하였다. 측정 결과, 두 금속 라인의 간격이 3mm의 패턴은 구분이 가능하며 1.5mm의 패턴은 이미지 중심에서는 구분이 가능한 반면, 외곽으로 갈수록 뭉개지는 현상이 발생하였다. 추가적인 측정을 통하여 telecentric f-theta 렌즈 설계와 테라헤르츠 빔 정렬을 위한 광학계 구성에 대한 검토 중에 있다.

● Galvano Mirror

● 이차원 반사 이미징 시스템

● Image Resolution



<그림 3-2-17> 이차원 갈바노 미러 기반의 고속 테라헤르츠 영상 시스템 및 측정된 이미지

(a)

Plastic Block

Sample

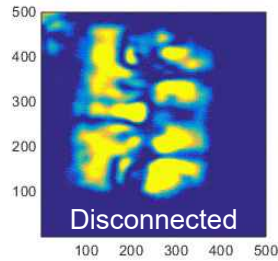
(b)

Connector A

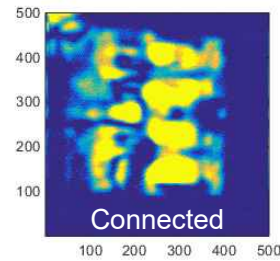
Connector A

(c)

Connector B



Connector B



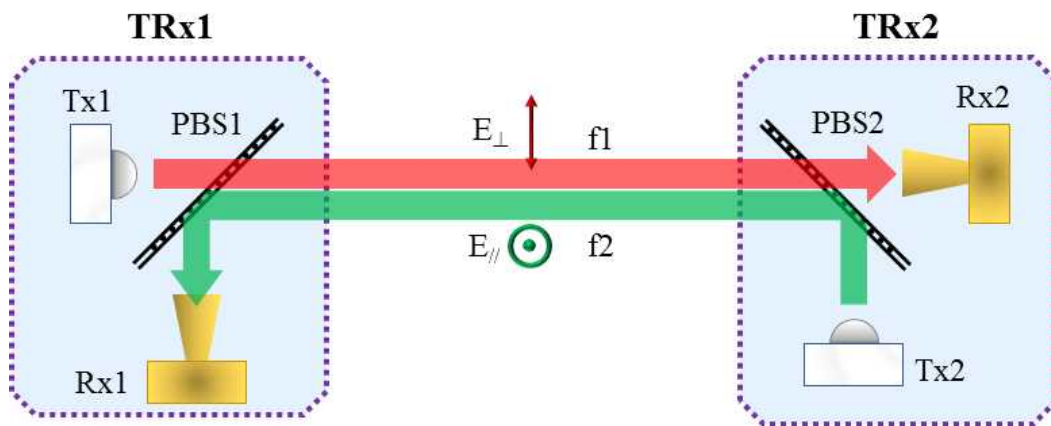
<그림 3-2-18> 반사형 이차원 이미징 측정 시스템 및 커넥터 결합 유무에 따른 측정 이미지

그림 3-2-18은 제작된 프로토타입의 이차원 갈바노 미러 기반 고속 테라헤르츠 영상 시스템을 이용하여 자동차 내부에 사용되는 커넥터들의 결합 유무에 따른 반사 이미지를 측정된 그림이다. 실제 차량 내에 엔진 덮개 등이 존재할 경우를 가정하여 샘플 앞에 플라스틱 블록을 위치시켜 측정하였으며 측정된 이미지는 픽셀 500x500, 크기 8x8cm<sup>2</sup>, 측정 시간은 12.5sec이다. 측정된 이미지는 커넥터의 결합 유무에 따라 붉은 점선 사각형의 내부 이미지가 확연히 다름을 확인할 수 있다. 실제 현장에서 작업자가 차량 1대당 수백 개에 달하는 커넥터를 매일 수백 대씩 조립해야 하는 상황에서 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 휴먼 에러로 인한 미체결된 커넥터를 검출하기 위해서 개발된 영상 시스템을 로봇암에 장착하여 자동차 제조라인에서 그 활용이 가능할 것으로 예상되며 이를 위하여 보다 가볍고 작은 크기의 시스템 설계가 진행 중이다.

마) 2x2 공간 다중 테라헤르츠파 위상 제어 기술

테라헤르츠 대역에서 공간 다중 테라헤르츠파 위상 제어 기술은, 테라헤르츠 무선 통신을 위한 MIMO(Multiple-Input Multiput-Output) 통신의 실현을 위한 기반 기술로 활용이 가능하며, 이를 확장하여 synthetic aperture sampling 방식 등과 결합하면, 3차원 테라헤르츠 영상 시스템 기술 또는 회절 한계 이하의 고 분해능을 얻을 수 있는 고해상도 테라헤르츠 영상 기술 등에 활용이 가능한 중요한 기술이다.

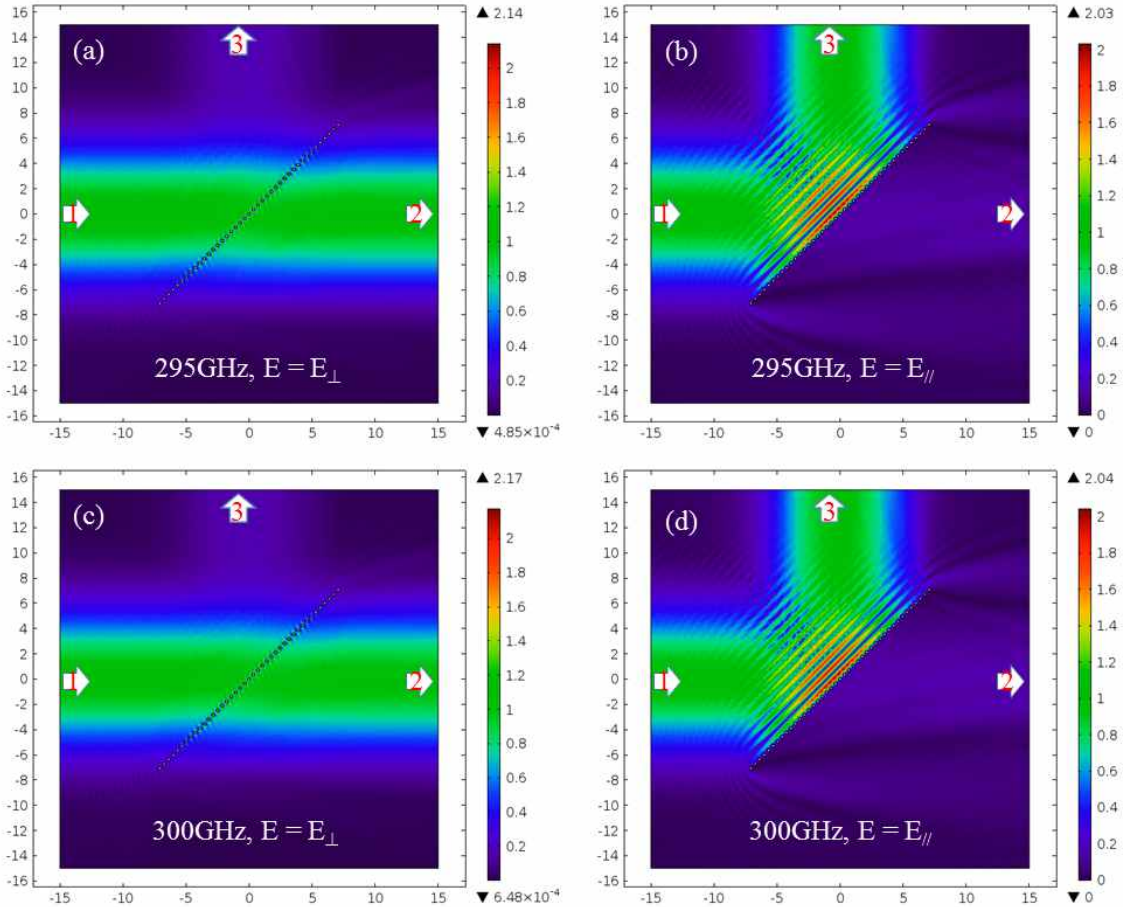
본 년도에는 이러한 공간 다중화를 위한 기초적인 단계로, 먼저 테라헤르츠 트랜시버를 이용하여 구성되는 테라헤르츠 양방향 통신 구성을 전산모사를 통하여 살펴보았다. 테라헤르츠 모듈로부터 방출되는 빔의 편광은, 적절한 안테나를 선택함으로써 비교적 손쉽게 조절이 가능하며, 테라헤르츠 대역의 편광 빔 스플리터(polarization beam splitter, PBS)는 비교적 단순한 구조인 와이어그리드 편광기를 사용하여 손쉽게 구현 할 수 있다. 이러한 성질을 이용한 양방향 트랜시버를 통한 2x2 테라헤르츠 공간 시스템의 구성을 그림 3-2-19에 나타내었다. 이 시스템에서는 서로 수직인 선편광 성분을 이용하기 때문에, 사용되는 두 개의 테라헤르츠 주파수가 반드시 달라야 할 필요는 없으나, 보나 낮은 상호간섭 효과를 얻을 수 있는 구성으로 확장을 고려하여 서로 다른 주파수를 사용하는 경우를 상정하고 계산을 수행하였다.



<그림 3-2-19> 편광 빔 스플리터를 사용한 테라헤르츠 양방향 통신 시스템의 구성도

이러한 시스템을 위하여, 먼저 테라헤르츠 대역에서 편광 빔 스플리터의 성능에 대하여 살펴 볼 필요가 있다. 그림 3-2-20은 와이어 그리드 편광기를 이용한 편광 분해 특성에 대한 계산 결과이다. 이 결과로부터 알 수 있듯, 5GHz 간격의 두 주파수(295GHz와 300GHz)에 대하여, 금속 와이어 그리드 구조를 이용하여 손쉽게 편광 성분을 공간적으로 분리 할 수 있음을 확인 할 수 있다. 계산에 사용된 금속

와이어 그리드 구조는, 반지름 100 $\mu\text{m}$ 인 가는 금속 선이 500 $\mu\text{m}$  주기를 갖고 일차원적으로 배열되어 있는 구조를 상정하였다. 이 때, 각 와이어의 놓인 방향은 화면에 대하여 수직한 방향을 가정하였고, 각 그림의 좌측에서 입사되는 테라헤르츠 빔에 대하여 진행 방향과 45°각도를 가지고 공기 중에 놓여 있는 것으로 가정하였다.



<그림 3-2-20> 와이어 그리드 편광 분배기의 주파수에 따른 편광 분해 성능 검토 계산 결과. (a)와 (b)는 주파수 295GHz 인 경우를, (c)와 (d)는 주파수 300GHz인 경우이고, (a)와 (c)에서는 테라헤르츠파의 편광이 와이어의 방향과 수직한 경우를, (b)와 (d)는 나란한 경우임.

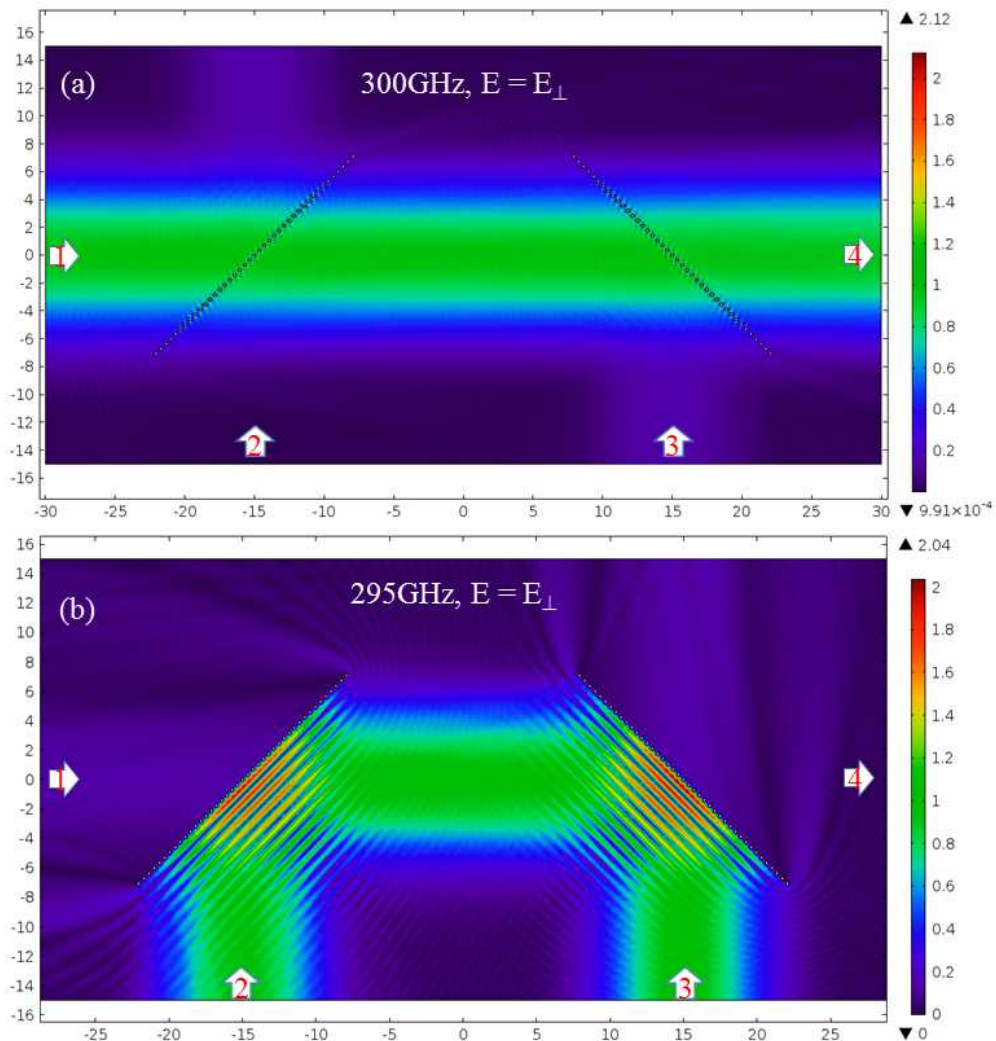
그림 3-2-20의 각 경우에 대하여 계산된 출력값을 기준으로 출력값의 전달율 (%) 및 전달 계수 (S-parameter)를 <표 3-2-1>에 나타내었다.

<표 3-2-1> 주파수에 따른 와이어 그리드 편광 분배기의 편광 분해 성능값

Case	S12				S13			
a	97.12	%	-0.13	dB	2.88	%	-15.40	dB
b	2.56	%	-15.92	dB	97.42	%	-0.11	dB
c	97.44	%	-0.11	dB	2.58	%	-15.88	dB
d	2.67	%	-15.74	dB	97.33	%	-0.12	dB

표에 나타난 바와 같이, 편광 빔 분배기를 사용하여, 출력의 97% 가량을 원하는 방향으로 전달 할 수 있으며, 이 때 다른 포트로의 상호 간섭의 원인이 될 수 있는 출력 전달 계수는 약 -15dB 이하의 값을 보임을 알 수 있다. 이는 통상의 상용 편광 빔 분배기에서 얻어지는 값, 또는 통상적인 채널간 혼선 잡음 값을 고려 할 때 다소 부족한 값일 수 있으나, 격자 상수와 금속 선의 지름을 최적화 하거나, 박막 구조 등을 택함으로써 추가로 개선을 할 수 있는 여지가 존재한다.

앞에서 살펴 본 와이어 그리드 형태의 편광 빔 분배기를 이용한 테라헤르츠 대역의 양방향 2x2 통신 시스템의 성능을 전산모사를 통하여 살펴보면 결과를 그림 3-2-21에 나타내었다.



<그림 3-2-21> 와이어 그리드 편광 분배기를 이용한 테라헤르츠 2x2 양방향 통신 시스템의 출력 전달 계산 결과

이 결과에서 볼 수 있듯, 간단한 편광 분배기 기반의 구성만으로도 2x2 양방향 통신을 위한 시스템을 구성 할 수 있음을 확인 하였다. 이 때의 출력 전달 관계를 표 3-2-2에 정리 하였다. 결과에 나타난 바와 같이, 계산 된 시스템은 채널간 간섭이 최소 30dB 이하이고, 출력 전달은 최소 94% 이상인 것으로 나타났다.

<표 3-2-2> 와이어 그리드 편광 분배기를 이용한 테라헤르츠 2x2 양방향 통신 시스템의 출력 전달 계수 값

295GHz					300GHz				
S31	2.94	%	-15.32	dB	S12	94.71	%	-36.94	dB
S32	94.00	%	-0.269	dB	S13	2.51	%	-16.00	dB
S34	0.09	%	-30.66	dB	S14	0.02	%	-0.24	dB

추가적으로 상기 시스템에 테라헤르츠 렌즈 또는 혼 타입 안테나와 같은 테라헤르츠 광학 기구를 최적화 하여 배치하여 검출기와 발생기에서의 결합 손실을 최소화 하면, 보다 효율적인 시스템의 구성이 가능 할 것으로 기대된다.

이 외에도 차년도에는 수신기와 송신기를 십자형 등으로 공간 배치하여, 보다 본격적인 MIMO 형태의 공간 다중화 방식에 관한 연구를 진행 할 예정이다. 이를 통하여 테라헤르츠 영상계의 분해능을 향상시키고, 다층 박막에 대한 두께 측정 기법으로 활용이 가능한 등, 테라헤르츠 무선 통신 외의 영상과 분광에 있어서도 활용이 가능한 기술을 개발 할 예정이다.

## 제 4 장 연구결과의 활용계획

### 제 1절 성과 확산 계획

#### 【기업 경쟁력 향상】

- 기업 제품의 신뢰성 제고를 통한 기업 이미지와 상품 가치 제고
  - 종래 주로 비전 검사기법에 의존하던 제조업의 불량 검사 또는 품질 검사는, 가시적 조건이 열악한 경우에 불량 판별률이 매우 낮거나 검사 자체가 불가능한 경우가 많음
  - 이로 인하여 불량 선별을 위한 생산 비용 및 시간 증가는 물론, 채 걸러지지 못한 불량 제품의 유통으로 인한 제품 및 기업 이미지 저하의 위험성이 존재
  - 특히 최근 한 국내 대기업의 제품에서 발생한 화재 불량에서 볼 수 있듯, 품질 관리상의 문제로 인한 제품 이상이 소비자의 안전과 직결되는 형태로 발현될 경우 기업이 입게 되는 금전적 손실과 이미지의 저하는 천문학적 규모일 수 있으므로, 기존 검사 기술이 발견치 못하는 불량을 새로운 기술을 통해 발견, 불량률을 낮출 수 있는 검사 기법의 개발은 매우 중요함
  - 예를 들어, 자동차의 페인트 도포 두께 불균일 불량과 같은 경우, 현재는 실시간 검사가 이루어지지 않고 페인트가 마른 후에야 두께 측정이 가능하기 때문에 불량의 발견 시기가 늦어지면 수 십 대의 차량에 대해 재작업이 시행되어야 하며, 제대로 검사가 이루어지지 않으면 외관의 심미적 질 저하 또는 심각한 경우 내구성의 문제를 야기 할 수 있음
  - 테라헤르츠파는 비접촉식으로 페인트의 두께를 측정 할 수 있기 때문에, 페인트 도포용 로봇암에 장착이 가능한 크기의 실시간 페인트 두께 측정 시스템을 개발한다면, 페인트 도포와 동시에 두께를 모니터링하여, 생산 원가를 절감하고 불량을 방지 할 수 있음
  - 동 기술이 개발되면, 페인트 두께의 조절이 더욱 중요한 선박과 항공기 등에 적용이 가능하며, 제조 원가 절감과 함께 품질의 관리를 통한 제품 및 기업의 이미지 제고에 기여 할 수 있음

#### 【산업 경쟁력 향상】

- 초소형, 고품위, 저가격 테라헤르츠 부품 기술 개발을 통한 통신, 군수, 의료, 의약, 비파괴 측정 분야 등에서 기존 산업 대체 및 신산업 적용 상용기술 개발이 가능함
  - 유연기관의 실시간 두께 및 전기전도도 측정 시스템
  - 불투명 소재 및 액상 소재의 실시간 특성 측정 시스템
  - 제약분야의 신개념 품질관리 시스템 기술
  - 스텔스 물질의 특성 분석 및 도료 두께 실시간 측정
  - 100Gbps급 비압축 기기간 근접 무선 통신 기술
  - 테라헤르츠 분자지문 기반 의료 영상 진단 시스템 기술
- 종래에 불가능하였던 기술 문제의 해결을 통한 국내 산업의 국제적 최고 경쟁력 확보
  - 한국전자통신연구원은 국내 한 대기업의 의뢰로 테라헤르츠 기술의 고용량 배터리 불량 검사 적용 가능성을 검토 중이며, 기술적 적용이 가능하다면 전기자동차와 고용량화되는 휴대 전자 기기 등의 배터리에 대한 비파괴 검사 기술이 산업 현장에 적용 될 전망이다
  - 특히 해당 불량은 현존하는 다른 기법들로는 판별이 불가능하거나 실용성이 매우 낮아 현장 적용이 불가능한 것으로 확인되었으나, 테라헤르츠 기술의 적용 가능성을 매우 높게 기대하고 있음
  - 성공적인 검사 기법 개발 시, 세계 주요 산업으로 부각되고 있는 전기자동차 산업, 배터리 산

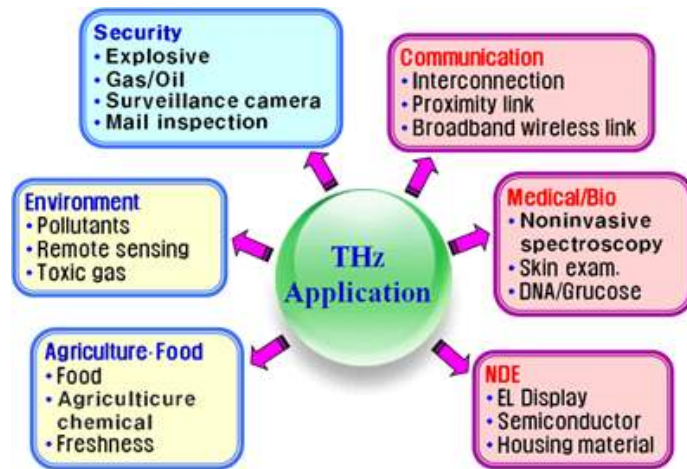
업, 휴대용 전자기기 산업 등의 핵심 원천기술을 확보 할 수 있을 것으로 기대됨

#### 【경제적 파급효과】

- 산업 경쟁력 증대를 통한 세계 시장 석권
  - 자동차 산업, 배터리 산업과 같이 세계적으로 막대한 규모의 시장을 형성하고 있으며, 품질 경쟁과 차별화에 대한 경쟁이 극심한 산업 분야에 테라헤르츠 산업용 비파괴 검사 기술을 적용 시, 국내 제품의 차별적 품질과 신뢰성을 높일 수 있으며, 이를 통하여 세계 시장에서 국내 기업 제품의 차별적 지위 확보 및, 세계 시장 석권을 하는 제품을 다수 배출 가능
- 테라헤르츠 비파괴 검사 기술 자체의 산업화
  - 테라헤르츠 비파괴 검사 기술 자체의 산업화를 통하여 국내 중소기업들의 세계시장 진출을 통한 중견 이상 대기업 규모로의 성장을 촉진 할 수 있는 계기가 될 수 있으며, 관련 산업의 활성화를 이끌어내는 계기가 될 수 있음
- 유관 테라헤르츠 기술 산업화 촉진
  - 테라헤르츠 비파괴 검사 기술 개발 과정에서 테라헤르츠 발생기, 검출기 및, 테라헤르츠파를 다루는 제반 기술의 동반 성숙으로 인하여 테라헤르츠 무선 통신, 테라헤르츠 분광 및 센싱, 테라헤르츠 인터커넥션 등 테라헤르츠 핵심 부품이 적용 될 수 있는 유관 기술들의 산업화가 촉진 될 것임

#### 【국가·사회적 파급효과】

- 분자지문 분석으로 신개념 인간 유해물질 진단 기술 개발을 통한 안전하고 건강한 사회 건설에 기여
  - 파면제어를 통한 뇌암 및 유방암 진단 기술
  - 유해물질(독가스, 폭발물 등)로부터 안전하고 쾌적한 환경 구축
- 무선통신의 데이터 병목 해소와 개인화된 통신환경 제공을 통한 인간중심 초연결 사회의 진정한 실현 기술 제공
  - 파면제어를 통한 개인화 된 초고속 통신 환경 실현
  - IoT를 위한 통신 환경 구현의 병목점 해소를 통한 인간중심 초연결 사회 구현의 현실화
- (국가경제 구조의 취약성 극복) 제조업과 제조업을 기반으로 하는 서비스 산업에서 취약해진 국가 경쟁력을 높이기 위한 혁신적 전환의 기회 제공
  - 중국의 추격과 선진국과의 격차 심화로 인한 우리나라의 성장력 둔화 및 미래 성장동력 약화라는 난제에 해결책 제시
  - 기술경쟁력이 취약한 부품·소재를 비롯, ICT서비스 산업까지 폭 넓게 활용 가능한 기술 기반 제공
- 타 전자기과 대역에서 제공하지 못하는 테라헤르츠 분자지문 제공을 위해 멀티모달 파면제어 기술 개발 필요성이 대두되고 있고 이의 핵심 기술인 어레이형 소자 개발을 본 과제에서 개발 예정으로 각각의 소자 위상을 효과적으로 제어하는 파면제어 기술 개발이 개발된다면 지금까지 제시된 테라헤르츠 서비스 시나리오가 달성될 것으로 예측되고 이의 산업화로 미래 국가 경쟁력 확보가 예측됨



<그림 4-1> 주요 테라헤르츠 응용영역

## 제 2절 기술이전을 통한 기업화 추진방안

- 연속과 방식의 튜너블 테라헤르츠 트랜시버 기술 개발을 위한 소재부터 시스템 전 연구영역 확보를 추진 일부 차별화된 연구결과를 확보하였고, 현재 이들 핵심 부품의 특성 개선을 추진중에 있으며 테라헤르츠 응용영역 확보를 동시에 추진중에 있음
- 세계에서 가장 작고, 고품위, 저가격 실현이 가능한 차별화된 핵심 부품 기술을 활용 테라헤르츠 영상, 분광 시스템 개발에 관한 시제품들을 제시하였으며 이를 활용 자동차, 제약, 군수 분야의 생산 공정 품질 검사 장비 상용을 추진 중으로 상용제품이 개발이 완료되었을 때 테라헤르츠 기술분야 산업이 전무한 상태에서 세계적인 차별화가 예상되고 또한 원천 기술 개발이 갖는 파급효과를 직접 볼 수 있는 계기가 될 것으로 확신함

<표 4-1> 테라헤르츠 기술이전 실적 및 추진 예정

기술이전 목록	주요 핵심기술내용	확수 기본료	이전여부 및 시기	이전형태
초소형 튜너블 THz파 발생용 dual-mode laser 기술	튜너블 THz파 발생의 핵심인 이중모드 레이저 (기술이전 완료)	1억	2014년 12월	특허, 설계도, 칩
테라헤르츠파 발생용 초소형 dual-mode laser의 파장가변 기술	비팅광원을 광통신 PON (passive optical network)시스템 구성용 파장가변 레이저 적용 기술	0.5억	2015년 7월	특허, 설계도, 칩
비파괴 측정용 테라헤르츠파 발생 기술	산업용 테라헤르츠 비파괴 측정 기술 개발 및 자동차 생산공정 품질 검사 추진 국내외 첫 사례	5억	2016년 12월	특허, 설계도, 칩
비파괴 측정용 테라헤르츠파 검출 기술	산업용 테라헤르츠 비파괴 측정 기술 개발 및 자동차 생산공정 품질 검사 추진 국내외 첫 사례	2억(예정)	2018년	특허, 설계도, 칩
테라헤르츠 수밀 측정기	자체 개발된 초소형 실시간 페인트 두께 측정기술	-	2018년	특허, 설계도
포터블 테라헤르츠 두께 측정기	실시간 페인트 두께, 오일 순도 측정기술	-	2019년	특허, 설계도, 시제품
테라헤르츠 보안 및 태깅 기술	테라헤르츠 보안 및 태깅 기술	-	2021년	특허, 시제품

## 제 5 장 결론 및 건의사항

### 제1절 결 론

본 사업과제는 2011년부터 정부출연금 사업으로 편성되어 금년에는 7차년도 연구가 수행되었다. ETRI에 최초 설치된 세 개의 창의센터 중 하나인 THz 포토닉스창의연구센터는 테라헤르츠 연구분야 선도 연구그룹을 목표로 지난 연구기간 동안 소재부터 시스템까지 포토닉스 기반의 테라헤르츠 전 연구분야를 개척하고 있는 전 세계 몇 되지 않은 테라헤르츠 전문 연구그룹이다. 2016년 조직개편으로 7개 창의연구센터가 각기 새로운 연구소에 편입되어 현재까지 연구가 진행되고 있다. 조직 개편에 따른 장·단점을 직접적으로 표현하기는 힘들지만 지금 생각해 보면 지난 창의연구센터 5년간은 분명 연구하기 좋은 기간이었던 것은 확실하다는 생각이다. 당해연도는 지금까지 개발한 연속과 방식의 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술을 활용하여 실험실에서 산업 현장으로 진입할 수 있는 시스템 개발을 추진한 한해로 수많은 어려움을 극복한 한해였다. 2016년 12월 기술이전으로 시작된 테라헤르츠 비파괴측정기술 개발에 많은 기술적 발전이 진행되었으며 초기 개발된 영상시스템에서 분광기술이 접목된 포터블 물질내 누수 검사기는 자동차 업계 숙원 사업중 하나인 방수처리 불량률 검사 할 수 있을 것으로 세 번에 걸친 시연을 통해 그 가능성을 확인 하였다. 수밀계측기는 2018년 기술이전이 예정되어 있으며 시제품 개발을 통한 2019년 초 생산라인 탑재를 위한 로드맵이 기술이전 예상업체, 현대자동차간 구체적인 일정 등이 수립되어 있다. 테라헤르츠 핵심 원천 기술 개발을 시작으로 이제 신개념의 측정 기술 제공이 가능한 특정시스템 개발까지 연구 영역을 확대하고 있어, 포토닉스 기반의 테라헤르츠 기술 선점을 통한 세계적 기술경쟁력 확보가 예상된다. 이를 위해 오늘도 모든 업무에 최초, 최고를 지향하고 있다. 지난 연구기간 동안 쌓은 연구결과 및 차별화된 추진 전략의 결과, 매년 3~4차례 정식 초청논문 발표를 하고 있고, 최근 급격히 증가하고 있는 기업 애로기술 수요 상담을 고려 해 볼 때 원천기술 개발이 가지고 오는 파급효과를 직접적으로 확인 할 수 있었다. 우리나라의 경제 규모와 기술 여건 상, 더 이상 fast follower 전략으로는 어느 것 하나 우리들 마음대로 진행될 수 없다는 것은 이미 잘 알려져 있는 내용이듯, 어렵게 만든 창의연구실 사업이 세계적인 연구결과를 창출 할 수 있도록 연구원 각자 및 연구원 차원에서 지원이 절실하다. 테라헤르츠 기술 개발을 시작으로 확보한 대표적 연구실적은 원천기술 국내외 특허출원 40건, SCI논문(IF>3.0) 20편 게재, 기술이전 3건, 국무총리 표창을 포함한 수상 3건 등을 달성하였다. 이외에 다수의 학회 기조연설과 유명 학술회의에서의 초청논문 발표 등이 있다.

## 제2절 건의사항

창의연구실은 당초 ETRI의 미래를 대비한 원천 연구사업으로 시작하여 2012년부터는 그 미래성과 당위성을 인정받아 정부출연금사업)으로 편성되어 안정적인 연구를 수행하게 되었으나, 프로그램 기간 및 이에 따른 예산 규모의 미 정립으로 장기적이고 발전적인 연구의 어려움에 당면하였다. 3년 기간의 개념창출 단계를 마무리하고, 개념적용 및 확대 연구를 수행하는 2단계 3년, 글로벌 연구센터로의 입지를 달성하기 위한 3단계 3년의 연구를 수행하기 위하여 예산 및 과제 구조 상 유연하고 장기적인 연구체계의 지속적인 확보가 필요하다. 다행히 2017년 주요사업 롤링플랜에 의해 집적형 테라헤르츠 트랜시버 모듈 개발 및 파면제어 기술 개발 강화가 가능하게 되어 기대가 된다. 세계 최고 성능의 테라헤르츠 핵심 부품 개발 및 이에 기반 한 응용 플랫폼 개발, 신개념의 테라헤르츠 태깅 기술, 파면제어 기반 테라헤르츠 신기술 등이 개발될 예정이다. 똑똑한 원천기술 개발 하나가 국가 미래 기술 경쟁력에 큰 밑거름이 될 수 있으며, 신개념의 미래 융합기술을 창출 할 수 있다. 초창기 미미하게 시작한 창의연구실 사업이 큰 결실의 중심에 서서 국가 경쟁력을 견인할 대표적 미래 기술 창출과 원천기술 확보의 터전으로 발전되기를 바란다.

## 참고문헌

- [1] Douglas J. Paul, et al. Laser & Photon. Rev., 1-23 (2009).
- [2] "The THz Technology; R&D, Commerical Implication and market forecast" Fuji -Keizai
- [3] Frost& Sullivan Market Insight 2010. 8
- [4] T. Kameda et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol.5, 1993, pp.608
- [5] E. S. Lee, N. Kim, S.-P. Han, D. Lee, W.-H. Lee, K. Moon, I.-M. Lee, J.-H. Shin, and K. H. Park, "SOA-integrated dual-mode laser and a pin-photodiode for compact CW terahertz system," ETRI. J. 38(4), pp. 665-674 (2016)
- [6] S. Verghese, K. A. McIntosh, S. Calawa, W. F. Dinatetele, E. K. Duerr, and K. A. Molvar, "Generation and detection of coherent terahertz waves using two photomixers," Appl. Phys. Lett. 73, 3824-3826 (1998)
- [7] T. Ishibashi, H. Fushimi, T. Furuta, and H. Ito, "Uni-traveeling-carrier photodiodes for electromagnetic wave generation," Proc. THz 99, pp.36-39 (1999)
- [8] S. -P. Han, H. Ko, J. -W. Park, N. Kim, Y. -J. Yoon, J. -H. Shin, D. Y. Kim, D. H. Lee, and K. H. Park, "InGaAs Schottky barrier diode array detector for a real-time compact terahertz line scanner," Opt. Express 21(22), 25874-25882 (2013).
- [9] S. -P Han, H. Ko, N. Kim, W. -H. Lee, K. Moon, I. -M. Lee, E. S. Lee, D. H. Lee, W. Lee, S. -T. Han, S. -W. Choi, and K. H. Park, "Real-time continuous-wave terahertz line scanner based on a compact  $1 \times 240$  InGaAs Schottky barrier diode array detector," Opt. Express 22(23), 28977-28983 (2014).
- [10] S. -P. Han, N. Kim, W. -H. Lee, E. S. Lee, H. Ko, I. -M. Lee, K. Moon, D. H. Lee, and K. H. Park, "Real-time imaging of moving living objects using a compact terahertz scanner," Appl. Phys. Express 9, 022501 (2016).
- [11] K. Moon, J. Choi, J.-H. Shin, S.-P. Han, H. Ko, N. Kim, J.-W. Park, Y.-J. Yoon, K.-Y. Kang, H.-C. Ryu, and K. H. Park, "Generation and detection of terahertz waves using low-temperature-grown GaAs with an annealing process," ETRI. J. 36, 159-162 (2014).

- [12] M. R. Melloch, J. M. Woodall and E. S. Harmon, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **25**, 547–600 (1995).
- [13] T. Göbel, D. Stanze, B. Globisch, R. J. B. Dietz, H. Roehle and M. Schell, *Opt. Lett.* **38**, 4197–4199 (2013).
- [14] <sup>21</sup>C. W. Berry, N. Wang, M. R. Hashemi, M. Unlu and M. Jarrahi, *Nat. Comm.* **4**, 1622; doi: 10.1038/ncomms2638 (2013).
- [15] K. Moon, I. -M. Lee, S. -H. Shin, E. S. Lee, N. Kim, W. -H. Lee, H. Ko, S. -P. Han and K. H. Park, *Sci. Rep.* **5**, 13817; DOI:10.1038/srep13817 (2015).
- [16] K. Moon, E. S. Lee, J. Choi, D. Lee, I.-M. Lee, S.-P. Han, H.-S. Kim and K. H. Park, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 071105 (2016).
- [17] S. Fathololoumi, E. Dupont, C.W.I. Chan, Z.R.Wasilewski, S.R. Laframboise, D. Ban, A. Mátyás, C. Jirauschek, Q. Hu, and H. C. Liu, “Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~ 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling,” *Opt. Exp.* **20**, 3866 (2012)

## 약어표

BCB	BenzoCycloButene
BPM	Beam Propagation Method
BWO	Back Wave Oscillator
DFB	Distributed FeedBack
DML	Dual-mode Laser
FWM	Four-Wave Mixing
GaAs	Gallium Arsenide
GND	Ground
GSG	Ground-Signal-Ground
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HDPE	High-Density PolyEthylene
InAlAs	Indium Aluminium Arsenide
InGaAs	Indium Gallium Arsenide
InP	Indium Phosphide
LD	Laser Diode
LTG	Low-Temperature Grown
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
MQW	Multiple Quantum Well
MM	Metal-Metal
NEP	Noise Equivalent Power
PCA	Photo-Conductive Antenna
PL	PhotoLuminescence
QCL	Quantum Cascade Laser
RIE	Reactive Ion Etching
RTA	Rapid Thermal Annealing
SBD	Schottky Barrier Diode
SISP	Semi-Insulating Surface Plasmon
SCH	Separate Confinement Heterostructure
SEM	Scanning electron microscopy
SNR	Signal-to-Noise Ratio

SOA     Semiconductor Optical Amplifier  
THz     Terahertz  
UTC-PD   Uni-Traveling Carrier PhotoDiode  
XRD     X-Ray Diffraction

주 의

1. 이 연구보고서는 한국전자통신연구원의 주요사업으로 수행한 최종연구결과입니다.
1. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국전자통신연구원에서 수행한 주요사업 결과임을 밝혀야 합니다.