

테라헤르츠 포토닉스 기술

꿈의 전자기파 대역 '테라헤르츠파'

테라헤르츠(terahertz, THz)파는 적외선과 밀리미터파 사이에 존재하는 0.1~10THz 주파수 영역의 전자기파이다. 전파의 투과성과 광파의 직진성을 동시에 가지고 있어 독특한 물리적 특성을 보유한 테라헤르츠파는 비금속이나 무극성 물질의 투과 특성 또는, 물질의 고유 분자지문 분석 등을 통해 테라헤르츠 소자, 분광, 영상 기술 등의 기초 과학과 의공학, 보안, 환경·우주, 정보통신 등의 응용 과학 분야에서 이미 그 중요성이 검증되어 향후 폭넓은 산업 응용으로 다양한 분야에서 새로운 형태의 시장이 형성될 것으로 기대된다. 또한 수많은 분야에서 인간중심의 미래 기술 창출이 가능한, 인류가 아직까지 개척하지 못한 꿈의 전자기파 대역이다.

전자기파의 산업적 활용을 위해 전제 조건과도 같은 필수적인 기술은 해당 주파수 대역에서 고효율, 고감도, 광대역, 소형 및 저가격의 파원 및 검출기를 만드는 기술이다. 지난 20세기 전자기파 대역 개척사는 이러한 파원 및 검출기의 개발이라고 보아도 과언이 아닐 것이다. 안타깝게도 테라헤르츠파 대역만이 유독 미개척 분야로 남아 소위 '테라헤르츠 갭'이라 불려졌을 정도로 이 분야에 대한 연구 개발이 미흡했던 것 또한 사실이었다 <그림 1>. 그러나 최근 20여 년간, 펄스세컨드 펄스 레이저의 발명과 반도체 성장

및 가공, 공정 기술의 발달로 점차 효율적인 테라헤르츠 파원과 검출기에 대한 연구 성과들이 축적되고 있다.

테라헤르츠 포토닉스

고출력, 고감도의 테라헤르츠 파원과 검출기를 개발하는데 있어 가장 큰 장애물은, 테라헤르츠 파에 해당하는 적합한 밴드갭을 가진 물질을 찾기 어렵다는데 있다. 따라서 테라헤르츠파를 만들기 위해 오늘날 가장 많이 사용되는 방법은, 주로 물질의 비선형성을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 그 가운데, 주파수가 테라헤르츠 대역에 해당하는 두 개의 광원을 사용하는 테라헤르츠 비팅(beatting) 광원을 이용한 방법은, 테라헤르츠 파원의 시스템 크기와 요구 전력을 획기적으로 줄일 수 있고, 광통신 대역의 광원과 부품을 사용할 경우 경제적으로도 높은 이점이 있다. 또한 두 개의 비팅 광원의 주파수를 전지적으로 조절하여 비교적 넓은 대역폭에서 테라헤르츠파의 발진 파장을 튜닝할 수 있다는 장점으로 인해 향후 테라헤르츠파의 산업적 응용 분야를 넓히기 위한 핵심적 기술로 여겨지고 있다.

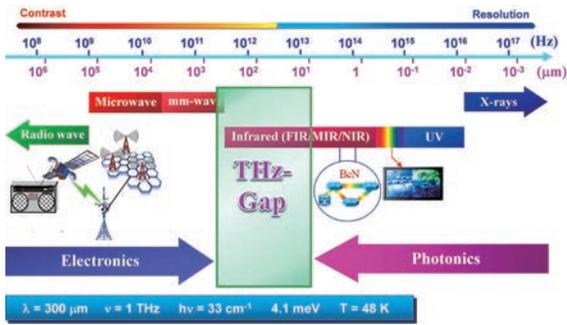
이러한 테라헤르츠파 기술을 실생활에 적용하기 위해서는 테라헤르츠 대역 소자의 특성을 향상시키고, 크기와 가격을 낮추는 것이 매우 중요하며, 고효율 테라헤르츠 파원과 고감도의 2차원 검출기



글 박경현

한국전자통신연구원
THz포토닉스창의연구센터장
khp@etri.re.kr

글쓴이는 연세대학교 물리학과 석사 및 박사 학위를 받았으며 미국 컬럼비아 대학에서 박사후과정을 마쳤다. 한국과학기술연구원 광기술센터에서 집적광학을 연구했으며 이후 한국전자통신연구원에서 반도체 광소자 연구를 진행했다. 현재 한국전자통신연구원에서 포토닉스 기반 기술을 이용한 테라헤르츠 분야에서 다양한 연구를 하고 있다.



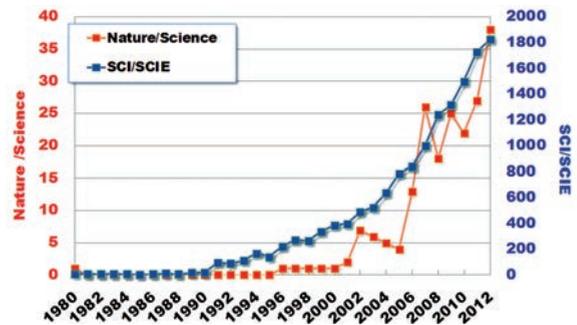
▶▶ 1. 테라헤르츠 주파수 대역

개발은 보안 등의 구체적인 응용 이외에도 지금까지 경험하지 못한 테라헤르츠 영상 기반의 신개념 비파괴 측정 시스템 개발로의 발전이 예고되고 있다. 이를 위해서는 포토닉스 기반의 테라헤르츠 가변형 연속파 신호원 및 검출기 기술과 이를 기반으로 구현 가능한 응용 기술이 필요하다.

테라헤르츠 포토닉스 소자 연구동향

테라헤르츠 분야는 지난 20여 년간 비팅 광원, 포토믹서(photomixer), 검출기 등의 개발을 포함, 나노 메타물질 기반의 각종 능동·수동 소자 등의 개발이 이어져 왔으며, 응용 분야에서도 테라헤르츠 분광학, 이미징, 센서, 테라헤르츠 통신 등 다양한 분야에 걸쳐 활발하게 연구가 이루어지고 있다(그림 2).

본고에서는 테라헤르츠 관련 각종 개발 기술 가운데, 테라헤르츠 포토닉스를 위한 광원으로서 비팅 광원 개발과, 테라헤르츠파 발생 방법의 하나인 포토믹싱을 위한 포토믹서의 개발, 테라헤르츠파 검출기 및 나노 광학을 이용한 각종 능동, 수동소자의 개발, 그리고 테라헤르츠파 응용분야에 대한 본 한국전자통신



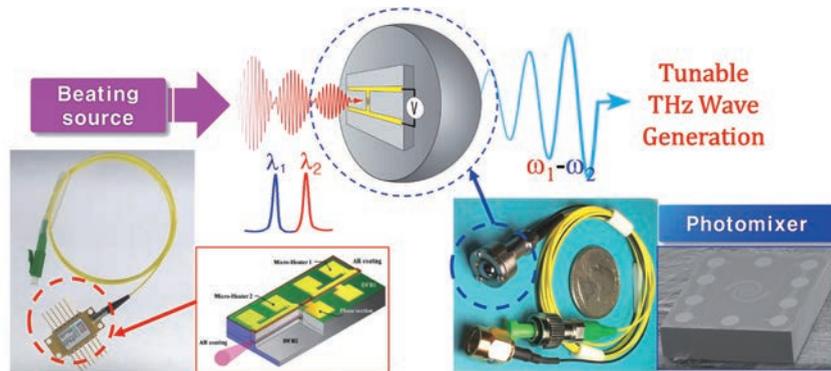
▶▶ 2. 테라헤르츠 기술동향: 연간 논문 추이

연구원(ETRI) 테라헤르츠 포토닉스 창의연구센터의 각종 연구 개발 성과들을 간략하게 살펴 보고, 향후 테라헤르츠 포토닉스 분야의 발전 방향에 대한 전망을 살펴보고자 한다.

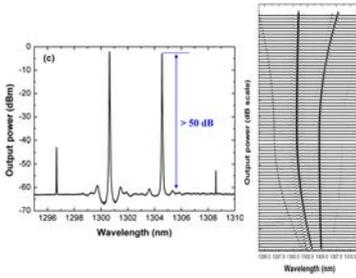
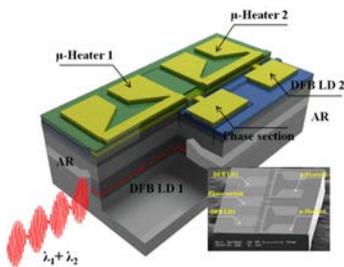
테라헤르츠 비팅 광원

테라헤르츠 비팅 광원의 개발 방향은 크게 고출력 광원 개발을 위한 노력과, 시장성과 응용성을 염두에 둔 고효율 광원 개발의 두 갈래가 주류를 이루고 있다. 이 가운데 특히 최근 관심을 모으고 있는 분야는 반도체 레이저(LD) 기반의 테라헤르츠 비팅 광원으로, 두 개의 레이저 빛을 공간 상에 중첩, 이들의 주파수 차에 해당하는 테라헤르츠 비팅 신호를 얻고, 이를 고속 광전변환 물질로 전류 신호로 변환 후, 안테나를 통해 자유공간 상에 방출하는 테라헤르츠 포토믹싱 방식을 위한 효율적이고 간편한 광원을 제공하는 방식이다(그림 3).

이러한 반도체 비팅광원 기반 포토믹싱 방식은 이미 다양한 분야에서 응용 가능성이 검증되고 있다. 특히 기존에 일반적으로 사용되던 포토믹싱을 이용한



▶▶ 3. 비팅 광원에 의한 테라헤르츠파 발생



▶▶ 4. 이중모드 반도체 레이저 칩의 구조와 스펙트럼 특성 및 파장 튜닝 특성

테라헤르츠 연속파(CW) 시스템은 두 개의 독립적인 레이저를 이용하여 구성하는 것이 보통이나, ETRI에서 세계 최초로 개발한 이중모드 반도체 레이저는 두 개의 레이저가 집적된 단일 공진기 구조로 하여 초소형·저전력의 테라헤르츠 연속파 시스템의 제작을 가능케 하는 획기적인 광원 시스템이다. 본 센터는 더 나아가 테라헤르츠파의 세기를 키우기 위해 사용되는 광 증폭기까지 하나의 칩 안에 집적하여 단일 칩 테라헤르츠 연속파 발생기를 제작하기 위한 연구도 진행하고 있다 <그림 4>.

테라헤르츠 포토믹서

테라헤르츠파 발생이나 검출하는 방법 중의 한 가지는 포토믹서를 이용하는 방법이다. 포토믹서는 크게 평면형과 도파로형 두 가지로 구분할 수 있다. 평

면형 저온성장 포토믹서는 구조가 간단하여 기존 반도체 공정을 이용하여 제작이 용이하다는 장점이 있고, 도파로형 포토믹서는 기본적으로 고속, 고효율의 동작이 가능하다는 장점이 있다. 현재 활발하게 연구되고 있는 도파로형 포토믹서는 TWPD(travelling-wave photodetector) 방식과 UTC-PD(uni-travelling carrier photodetector) 방식 등이 알려져 있다.

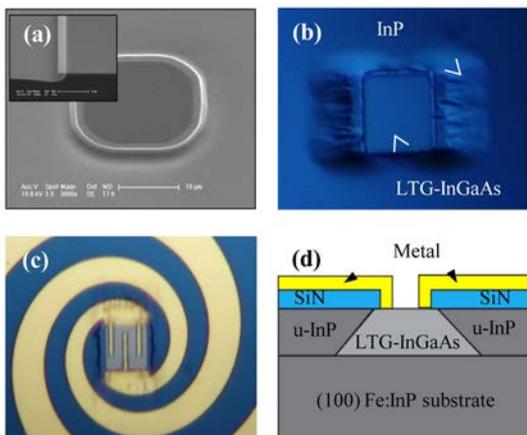
평면형 저온성장 테라헤르츠 포토믹서

평면형 저온성장 테라헤르츠 포토믹서는 MBE (molecular beam epitaxy)를 이용하여 저온에서 성장한 III-V족 화합물 반도체를 기반으로 하는 소자로 화합물 반도체의 결정 특성 및 운반자 동역학 등의 원천 연구와 효율이 높은 소자의 형태로 제작하기 위한 응용연구가 함께 진행되는 분야이다.

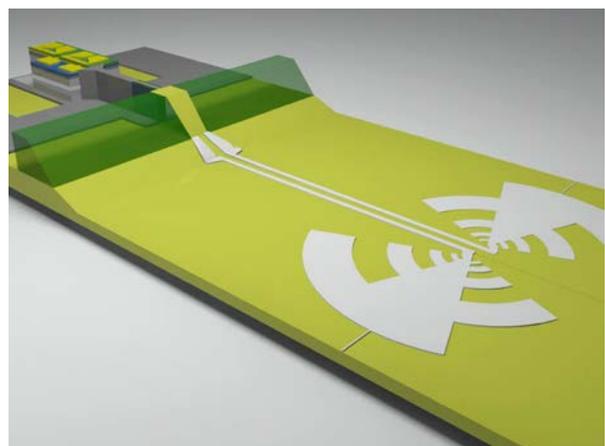
ETRI에서는 저온성장 InGaAs 및 GaAs의 물성연구로부터 소자응용 연구까지 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다<그림 5>.

도파로형 테라헤르츠 포토믹서

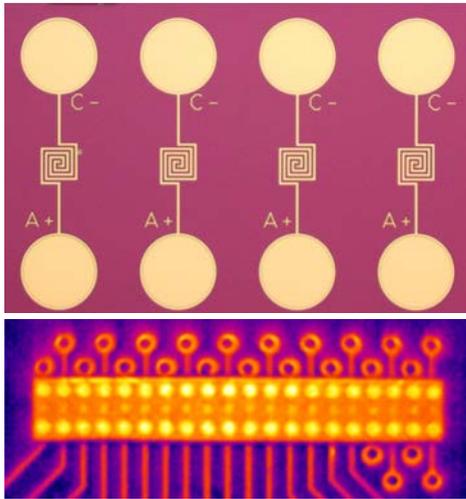
저온성장 테라헤르츠 포토믹서에 비해 대역폭은 작지만, 고효율·고출력의 포토믹서를 제작하기 위해 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition) 기반으로 도파로형의 포토믹서가 연구 개발되고 있다. 기존의 포토다이오드 제작 기술을 이용하면서도 수백 GHz 대역에서 동작할 수 있는 소자로 단일 소자뿐만 아니라, 개발된 비팅 광원과의 집적으로 신개념 소자



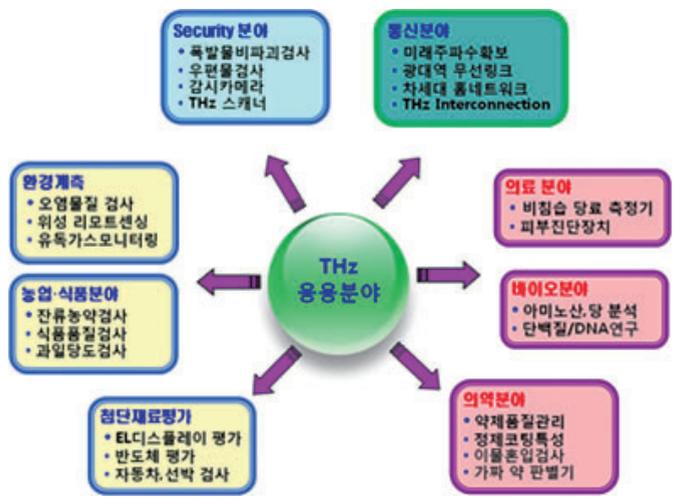
▶▶ 5. 저온성장 InGaAs 포토믹서 칩



▶▶ 6. 비팅광원이 집적된 테라헤르츠 포토믹서



▶▶ 7. SBD 어레이 검출기 칩



▶▶ 8. 테라헤르츠파 응용분야

를 제작하기 위한 연구도 진행되고 있다(그림 6).

테라헤르츠 SBD 검출기

200~700GHz 대역의 주요 응용 분야인 테라헤르츠 무선 통신과 이미징을 위해 단일 SBD(Schottky barrier diode) 및 어레이 검출기가 연구 개발되고 있다. SBD의 고주파 응답 특성 향상 연구와 함께 어레이 구조에서의 누화특성, SBD 칩에 집적되는 협대역 및 광대역 안테나 설계연구가 진행되고 있다(그림 7).

테라헤르츠 능동·수동소자

최근 새로이 각광을 받기 시작한 메타물질과 표면 플라즈몬, 그래핀 등의 첨단 연구분야에서도 테라헤르츠 파에 대한 관심이 나날이 높아지고 있는 추세이다. 테라헤르츠 기반의 메타물질은 고비용의 나노 공정에 대한 부담이 적고, 고속 스위칭 등 다양한 기능을 구현할 수 있다는 장점으로 이미 많은 연구가 진행 중에 있다.

테라헤르츠 대역에서 저손실 표면 플라즈몬을 발생시킬 수 있고, 그 전기적 특성 변화를 일으키기 용이하다는 그래핀의 성질에 기반하여 다양한 그래핀 기반 테라헤르츠 소자가 제안되고 있으며, 향후 테라헤르츠 포토닉스의 다양한 응용 분야를 염두에 두고, 이 분야에 적합하게 설계된 능동, 수동 소자들이 개발될 전망이다.

테라헤르츠파의 다양한 응용

테라헤르츠파는 빛이 투과할 수 없는 많은 물질을 투과하며 마이크로파에 비해 분해능이 뛰어나기 때문에 분광, 이미징, 센싱 등의 응용 분야에서 매우 유용하게 사용이 가능하다. 테라헤르츠 분광이나 이미징을 위해서는 공간 상에 방출되는 테라헤르츠파의 경로에 시료를 두고, 그 투과 혹은 반사된 테라파의 진폭이나 위상 변화를 분석한다. 이를 통해, 물질의 굴절률, 두께, 전기전도도, 표면 저항 등의 물성치 추출은 물론, 외관에 드러나지 않는 불량 판독, 감추어진 금속제 무기검출 등의 용도로도 널리 사용되고 있다.

실시간으로 보다 높은 분해능과 감도를 얻기 위해, SBD 검출기를 어레이형태로 배열하거나, 다양한 전기 신호 분석 기법 등이 적용되기도 하며, 나노 스케일의 이미징을 얻기 위해 테라헤르츠 근접장 이미징에 대한 연구도 진행되고 있다. 이 밖에도 옥내 근거리 대용량 무선 통신이나 무선 전력 전송 등을 목표로 테라헤르츠 통신에 대한 연구 또한 관련 표준을 근거로 진행되고 있다.

이 외에도 테라헤르츠 기술은 나노, 정보, 생명, 환경, 우주, 군사 기술 등의 다양한 분야에서 그 응용 가능성이 속속 발견되고 있으며, 세계적인 기술 경쟁이 치열한 분야이기 때문에, 향후에도 더욱 많은 연구 개발에 대한 지속적이고 규모 있는 투자가 필요한 분야이다(그림 8). ^{⑤⑦}