

포토닉스 기반 테라헤르츠 기술

Terahertz Technologies Based on Photonic Devices

만물 지능 서비스를 준비하는 신기술 특집

김남제 (N.J. Kim)	THz포토닉스창의연구실 선임연구원
류한철 (H.C. Ryu)	THz포토닉스창의연구실 선임연구원
고현성 (H.S. Ko)	THz포토닉스창의연구실 책임연구원
한상필 (S.P. Han)	THz포토닉스창의연구실 책임연구원
박경현 (K.H. Park)	THz포토닉스창의연구실 실장

목 차

-
- I. 서론
 - II. 테라헤르츠파 발생용 포토닉스 기술
 - III. 광대역 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술
 - IV. 맺음말

2004년 MIT 10대 신기술, 2005년 일본 총무성 10대 기간 기술로 선정된 테라헤르츠 기술 개발에 집중적인 연구개발이 진행되고 있다. 물질의 투과, 낮은 광자에너지로 식품, 인체에 상대적으로 안전하여 인간에 필요한 테라헤르츠 영상이나 인간에 유해한 물질을 추출하기 위한 테라헤르츠 분광기술에 관한 많은 가능성들을 제시하여 왔다. 또한, 영상 및 분광 이외에도 유무선 경계가 희박해지고 있는 시점에서 유무선 통합 기능제공이 가능하고 정보전달, 센싱, 비파괴 검사 등 다양한 응용영역으로 기술수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 수요기술의 핵심은 언제, 어디서나, 실시간, 무고통으로 값싸게 활용하여 풍요롭고 안전한 삶을 유지하는 것으로 고령화 사회의 핵심 인프라 구축과 연동되어 가치를 공유하고 있다. 전자기파 대역에서의 초소형, 고효율, 실시간, 저가격 파인 및 검출기 기술 개발의 장점을 갖는 포토닉스 기반 테라헤르츠 기술 동향에 대해 기술하였다.

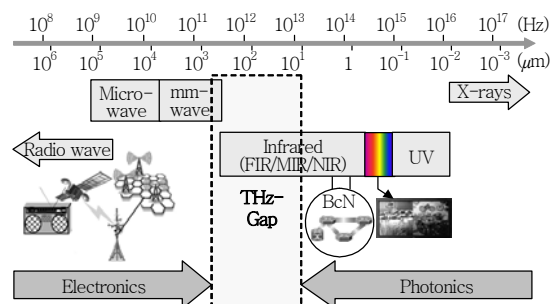
1. 서론

20세기 들어 우리들은 전자기파의 홍수 속에 살고 있다 하어도 지나치지 않을 것이다. 레이저의 개발과 전파공학의 발전으로 인류가 활용하고 있는 전자기파의 스펙트럼 활용 극대화 기술은 20세기를 시작으로 한세기 동안 인류가 발전시킨 주요 기술 개발 내용 중 상당한 부분을 차지하고 있다는 데에는 이론의 여지가 없을 것이다. 소수의 사회구성원들만이 정보를 공유한 정보 독점시대에서 개개인이 100Mbps 정보를 공유하는 정보 활용시대를 거쳐 모든 사회구성원들이 실시간으로 장소에 제한 받지 않고 정보를 공유하는 인간중심의 정보 공유시대가 도래될 것으로 예측된다[1]. 2008년 미국 아날로그 방송채널 경매 매각에서 볼 수 있듯이 기술의 발전이 사회수요 변화의 주요한 요인으로 자리 매김하고 있으며, 이를 통한 가치의 변화가 병행하여 진행됨을 지난 산업 발전의 경험을 통하여 쉽게 확인할 수 있다. 일부 예견된 사실이기도 하지만 최근의 스마트폰에 관한 열광적인 반응은 미래의 기술 발전 예측에 많은 도움을 준다. 소재, 소자, 부품, 시스템 순으로 구축된 현재의 가치 사슬에서 시스템 기능을 한 개의 융합형 플랫폼 기술이 제공 가능하여 미래 기술에 관한 가치사슬의 급격한 변화가 예상된다. 기술 패러다임의 급격한 변화로 미래 사회 인프라 구축의 핵심인 노령화 사회에 적극적으로 대응하고 중소형 기업 중심의 녹색기술 산업화가 미래 사회 경쟁력에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단하여 국가적 전략 아래 핵심 미래기술 개발에 집중적인 투자가 진행 중에 있다[2]. 비접촉, 초고속, 병렬성, 발광특성을 갖는 광 기술의 특성을 제공함은 물론이고 초소형, 고효율, 저가격에 관한 기술 수요를 충족시키기 위한 포토닉스 기술의 급격한 발전이 함께 이루어져 왔다. 매 5년마다 대역폭이 10배 정도

늘어난다는 벨슨의 법칙은 데이터 기반의 ICT의 급격한 발전을 잘 보여주고 있다. 현재의 기술 중에서 무어의 법칙보다 상회하는 발전속도를 갖는 유일한 기술로 레이저 개발 50주년을 넘긴 시점에서 볼 때 지난 50년간 이루어진 기술적 발전은 가히 경이로운 발전이다.

활용되고 있는 전자기파 스펙트럼을 (그림 1)에 보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 전자기파 스펙트럼 중 인간이 볼 수 있는 가시영역은 극히 제한된 영역이지만 디스플레이 등 산업적 파급효과가 매우 큰 영역이다. (그림 1)과 같이 일반적으로 파장이 짧은 영역에서는 주로 분해능을 극대화하여 인간이 보다 선명한 정보를 얻도록 하기 위해 산업들이 발전하여 왔다. 반면 긴 파장대역에서는 전자기파 스펙트럼의 대비 활용 극대화를 위한 무선통신산업 등이 발전을 하여 왔다. 전자기술 및 광자기술 각각이 스펙트럼 대역 확보를 위하여 치열히 경쟁하고 있으나, 아직까지 두 기술이 접점을 이루지 못하고 있다. 21세기 들어 두 기술 사이에 존재하는 테라헤르츠 영역의 가치에 대해 점차 많은 정보들이 발표되고 있으며 인간중심의 미래 핵심기술로 인정되면서 기술개발의 경쟁이 급격히 진행되고 있는 분야이다.

비금속 및 무극성 물질의 투과 특성을 활용한 테라헤르츠 영상기술과 대다수의 분자들의 운동 공진 주파수가 이 대역에 걸쳐 있어 인간에게 유해한 물질



(그림 1) 전자기파 스펙트럼에서의 테라헤르츠 기술 갭

을 테라헤르츠 분광으로 손쉽게 추출할 수 있는 테라헤르츠 분광기술 분야에서 급격한 응용영역 확대가 진행 중에 있다. 영상 및 분광 이외에도 유무선 경계가 희박해지고 있는 시점에서 유무선 통합 기능제공이 가능하고 정보전달, 센싱, 비파괴 검사 등 다양한 응용기술영역을 보유하고 있는 전자기파 대역에서의 기술 미개척지역인 테라헤르츠 갭을 채울 핵심기술 개발이 필수적이다.

전자기파 스펙트럼에서 주파수가 결정되면 일반적으로 파원, 검출기, 분배기, 증폭기 등으로 개발 범위가 확대된다. 테라헤르츠대역에서도 매우 다양한 파원 및 검출 기술에 대해 발표되었으나 급격한 활용을 유발시킬 수 있는 파급효과가 큰 핵심 기술은 아직 개발되지 못하고 있다.

각각의 단위기술 차원 즉, 고출력, 광대역 등 많은 기술적 난제들을 극복하였다고 생각할 수 있으나, 테라헤르츠 대역 중 3THz 이하 대역의 유용성으로 전 영역에서 언제라도 활용할 수준의 파원 및 검출기술은 미개발된 상태이다. 영상용에서는 높은 주파수가 높은 분해능을 제공하지만, 주파수가 증가할수록 출력의 급격한 감소와 스펙클 현상 등의 문제점이 있으며 무엇보다 현재의 가격, 크기 등은 적극적인 활용에는 가장 큰 걸림돌이다. 광대역 특성 제공은 포토닉스 기반으로만이 현재까지 펄스초 기반의 TDS 시스템을 활용한 많은 연구결과들이 발표되었다[3]. 펄스형 광대역 테라헤르츠파 시스템에 비해 실시간, 초소형, 저가격 측면에서 많은 장점이 있는 연속발전 광대역 테라헤르츠 기술 개발에 많은 관심이 있어 왔다. 본 동향분석지에서는 최근 개설된 ETRI 테라헤르츠 포토닉스 창의연구실의 주요 연구내용과 테라헤르츠 전 연구분야를 지면에 할애할 수 없어 저가격, 고효율, 초소형 기능 제공이 가능한 포토닉스 기반 테라헤르츠 기술에 관한 기술동향을 정리하고자 한다.

II. 테라헤르츠파 발생용 포토닉스 기술

1. 서론

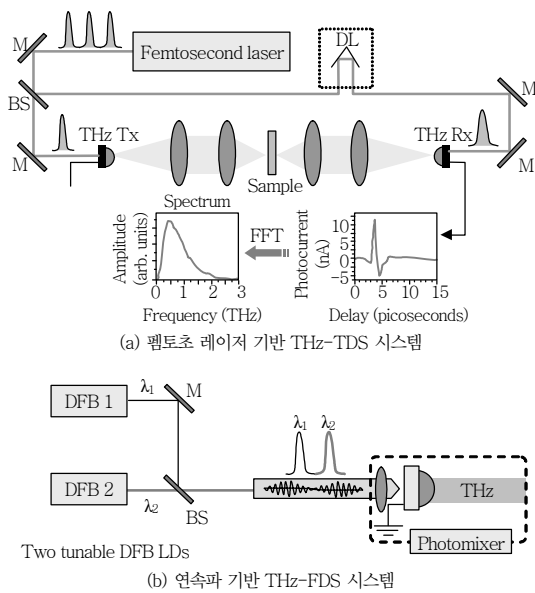
광대역 테라헤르츠파 발생법은 펄스초 펄스레이저나 매우 안정된 두 파장의 비팅 광원을 반응속도가 매우 빠른 반도체 물질에 조사시켜 물질내 생성된 전자들의 가속에 의해 테라헤르츠파가 발생된다. 최근 들어 IT 버블을 거치면서 고품위 광소자들이 개발되면서 이를 테라헤르츠 기술에 접목하고자 하는 연구들이 진행되고 있다. 본 장에서는 0.8 μ m 발진 파장을 갖는 펄스초 기반 펄스형 테라헤르츠 시스템의 단점들을 극복하기 위한 반도체 레이저 기반의 연속발전 주파수 가변형 테라헤르츠파 발생에 필수적인 포토닉스 소자에 대해 설명하고자 한다.

2. 광대역 비팅 광원

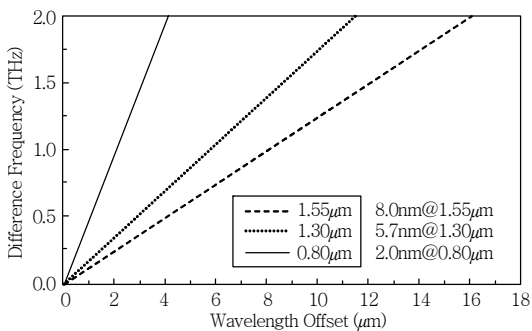
광대역 테라헤르츠파 발생의 핵심 소자는 초단펄스레이저, 비팅 광원, 광을 테라헤르츠파로 변환시키는 OE 변환기 등이 있다. (그림 2a) 및 (그림 2b)는 여기광원 및 변환기를 포함한 시스템으로 펄스초 광원이 OE 변환 물질에 주입되었을 때 물질의 광전도(photoconductive)의 급격한 변화로 펄스초 수준의 매우 짧은 시간 동안 폐회로가 구성되고 이때 AC 전류값이 테라헤르츠파 출력을 결정한다. 펄스초급 수준의 매우 짧은 시간에 방출된 테라헤르츠파를 검출하기 위해서는 (그림 2a)에서와 같이 THz-TDS 시스템은 펄스형으로 발생된 테라헤르츠파를 호모다인법으로 검출하여 비교적 쉽게 높은 SNR 특성을 제공함으로써 현재 광대역 테라헤르츠 파원으로 가장 많이 활용되고 있는 상용시스템이다. (그림 2b)와 같은 두 개의 서로 다른 파장을 갖는 레이저 광을 반응속도가 매우 빠른 PCS 물질에 주입하여 두 파장 차이

에 해당하는 주파수를 갖는 테라헤르츠파를 발생시켜 포토믹서라 하고 THz-FDS 시스템으로 구분할 수 있다.

이미 잘 알려진 THz-TDS 시스템과 달리 실시간 및 고분해능 테라헤르츠 분광 시스템으로 (그림 2b)와 같은 시스템들이 상용제품들이 선보이고 있지만 고가의 시스템 가격, 제한된 가변범위, 낮은 분해능 등의 단점들을 극복하기 위해서 많은 연구들이 진행되고 있다. 연속발전 주파수 가변형 테라헤르츠 분광시스템에서는 무엇보다도 여기광원을 무엇으로 결정할 것인가가 매우 중요한 사안이다. (그림 3)에



(그림 2) 광대역 테라헤르츠 시스템



(그림 3) 여기광원 파장에 따른 가변범위

서 볼 수 있듯이 0.8 μm 파장을 활용하였을 때 1THz 가변을 위해서는 비팅파장 간격을 2.0nm만 변화하여도 가능하나 1.5 μm 대역에서는 8nm 변화가 필요하다.

1.5 μm 대역 활용에 따른 넓은 파장가변 특성 확보가 선행되어야 하지만 파장 자체의 높은 변환효율, 이미 잘 개발된 포토닉스 소자를 손쉽게 활용할 수 있다는 점에서 기술적 어려움에도 불구하고 많은 관심들을 가져왔다. 광통신용으로 개발된 포토닉스 소자를 활용한 고효율, 저가격, 초소형 시스템 개발을 위하여 고효율 이중모드 레이저, 고효율 포토믹서 등 다양한 노력들이 진행되고 있다.

가. 반도체 광원

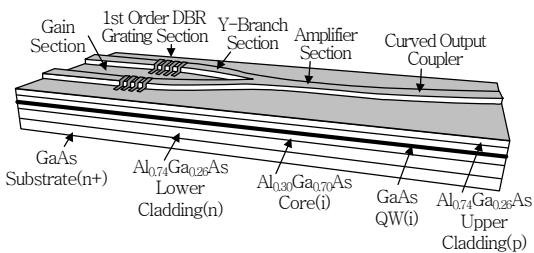
현재 상용화된 연속파 테라헤르츠 분광시스템의 경우 두 개의 독립된 DFB 레이저를 사용한다[4]. 서로 다른 파장에서 동작하는 두 개의 DFB 레이저의 출력을 광섬유를 이용하거나 혹은 자유공간상에서 정렬하여 이를 테라헤르츠파 발생에 이용하는 것이다. 비팅 광원의 광출력 이외에도 모듈온도, 전기적 특성, 편광, 역학적 진동 등 외부요인들에 의해 발생하는 테라헤르츠파의 특성에 직접적인 영향을 미친다. 독립된 광원에서의 외부 환경변화가 단일 공진기 및 집적형 광원에서는 외부 환경 변화에 대한 노이즈를 근본적으로 제거하는 common-mode noise rejection 효과를 활용하여 매우 안정된 테라헤르츠파 발생이 가능하다[5]. Common-mode noise rejection 효과를 극대화하기 위해서는 반도체 상에 두 개의 독립된 파장을 동시에 발진시킬 수 있도록 한 개의 소자로 집적화하거나, 단일 공진기상에 회절격자를 삽입함으로써 이중모드가 발진시키는 방법 등이 발표되었다[6],[7].

대칭형 브래그 회절격자의 +1 및 -1 두 개의 횡

모드를 발진하는 DFB 레이저 구조 등을 비팅 광원으로 활용함에 따라 모드 간격이 고정형으로 단일주파수 발생에만 활용이 가능하여 테라헤르츠 분광에 필수적인 주파수 튜닝 특성을 제공할 수 없다.

광대역의 주파수 튜닝 특성을 제공하기 위해서는 비팅 광원은 두 모드간 발진 파장의 세기가 같아야 하고, 각각의 모드 혹은 하나의 모드를 연속적으로 튜닝 할 수 있어야 한다. 물론 매우 짧은 시간 내에 전 범위 튜닝이 가능하여야 하고 주파수를 동시에 모니터링 할 수 있어야 한다. 두 대의 독립된 비팅 광원을 활용하여 상용화된 시스템의 경우 일반적으로 최소 분해능이 1GHz(0.008nm@1.5 μ m) 수준이고 외부에 파장간격 모니터링 시스템을 갖추고 있지만 고분해능 상태에서 고속 특성을 보여주지 못하고 있다.

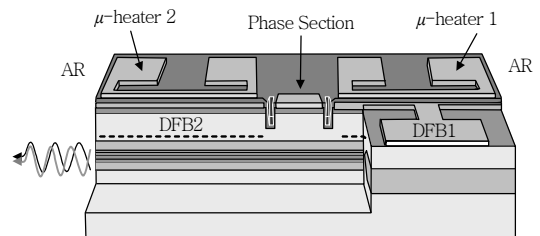
활성층으로 구성된 이득 영역과 수동도파로 영역 상에 집적된 회절격자로 구성된 DBR 레이저가 매우 넓은 발진 파장 가변이 가능하여 광대역 테라헤르츠 파 발생용 비팅 광원으로 활용하고자 많은 노력들을 하여 왔다[8]. DBR 레이저의 경우 위상 조절 영역 등을 포함하여 연속적인 파장 튜닝이 가능하지만, 파장 가변의 원리상 연속적이면서 동시에 빠른 파장 튜닝이 어려운 단점이 있다. (그림 4)와 같은 두 개의 DBR 레이저를 한 개의 기판에 집적화하여 고출력으로 850nm 대역에서 약 4THz까지 튜닝이 가능함을 보였으나 연속적인 튜닝의 결과를 보고하지는 못하였다[9].



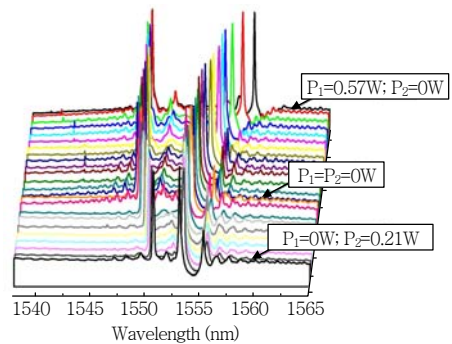
(그림 4) 두 대의 DBR 레이저가 집적된 파장 가변형 두 파장 반도체 레이저

반면에 대부분의 상용시스템에서 채택하고 있는 DFB 레이저를 이용하는 경우에 동작온도 조절로 발진파장 가변이 가능하지만, DBR 레이저와 같이 넓은 범위에서의 튜닝은 어려운 문제가 있다. 최근에 (그림 4)와 같은 두 개의 서로 다른 파장에서 동작하는 DFB 레이저상에 마이크로히터(μ -heater)를 이용하여 적절한 위상조절을 통하여 안정적인 이중모드 레이저를 개발, 0.3~1.1THz 이상까지 연속적으로 파장 조절을 한 결과가 보고되었다[10],[11].

(그림 5)와 같은 DML의 각 DFB 영역상에 집적화된 마이크로히터를 조절함으로써 매우 안정적인 모드 간격 가변이 가능하다. (그림 6)에서 볼 수 있듯이 1.1THz 최대 가변 범위를 보여주고 있고, 이의 개선이 필요하지만 매우 안정적인 모드 특성 및 마이크로히터 구동에 따라 매우 빠른 가변 특성 제공이 가능하여 테라헤르츠 분광 시스템용 비팅 광원으로서의 활용가능성에 주목을 받고 있다[11].



(그림 5) DFB 레이저와 마이크로히터를 한 개의 공진기상에 집적화한 이중 모드 반도체 레이저

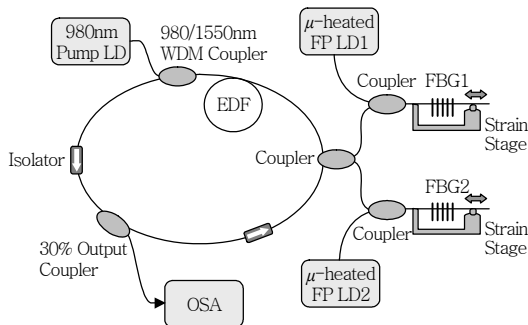


(그림 6) DML 레이저의 마이크로히터 조건에 따른 이중 모드 반도체 레이저의 튜닝 특성

나. 이중 파장 발진 광섬유레이저

1.55 μm 대역에서 구동되는 이중 파장 발진 광섬유레이저를 광대역 테라헤르츠파 발생에 활용하고자 하는 시도가 있다. 광섬유 레이저를 활용하는 경우 소형의 시스템을 비교적 값싸게 쉽게 제작할 수 있지만 반도체 이중모드 레이저 경우와 달리 수 미터에 달하는 긴 공진기로 인하여 종모드간 간격이 좁아 안정적인 종모드만 선택하여 발진시키기에는 많은 어려움이 있다. 최근 들어 이의 해결을 위하여 Faraday rotator와 polarizer, 포화흡수체(saturable absorber), 링 형태의 공진기 구조, FBG, Mach-Zehnder 혹은 Fabry-Perot 필터 등을 이용하는 경우가 보고되었다. 광섬유 레이저의 활성물질로 활용되고 있는 EDF의 homogenous gain broadening으로 이득 영역 내에서 두 모드 및 파장간 이득 경쟁을 제어할 수 없어 안정적인 두 파장 및 이중 모드 레이저를 개발할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 이득 영역 이외에 모드간 경쟁을 제거할 수 있는 반도체 기반 광소자(SOA 혹은 FP 레이저)들로 이중 공진기를 구성한(그림 7)과 같은 이중파장 광섬유레이저가 개발되었다. EDF를 이득 영역으로 사용하고 두 개의 마이크로히터 집적형 FP 레이저 및 FBG를 사용하여 연속적으로 변화시켜 0.3THz에서 1.1THz까지 연속적인 파장 가변이 가능함을 보였다[12].

또한, 최근에는 반도체 광증폭기를 이득물질로 하



(그림 7) 주파수 가변형 이중 파장 광섬유 레이저

여 1.05 μm 중심 파장을 발진하는 이중 파장 레이저와 광대역 테라헤르츠파용으로 널리 활용되고 있는 유기단결정인 DAST로 0.5THz에서 2THz까지 연속 파 테라헤르츠파를 볼로미터로 측정된 결과가 보고되었다[13].

3. 테라헤르츠 광전변환기

가. 광전도스위치

PCS는 광전도체(photoconductor)를 이용하는 전기 스위치이다. PCS에 빛이 입사될 경우 PCS의 저항이 낮아져 전류가 흐르는 현상을 이용하여 PCS를 빛으로 제어하는 스위치로 이용할 수 있다. PCS는 주로 광전도 샘플링(photoconductive sampling), 테라헤르츠파 발생, 마이크로 웨이브, 밀리미터 웨이브 발생, 광섬유 통신에 사용되는 고속 광 검출기, 초고속 아날로그 디지털 컨버터에 사용된다. 바이어스 전압이 걸려 있는 PCS에 지속 시간이 짧은 초단파 광펄스가 입사될 경우 PCS 내부에서 광펄스 지속시간 동안 전류가 흐른다. 광펄스에 의해 발생하는 반송자는 바이어스 전압에 의해 가속되어 PCS에 흐르는 전류값이 커지며 PCS에 흐르는 전류의 미분값에 비례하는 전자기파가 PCS 외부로 방출된다. PCS를 이용하여 발생하는 전자기파의 스펙트럼은 단일 주파수 스펙트럼이 아닌 넓은 주파수 대역의 스펙트럼이다. 펄스폭 지속시간이 수십~수백 fs 정도이고 PCS에 사용되는 광전도체의 수명시간이 ps 이하이면 테라헤르츠파 대역의 출력을 얻을 수 있다. 테라헤르츠파를 효율적으로 방출하기 위하여 PCS에 안테나가 집적되어 있으며 bowtie형, log-spiral, square spiral형 안테나가 많이 사용된다[14]. (그림 8)은 상용으로 판매되고 있는 PCS 모듈 사진이다.

1984년에 처음 PCS를 이용하여 테라헤르츠파를



(그림 8) BATOP사 THz PCS 모듈 사진

발생시키는 실험이 성공하였으며 1990년대 저온 성장 GaAs가 개발됨에 따라 PCS의 성능이 개선되었다. PCS의 성능을 결정하는 주요 변수는 광전도 물질의 수명시간이다. 테라헤르츠파 출력을 얻기 위하여 저온 성장하여 반송자의 수명시간을 ps 이하로 낮춘 GaAs가 PCS 제작에 많이 이용되어 왔다. 최근 1.55 μm 대역 광통신용 광소자로 개발된 광부품을 테라헤르츠 기술에 직접적으로 활용하기 위해 장파장 대역 흡수가 가능한 저온성장 및 이온주입 InGaAs, InGaAs/InAlAs PCS가 많이 개발되고 있으며 테라헤르츠 방출 효율향상을 위해 안테나 디자인 등이 개선되고 있다.

나. 포토믹서

포토믹싱(photomixing)은 고속 광전도(photoconductive) 소자에 편광이 동일하고 주파수가 다른 두 레이저를 가하여 두 레이저의 주파수 차이에 해당하는 전자파를 발생시키는 기법이다. 이때 포토믹싱에 사용되는 고속 광전도 소자를 포토믹서(photomixer)라고 한다. 포토믹서에 편광이 동일하고, 주파수가 다른 두 개의 레이저에서 방출되는 빛이 입사될 경우 포토믹서 내부에 두 레이저의 주파수 차이에 해당하는 전류가 흐르고 이 전류는 포토믹서에 장착된 안테나를 통하여 전자기파로 외부에 방사된다[10].

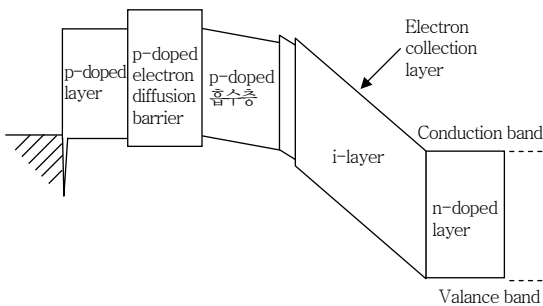
$$P_{\text{mix}}(\omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right) \left(\frac{e\eta A}{h\nu} \right)^2 \left(\frac{4mPP_2}{A_p} \right) \left(\frac{L_e}{W_g} \right)^2 \frac{(\mu\tau)^2 R_A V_B^2}{(1+(\omega\tau)^2)(1+(\omega R_A C)^2)}$$

포토믹서법으로 발생된 테라헤르츠 출력은 식에서 볼 수 있듯이 매우 다양한 변수들의 영향을 받는다. P_1, P_2 는 각기 입사되는 광 파워이고 일반적으로는 광 파워가 높은 것이 좋으나 바이어스 전압(V_B)과 연동되기 때문에 광 출력을 낮추고 높은 전압 구동을 선호하기도 한다. m 은 입사광의 포토믹서상에서의 겹침 비율로 집적형이나 DML의 경우 1인 특별한 경우이다. 무엇보다도 광대역 특성은 포토믹서를 이루고 있는 PCS 물질의 반송자 수명시간(τ) 및 집적된 안테나 특성에 직접적으로 영향을 받는다. 이외에도 포토믹서 기반 광대역 테라헤르츠파 발생기 설계시 소자의 크기, 안테나 종류, 비팅 광원 파장, 출력, 가변 범위 등 매우 다양한 변수들을 고려하여야 원하는 수준의 광대역 테라헤르츠파 발생기를 개발할 수 있다. 앞서 언급하였지만 장파장용 포토믹서 활용에 대한 관심이 집중되고 있지만 기술적 어려움이 있다. 저온성장 GaAs에서는 성장시 온도를 낮추면 Ga 위치에 As를 차지하는 $(\text{As})_{\text{Ga}}$ 결함들이 반송자 수명시간을 급격히 낮출 수 있음이 보고되었다. 저온성장 InGaAs 경우는 GaAs와 비교할 때 매우 복잡한 양상을 띠고 있고 구체적인 정황은 어려우나 $(\text{As})_{\text{Ga}}$ 및 Be 도핑에 관한 체계적인 연구들이 진행된 바 있다[15]. 또한, 저온성장 GaAs는 기본적으로 semi-insulate이나 저온성장 InGaAs는 과도한 양의 Be를 도핑할 경우를 제외하고 일반적으로 n-형 반도체에 가깝다. 반송자의 농도는 포토믹서에 전압을 인가하였을 때 암전류에 기인하고 이는 포토믹서 성능 저하에 기인하기 때문에 반송자 수명시간 단축과 함께 고려되는 주요 변수이다.

다. UTC-PD

광통신용 소자에서 고속 광검출기로 개발된 일방향 주행 반송자 광검출기(UTC-PD)는 말 그대로 하

나의 반송자가 한 방향으로만 진행되는 동작방식을 가지고 있어 고속동작이 가능하여 연속발전 테라헤르츠파 발생용 포토믹서로 활용하고자 한다[16]. 일반 광검출기(photodetector)에서는, 빛이 입사되면 낮은 도핑을 갖는 흡수층에서 한 쌍(pair)의 전자-홀이 발생하여, 전자는 n-전극으로, 홀은 p-전극으로 이동(주행)하여 광검출기 외부에 광전류를 공급시킨다. 이러한 과정을 광전변환이라 한다. UTC-PD는 일반적인 p-i-n 다이오드 기반의 광검출기와 거의 유사한 구조를 가지나, 흡수층에 p-도핑이 되어 있는 점이 일반적인 광검출기와 다르다. UTC-PD의 동작 원리를 보기 위해, (그림 9)에 보여진 UTC-PD의 에너지 밴드 다이어그램을 참조해 보기로 한다.



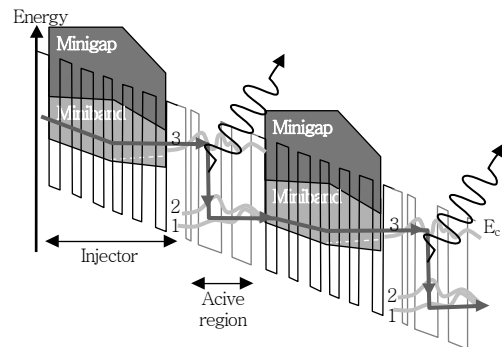
(그림 9) UTC-PD의 에너지 밴드 다이어그램

UTC-PD는 일반적인 p-i-n 도핑구조를 갖는다. 다만 흡수층에 graded p-도핑이 되어 있다. 일반 광검출기와 달리, 흡수층에 적절한 p-도핑을 하여, 홀은 주행이 아닌 유전체 완화시간(dielectric relaxation time)의 스케일로 p-전극에 반영되도록 한다. 이 유전체 완화시간은 적절한 흡수층의 p-도핑으로 0.1psec 이하로 줄일 수 있다. 일반적으로 흡수층으로 쓰이는 InGaAs 물질에서는 전자의 이동속도가 홀의 이동속도에 비해 10배 정도 빠르다. 따라서, 홀의 느린 주행속도에 의해 동작속도가 제한 받지 않아, 고속의 특성을 갖게 해준다. 다만 전자는 주행하므로 일반적인 광검출기에서처럼 전자의 주행에 의해 제한

되는 점은 있다. 이때, 전자만이 주행하므로 uni-travelling carrier PD라 불린다. 또한, (그림 9)에서 보듯이 흡수층보다 큰 밴드갭을 갖는 물질로 전자확산 방지층(electron diffusion barrier)을 갖추어야 한다. UTC-PD도 전자 transport에 의한 속도제한도 물론 있고, RC 효과에 의해 대역폭이 제한되기도 한다. RC 효과에 의해 제한되는 점은 travelling wave electrical waveguide 구조에 의해 극복될 수 있다. 홀의 주행에 의해 동작속도가 제한되는 것이 없는 특징 외에 UTC-PD의 또 하나의 특징은, 높은 광입력에서도 동작할 수 있다는 것이다. 일반적인 p-i-n PD는 약 1mW 이상의 광파워가 입력되면, 이런 문제가 발생하게 된다. UTC-PD는 이의 10배 정도에서도 속도 저하 없이 동작한다. 이러한 UTC-PD의 두 가지 특성은 테라헤르츠파 발생을 위한 포토믹서에 적합한 특성이다. 특히, 두 개의 레이저 광원에 의해 테라헤르츠를 발생시키고자 할 때, UTC-PD는 포토믹서에 적합한 특성을 갖고 있다.

4. 양자 폭포레이저

QCL은 중적외선 광원부터 테라헤르츠 파원에서 대역폭 확장이 급격히 진행되고 있다. 일반적인 레이저와 달리 (그림 10)에서 볼 수 있듯이 QCL의 액티브 영역은 계단형 포텐셜웰로 이루어져 있으며 전하



(그림 10) QCL 동작원리

가 각 포텐셜웰을 지날 때마다 빛을 방출하게 된다. QCL은 출력 파장을 액티브영역의 구조를 바꾸어 특정 화학물 검출에 필요한 파장으로 조정할 수 있으므로 QCL은 환경 감시, 유독 화학물 검출, 폭발물 검출, 호흡 검사에 사용된다. 1994년도 처음 시연된 QCL 출력 파장은 $4\mu\text{m}$ (75THz)였으며 주로 3~ $24\mu\text{m}$ 대역의 QCL 중적외선 광원으로 개발되어 왔다[17].

중적외선 영역의 QCL에 비해 테라헤르츠 영역 QCL은 최근 들어 개발이 진행되고 있으며 2001년도에 처음으로 출력 파장 $67\mu\text{m}$ (4.7THz)인 QCL이 시연되었다. 이후 테라헤르츠 QCL이 여러 연구 그룹에서 연구되고 있으나 최대 동작온도는 169K가 한계이고, 펄스구동에서도 최대 출력파워는 250mW가 한계였다. 최근 도파로 영역과 활성층 영역이 최적화된 테라헤르츠 대역 QCL이 개발되고 있으나 아직 상온 동작이 불가능하고 극저온에서만 동작이 가능한데 이는 상온(300K)에서 레이저 동작에 필요한 밀도반전 상태를 구현하기 힘들기 때문으로 알려져 있다. 현재 이러한 문제점을 해결하기 위하여 하나의 QCL을 파장이 비슷한 2개의 모드로 구동하여 QCL의 액티브 영역에서 비선형 효과에 의하여 두 모드의 주파수 차이에 해당하는 새로운 모드를 발생시키는 테라헤르츠 QCL이 개발되고 있다. 또한 QCL 출력광의 발산각이 큰 문제를 해결하기 위해 실리콘렌즈를 부착하여 출력광을 집속하는 연구가 진행되고 있다. 이 경우 결합 효율은 50% 이상인 것으로 알려져 있다. 테라헤르츠 파 출력을 높이기 위하여, 방출면의 면적을 넓히기 위하여 수직방출형 QCL의 연구도 진행되고 있다.

III. 광대역 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술

1. 서론

광전도 스위치 및 안테나가 집적된 포토믹서는 테

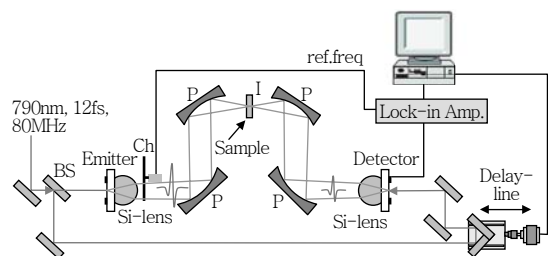
라헤르츠 발생 및 검출에 모두 사용될 수 있다. 광전도 안테나는 상온에서 사용되는 테라헤르츠파 검출 기술 중에서 신호대 잡음비 특성이 가장 좋아서 테라헤르츠 펄스파 및 연속파 검출에 보편적으로 많이 사용되고 있다. 본 장에서는 펄스형, 연속발진 광대역 테라헤르츠파 발생 및 호모다인 검출법(homodyne detection)을 소개하고자 한다.

2. 펄스형 광대역 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술

충분히 높은 에너지를 가지고 있는 펨토초 레이저 펄스가 반도체의 바이어스된 갭을 자극하면 자유 반송자는 바이어스 필드에 의해 가속되고 광전류가 발생하게 된다. 빠른 편파의 변화로 한 사이클의 서브 ps급 코히어런트 전기 펄스가 만들어지고, 이는 연결되어 있는 안테나에 의해 자유공간으로 전자기파 형태로 방사하게 된다.

THz-TDS는 0.1~5THz 주파수 대역에 대한 정보를 얻기 위해서 레이저 코히어런트 펄스를 이용하여 전자기파를 발생시킨다. 방사된 전자기 펄스파는 서브 ps의 펄스 폭과 10~100V/m 수준의 필드 세기를 가진다. (그림 11)은 호모다인 검출 방식을 이용한 일반적인 THz-TDS 시스템을 보여주고 있다. 펨토초 레이저에 의해 펌핑되는 테라헤르츠 발생기(emitter)와 이와 동시에 펨토초 레이저에 의해 게이팅되는 테라헤르츠 검출기(detector)로 구성되어 있다[18].

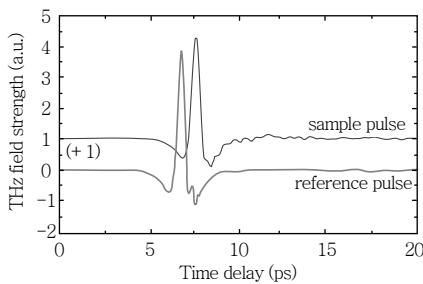
펨토초 레이저에서 방출된 광 펄스는 테라헤르츠



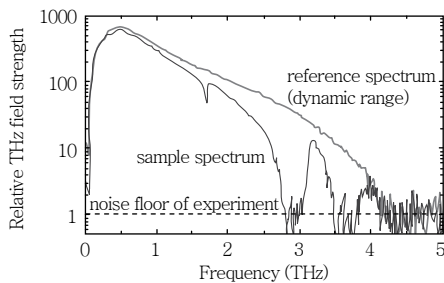
(그림 11) 일반적인 THz-TDS 시스템

발생기에서 한 사이클의 전기적인 펄스로 전환된다. 지속시간이 1ps 미만인 전기적인 펄스는 수 테라헤르츠의 주파수 스펙트럼에 해당된다. 이 테라헤르츠 펄스는 파라볼릭 미러(parabolic mirror)를 거쳐 시료를 통과하고 테라헤르츠 검출기에 도착한다. 이때 테라헤르츠 검출기는 전계에 비례하는 전류신호를 검출하고 위상을 측정한다. 이를 이용하여 흡수계수와 굴절률 값을 구한다.

(그림 12)는 투과방식의 측정 셋업(그림 11 참조)에서 얻은 THz-TDS 측정결과와 일례를 보여주고 있다[19]. 이때, 측정하고자 하는 측정시료는 PE(poly-ethylene)에 순수 DNA 기반의 cytosine이 포함되어 있는 시료이다. (그림 12a)는 기준시료(건조한 공기)와 측정시료에 대해서 각각 얻어진 시간영역 테라헤르츠 신호이며, 측정시료에서 발생하는 다중반사로 인한 에코(echo) 중에 첫 번째 에코 시작지점에서 데이터 처리한 그래프이다. 이들 데이터에 대한 FFT 변환을 통하여 (그림 12b)와 같은 주파수 스펙트럼을 얻는다.



(a) 시간영역 THz 신호



(b) 주파수 스펙트럼

(그림 12) 시료에 대한 THz-TDS 측정결과

펙트럼을 얻는다. 다이내믹 레인지(dynamic range)는 FFT 주파수 스펙트럼에서 잡음 수준(noise floor) 바로 위까지 존재하는 신호로 정의된다.

3. 연속파 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술

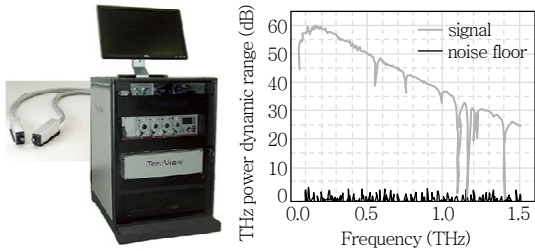
연속파 발생은 앞에서 언급한 바와 같이 비팅 광원과 포토믹서를 이용 발생시킨다. 포토믹서에 발생된 테라헤르츠파는 두 파장 광원간 비팅 신호의 특성과 포토믹서의 포토컨덕티브 스위치 부, 그리고 집적된 안테나의 특성에 의하여 결정된다. 발생하는 테라헤르츠파의 주파수는 기본적으로 두 개의 레이저 빔의 주파수 차이에 의하여 결정되며, 발생하는 테라헤르츠파의 선폭 및 안정도 역시 비팅 신호의 안정도에 의하여 결정된다. 그러므로 비팅 신호 생성을 위해 사용되는 레이저는 안정도가 높아야 한다.

광전도체 부는 짧은 운반자 수명과 높은 운반자 이동도를 가져야 하고, 비팅 신호가 없는 경우 높은 저항을 가져야 한다. 이는 비팅 신호에 의해 만들어진 교류의 광전류가 비팅 신호의 주파수에 잘 맞으면서, 같은 광입력 세기에서 큰 광전류를 생성하며, 동시에 포토믹서의 특성 저하에 큰 원인이 되는 직류 성분이 최소화 되어야 하기 때문이다. 그러므로, 광대역 응용을 위해서는 광전도체의 운반자 수명이 짧아야 하고, 안테나 임피던스(impedance) 역시 광대역의 특성을 가져야 한다.

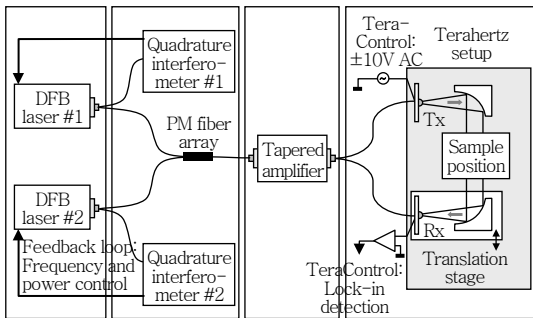
현재 상업용으로 구매 가능한 테라헤르츠 연속파 시스템을 보면 대부분 두 개의 독립된 레이저의 출력을 비팅 광원으로 이용하고 있다.

(그림 13)은 TeraView사의 테라헤르츠 연속파 시스템으로 두 개의 GaAs 기반 포토믹서를 사용하여 테라헤르츠 연속파 시스템을 구현하였다. 50GHz에서 1.5THz까지 100MHz 분해능으로 스캔이 가능하

다. 하지만, 전체 시스템의 크기가 크고, 스캔 시간이 8분 이상이 소요되는 단점이 있다[20]. (그림 14)는 2011년에 Topptica사에서 발표한 테라헤르츠 시스템의 사진이다. (그림 14)의 사진을 보면 매우 작은 시스템을 구현한 것처럼 보이지만, 이는 주파수 안정도를 위한 파장제어 부분과 증폭을 위한 증폭기 부분을 제외하고, DFB 레이저 모듈만을 보여주고 있는 사진이다. 그러므로 전체 시스템은 아직까지 그 크기가 크다는 것을 알 수 있다. Topptica사의 경우도 800nm 대역의 GaAs 기반 포토믹서를 사용하는 경우 1.8THz까지의 테라헤르츠 연속파와 스캔 범위를 보여주고 있지만, 1.55 μ m 대역 제품의 경우 1.2THz까지 스캔 영역을 보여주고 있다.



(그림 13) TeraView사의 CW THz 시스템

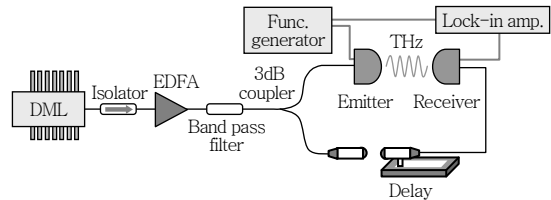


(그림 14) Topptica사의 CW THz 시스템

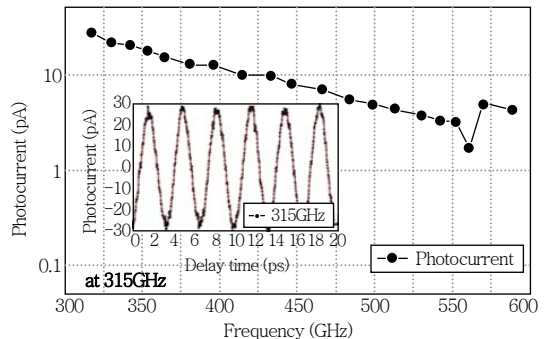
(그림 15)는 포토믹싱을 이용한 일반적인 1.55 μ m 대역의 테라헤르츠 연속파 발생/검출 시스템이다. 한 개의 칩에서 이중모드가 구현되고 집적된 마이크로 히터를 이용 연속적으로 광대역 튜닝이 되어 매우 안정된 시스템 구현이 가능한 장점이 있다. 물론 광섬유 기반으로 패키징되어 있어 광섬유 기반 광소자들과 쉽게 시스템을 구성할 수 있다는 점은 또 다른 장점이기도 하다.

앞에서 언급한 반도체 레이저 기반 비탕 소스와 InP 기반의 포토믹서를 이용한다면, 초소형이면서 현재 판매되고 있는 시스템과 비교하여 특성이 우수한 초소형 포터블 테라헤르츠 분광시스템 개발이 가능하여 현장 적용형 테라헤르츠 계측기 분야 개척이 가능한 기술로 많은 주목을 받고 있다[10].

(그림 16)은 이중 모드 반도체 레이저와 저온 성장 InGaAs 포토믹서를 이용하여 테라헤르츠 발생에 성공하여 호모다인 시스템을(homodyne system) 구



(그림 15) DML과 InP 기반 포토믹서를 이용한 광섬유 기반 CW THz 시스템의 구성도



(그림 16) 이중 모드 반도체 레이저와 InP 기반 포토믹서를 이용한 주파수 가변 테라헤르츠 연속파 출력

현하여 발생/측정한 결과이다. InP 기반 포토믹서의 대역폭이 추가로 확보되고, 효율이 높아진다면 더 좋은 결과가 보고될 것으로 예측된다.

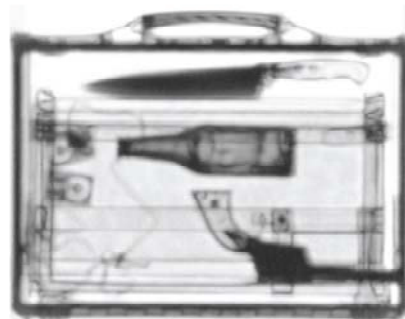
4. 테라헤르츠 영상시스템

테라헤르츠파는 높은 공간분해능을 가지면서 종이, 플라스틱 등과 같은 여러 물질에 상대적으로 투명하고, 낮은 에너지를 가져서 수화물, 식품 및 인체에 안전하게 사용할 수 있다는 많은 장점을 가지고 있기 때문에 영상용으로 개발되어 응용되고 있다. 테라헤르츠 이미징 시스템은 1995년도에 THz-TDS 시스템을 사용하여 개발되어 처음으로 테라헤르츠 이미지를 획득하였다. 테라헤르츠파가 렌즈나 파라볼릭 미러에 의해서 한 개의 초점에 집속된다. 이미징용 샘플을 테라헤르츠파가 집속된 초점에 위치시키고 테라헤르츠파의 수평면에서 2차원으로 샘플을 스캔하면서 테라헤르츠파의 샘플을 통한 투과파나 반사파를 측정하여 테라헤르츠파 영상을 획득한다.

2001년에는 THz-TDS 시스템보다 저가이고, 소형의 테라헤르츠 연속파 시스템을 이용하여 테라헤르츠파 영상을 획득할 수 있었다[21]. 그 이후로 테라헤르츠 근접장 영상, 테라헤르츠 단층촬영(tomography), 테라헤르츠 편광 영상, 테라헤르츠 간섭측정 영상 등 많은 형태의 테라헤르츠 영상 시스템이 개발되었다[22]. 펄스파를 이용한 영상 시스템은 넓은 주파수 대역의 많은 정보를 가지고 있지만, 픽셀당 광지연기 동작 시간이 필요하므로 전체 시료에 대한 측정 시간이 오래 소요되는 단점을 가지고 있다. 이러한 측정 속도의 한계성을 극복하기 위하여 전광 샘플링과 CCD 카메라를 이용한 이미징 시스템, 고출력 테라헤르츠파 소스와 마이크로 볼로미터를 이용한 이미징 시스템 등이 개발되고 있으나, 여전히 비용

이나 감도의 문제로 인하여 실제 사용에는 많은 어려움이 있다. 문제가 되고 있는 실시간 테라헤르츠파 영상을 구현하기 위한 가장 좋은 방법은 N개의 배열을 사용하여 동시에 N개의 픽셀 정보를 획득하는 것이다. 그러나 이러한 경우 급격한 비용 증가가 발생하여 상용화에 문제가 된다[23].

테라헤르츠파 영상 시스템은 의료 진단, 보안, 비파괴 검사, 웨이퍼 검사, 식물 생리 영상, 식품 안전성 평가 등에 적용 개발되었다. 테라헤르츠파는 에너지가 매우 작아 인체에 무해하고 여러 분광학적 정보를 가지고 있어 의료용 영상 시스템으로 응용이 적합하다. 특히, 수분에 대한 강한 흡수 특성을 보이는 테라헤르츠파는 수분 함유량에 있어서 정상 세포와 확연한 차이를 보이는 암세포를 진단하는 데 매우 용이하게 사용될 수 있다. 또한, 테라헤르츠파는 기존의 엑스레이에서 검출이 불가능했던 플라스틱이나 세라믹 무기, 그리고 옷이나 신발 등에 숨겨진 무기 및 폭발물 검출을 가능하게 한다. (그림 17)에 서류 가방의 테라헤르츠파 투과 영상을 나타내었다. 테라헤르츠파 투과 영상으로 서류가방 속의 칼, 병, 총을 선명하게 확인할 수 있다[24]. 테라헤르츠파 영상 시스템은 제약 업계에서도 유용하게 활용되고 있다. 테라헤르츠파를 이용하면 알약의 내부 구조 및 외부 코팅층 검사를 비파괴로 가능하게 할 수 있다. 테라헤르츠파



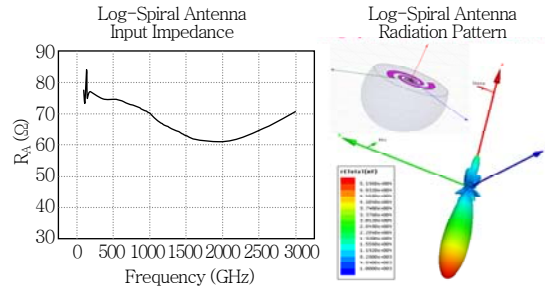
(그림 17) 칼, 병, 총이 들어있는 서류가방의 테라헤르츠파 투과 영상

의 분해능과 인체에 안전한 특성은 식품의 안전성 및 과실의 신선도 측정에도 응용되고 있다. 이와 같이 테라헤르츠파 영상 시스템은 다양한 분야에서 많은 응용 시스템으로 활용될 수 있으나, 테라헤르츠파 영상 시스템을 실용화하기 위해서는 영상 획득 속도와 가격을 낮추고, 크기를 줄이는 것이 매우 중요하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 저가의 소형 테라헤르츠 연속파 소자를 2-D로 배열하여 2-D 테라헤르츠 연속파 영상 시스템을 개발하면 영상 획득 시에 광지연기의 동작 시간이 필요하지 않으면서 2-D의 여러 픽셀을 동시에 얻을 수 있으므로 소형의 실시간 테라헤르츠파 영상 시스템을 적절한 가격으로 구현이 가능할 것으로 기대된다.

5. 수동소자 기술

◎ 안테나 기술

테라헤르츠 대역에서 사용하는 안테나는 크게 광대역 안테나와 공진형 협대역 안테나로 나눌 수 있다. 광대역 안테나는 넓은 주파수 대역에서 일정한 안테나 입력 임피던스를 가지므로 넓은 주파수 대역에서 가변성이 중요시 되는 테라헤르츠파 응용시스템에 사용된다. 대표적인 광대역 안테나는 스파이럴, 로그 주기형, 보우타이 안테나를 들 수 있다. 안테나에서 생성된 광전류가 광전도 기판을 지나서 자유 공간으로 방사할 때, 방사 효율 및 방사 패턴을 조절하기 위하여 Si 렌즈를 기판 뒤에 부착한다. (그림 18)에 실리콘 렌즈 위에 위치한 로그 스파이럴 안테나의 입력 임피던스와 방사패턴의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 주파수 전 대역(100~3000THz)에서 안테나는 60~80Ω 범위의 입력 임피던스를 가지므로 광전도체 위에 형성된 로그 스파이럴 안테나가 매우 넓은 광대역 특성을 보임을 확인할 수 있다. 또한,

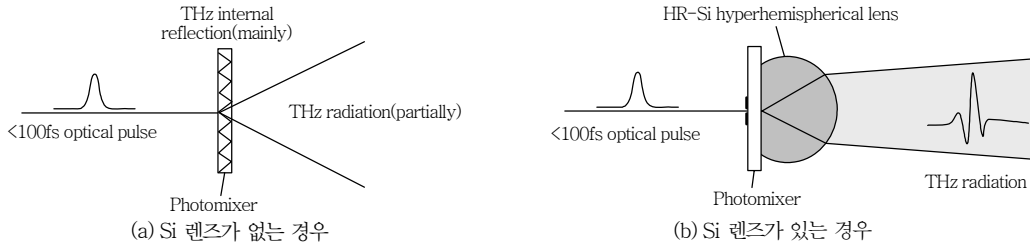


(그림 18) 로그 스파이럴 안테나의 입력 임피던스와 방사 패턴

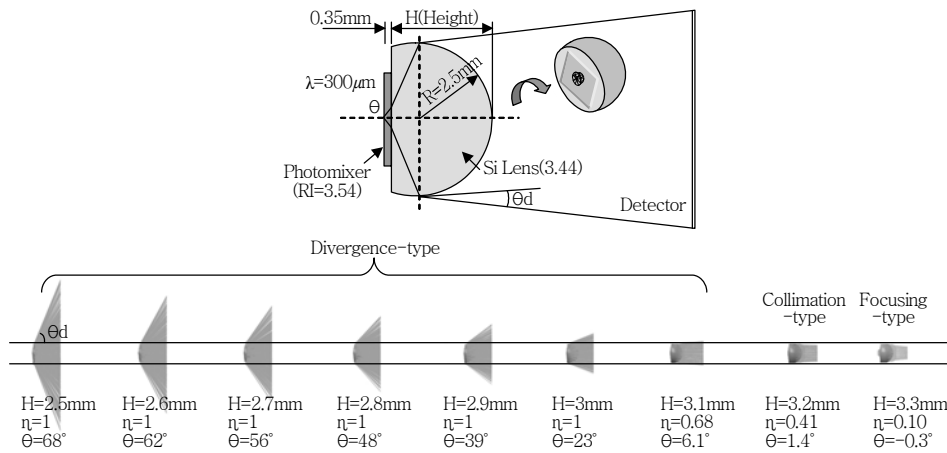
안테나에서 생성된 테라헤르츠파가 광전도 기판과 부착된 Si 렌즈를 통과하면서 높은 지향성을 가짐을 확인할 수 있다.

광대역 안테나와 달리 협대역 공진형 안테나는 특정 주파수 대역에서 안테나의 입력 임피던스를 조절할 수 있어 좁은 주파수 대역에서 높은 출력을 가지는 테라헤르츠 포토믹싱 소자에 응용될 수 있다. 테라헤르츠 포토믹싱에 사용되는 일반적인 포토믹서의 출력 임피던스는 10~100kΩ으로 매우 높은 반면에, 테라헤르츠 광대역 안테나의 입력 임피던스는 100Ω 이하로 포토믹서와 안테나 사이에 매우 큰 임피던스 부정합 특성이 나타난다. 그러므로 테라헤르츠 연속파의 출력 및 검출 성능은 안테나의 입력 임피던스에 비례하게 된다. 이는, 특정 주파수 대역에서 동작하는 포토믹싱 기반의 테라헤르츠 연속파 발생 및 검출 소자에는 입력 임피던스의 조절이 가능한 공진형 안테나가 적합함을 의미한다. 공진형 안테나는 일반적으로 다이폴이나 슬롯 안테나가 사용되고 있고, 더 높은 출력 향상을 위하여 입력 임피던스를 높일 수 있는 여러 가지 형태의 안테나가 연구되고 있다[25].

안테나에서 방출되는 테라헤르츠파의 높은 결합 효율과 높은 지향성을 가지고 자유공간으로 전파시키기 위해서는 테라헤르츠 발생기 내부에 있는 포토믹서 칩의 굴절률과 잘 정합되는 Si 렌즈를 사용한다. Si 렌즈는 테라헤르츠 주파수 영역에서 Si의 굴절률



(그림 19) 포토믹서에서의 테라헤르츠파 발생 및 방사



(그림 20) Si 렌즈 방사특성(Ray-tracing 방법)

(3.44)과 포토믹서 칩 기판 InP의 굴절률(3.54)이 잘 정합되기 때문에 렌즈 경계면에서의 반사손실이 최소화 된다.

포토믹서 기판 위에 Si 렌즈가 없을 경우에는 (그림 19a)에서 보는 바와 같이 임계각 이상 되는 테라헤르츠파는 대부분이 기판 내부에서 반사하게 되어 기판 내부에서만 존재하거나 원하지 않는 방향으로 방사되고, 임계각 이하에 있는 테라헤르츠파만이 자유공간으로 방사된다. 반면, (그림 19b)에서 보는 바와 같이 Si 렌즈가 있는 경우에는 굴절률 정합이 되어 테라헤르츠파의 대부분이 원하는 방향으로 방사하게 된다.

Si 렌즈는 용도에 따라 분산형(divergence-type), 평행빔형(collimation-type), 초점형(focusing-type)으로 나뉘어 사용될 수 있다. 분산형 Si 렌즈는 일반

적으로 Si 렌즈 다음 단계에 파라볼릭 미러나 테라헤르츠용 플라스틱 렌즈를 두어 테라헤르츠 방사빔을 평행빔 또는 초점빔으로 만들어 시료에 투사하여 테라헤르츠 분광 실험을 한다. 반면, 평행빔형 및 초점형 Si 렌즈는 곧바로 시료에 투사하여 사용한다. (그림 20)은 ray-tracing 방법에 의하여 Si 렌즈의 방사특성을 시뮬레이션한 결과이다[26]. 그림에서 보는 바와 같이 분산형 Si 렌즈는 방사각도가 작은 반면에 방사효율이 높고, 평행빔형 및 초점형 Si 렌즈는 방사각도가 작은 반면에 방사효율이 낮은 특성이 있어 용도에 맞게 사용하면 된다.

IV. 맺음말

2004년 MIT 10대 신기술, 2005년 일본 총무성 10대 기간 기술로 선정된 테라헤르츠 기술은 펄초

기반 TDS 시스템부터 공기중 광대역 테라헤르파 발생 및 검출 기법인 에어포토닉스 방법까지 매우 다양한 기술들이 개발되었다. 일부 가능성을 보여주고 있으나 기존 산업에서 활용 중인 기술을 대체하는 수준에는 아직 많은 연구개발이 필요한 한 분야이다. 기술의 차별성이 산업경쟁력과 직결되는 현실에서 창의적인 원천기술 확보가 얼마나 많은 다양하고 큰 파급효과들을 창출함을 우리는 잘 알고 있다. 영상 및 분광 이외에도 유무선 경계가 희박해지고 있는 시점에서 유무선 통합 기능제공이 가능하고 정보전달, 센싱, 비파괴 검사 등 다양한 응용기술영역을 보유하고 있는 전자기파 대역에서의 기술 미개척지역인 테라헤르츠 갭을 채울 핵심기술 개발이 필수적이라 할 수 있다. 본 동향보고에서는 초소형, 고효율, 실시간, 저가격의 장점을 갖는 포토닉스 기반 테라헤르츠 기술 동향에 대해 기술하였다.

● 용 어 해 설 ●

포토닉스: Electronics가 같은 개념으로 전자 대신에 광자를 활용하는 학문임. 광의 비접촉, 병렬성, 초고속, 광대역, 발광특성으로 통신 등 전 산업분야에서 활용되고 있는 핵심적인 기술 분야

회절격자: 빛이 진행하면서 주기적으로 굴절을 변화를 느낄 수 있도록 만든 구조체로 레이저 공진기 내에 삽입함으로써 회절격자의 브래그 파장만이 반사되어 단일 주파수 성분을 갖는 레이저 개발에 활용

이중모드 반도체 레이저: 반도체 레이저로 한 개의 공진기 내에 중방향 모드 중 회절격자를 활용 특별한 두 개의 모드만이 이득 경쟁 없이 발전시킨 특수 형태의 레이저

약어 정리

DAST	Diethylaminosulfur trifluoride
DBR	Distributed Bragg Reflector
DFB	Distributed Feedback
DML	Dual-Mode Laser
FBG	Fiber Bragg Grating
FDS	Frequency-Domain Spectroscopy

FFT	Fast Fourier Transform
ICT	Information and Communications Technology
PCS	Photoconductive Switch
QCL	Quantum Cascade Laser
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDS	Time-Domain Spectroscopy
UTC-PD	Uni-travelling Carrier Photodetector

참고 문헌

- [1] Masayoshi Tonouchi, "Cutting-edge Terahertz Technology," *Nature Photonics*, Vol.1, 2007, pp.97-105.
- [2] Second Strategic Research Agenda, "Lighting the Way Photonics21," www.photonics21.org.
- [3] B.B. Hu and M.C. Nuss, "Imaging with Terahertz Waves," *Optics Letters*, Vol.20, No.16, 1995, pp.1716-1718.
- [4] J.R. Demers, R.T. Logan, Jr., and E.R. Brown, "An Optically Integrated Coherent Frequency-Domain THz Spectrometer with Signal-to-Noise Ratio Up to 80dB," *Microwave Photonics Tech. Digest*, Victoria, Canada, 2007, pp.92-95.
- [5] M. Tani, O. Morikawa, S. Matsuura, and M. Hanyo, "Generation of Terahertz Radiation by Photomixing with Dual- and Multiple-mode Lasers," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.20, No.7, July 2005, pp.S151-S163.
- [6] A. Klehr, J. Fricke, A. Knauer, G. Erbert, M. Walther, R. Wilk, M. Mikulics, and M. Koch, "High-power Monolithic Two-mode DFB Laser Diode for the Generation of THz Radiation," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol.14, No.2, 2008. pp.289-294.
- [7] S. Osborne, S. O'Brien, E.P. O'Reilly, P.G. Huggard, and B.N. Ellison, "Generation of CW 0.5 THz Radiation by Photomixing the Output of a Two-colour 1.49μm Fabry-Perot Diode Laser," *Electron. Lett.*, Vol.44, No.4, 2008, pp. 296-297.
- [8] S.D. Roh, T.S. Yeoh, R.B. Swint, A.E. Huber, C.Y. Woo, J.S. Hughes, and J.J. Coleman, "Dual-Wavelength InGaAs-GaAs Ridge Waveguide

- Distributed Bragg Reflector Lasers with Tunable Mode Separation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.12, No.10, 2000, pp.1307-1309.
- [9] R.K. Price, V.B. Verma, K.E. Tobin et al., "Y-Branch Surface-Etched Distributed Bragg Reflector Lasers at 850nm for Optical Heterodyning," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.19, No.20, 2007, pp.1610-1612.
- [10] N. Kim, J.-H. Shin, E. Sim, C.W. Lee, D.-S. Yee, M.Y. Jeon, Y. Jang, and K.H. Park, "Monolithic Dual-mode Distributed Feedback Semiconductor Laser for Tunable Continuous-wave Terahertz Generation," *Opt. Exp.*, Vol.17, No.16, 2009, pp.13851-13859.
- [11] N. Kim, Y.A. Leem, J.H. Shin, C.W. Lee, S.P. Han, M.Y. Jeon, D.H. Lee, D.S. Yee, S.K. Noh, and K.H. Park, "Widely Tunable Dual-mode Multisection Laser Diode for Continuous-wave THz Generation," in *Proc. of 35th Int'l Conf. on infrared, millimeter and terahertz waves (IRMMW-THz)*, We-C3.1, Rome, Sep 5-10, 2010.
- [12] M.Y. Jeon, N. Kim, J. Shin, J.S. Jeong, S.-P. Han, C.W. Lee, Y.A. Leem, D.-S. Yee, H.S. Chun, and K.H. Park, "Widely Tunable Dual-wavelength Er³⁺-doped Fiber Laser for Tunable Continuous-wave Terahertz Radiation," *Opt. Exp.*, Vol.18, No.12, June 2010, pp.12291-12297.
- [13] M. Tang, H. Minamide, Y. Wang, T. Notake, S. Ohno, and H. Ito, "Tunable Terahertz-wave Generation from DAST Crystal Pumped by a Monolithic Dual-Wavelength Fiber Laser," *Opt. Exp.*, Vol.19, No.2, Jan. 2011, pp.779-786.
- [14] H. Ito, H. Yamamoto, T. Furuta, and T. Ishibashi, "Generation and Propagation of Sub-Terahertz Pulse Signal Using Waveguide Integrated InP/InGaAs Uni-travelling-carrier Photodiode," *2010 IEEE Photonics Society Topical meetings series*, 2010, pp.46-47.
- [15] D. Vignaud, J.F. Lampin, E. Lefebvre, M. Zaknoute, and F.Mollot, "Electron Lifetime of Heavily Be-doped InGaAs of Grown Temperature and Doping Density," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.22, No.4, 1994, pp.4151-4153.
- [16] H. Ito, S. Kodama, Y. Muramoto, T. Furuta, T. Nagatsuma, and T. Ishibashi, "High-speed and High-output InP-InGaAs Unitravelling-Carrier Photodiode," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, Vol.10, No.4, 2004, pp.709-727.
- [17] B.S. Williams, "Terahertz Quantum-cascade Laser," *Nature Photonics*, Vol.1, 2007, pp.517-525.
- [18] Matthias Hoffmann, "Novel Techniques in THz-Time-Domain-Spectroscopy," PhD Thesis, Department of Molecular and Optical Physics, Freiburg Materials Research Center, University of Freiburg, 2006.
- [19] Peter Uhd Jepsen, David G. Cooke, and Martin Koch, "Terahertz Spectroscopy and Imaging - Modern Techniques and Applications," *Laser Photonics Rev.* 5, No.1, 2011, pp.124-166.
- [20] <http://www.teraview.com>
- [21] S.M. Duffy, S. Verghese, K.A. McIntosh, A. Jackson, A.C. Gossard, and S. Matuura, "Accurate Modeling of Dual Dipole and Slot Elements Used with Photomixers for Coherent Terahertz Output Power," *IEEE Trans. Micro. Theo. & Tech.*, Vol.49, No.6, 2001, pp.1032-1038.
- [22] S. Verghese, K.A. McIntosh, and E.R. Brown, "Highly Tunable Fiber-Coupled Photomixers with Coherent Terahertz Output Power," *IEEE Trans. Micro. Theo. & Tech.*, Vol.45, No.8, 1997, pp.1301-1309.
- [23] E.R. Brown, A.W.M. Lee, B.S. Navi, and J.E. Bjamason, "Characterization of a Planar Self-Complementary Square-Spiral Antenna in the THz Region," *Micro. & Optic. Tech. Lett.*, Vol. 48, No.3, 2006, pp.524-529.
- [24] P.U. Jepsen, D.G. Cooke, and M. Koch, "Terahertz Spectroscopy and Imaging - Modern Tech Coherent Terahertz Output Power," *IEEE Trans. Micro. Theo. & Tech.*, Vol.45, No.8, 1997, pp.1301-1309.
- [25] I. Woo, T.K. Nguyen, H. Han, H. Lim, and I. Park, "Four-leaf-clover-shaped Antenna for a THz Photomixer," *Optics Express*, Vol.18,

No.18, 2010, pp.18532-18542.
[26] 한상필, 김남제, 신재현, 심은덕, 이철욱, 임영안,

백용순, 박경현, 전민용, 이대수, “THz 전파용 고
저항 실리콘 렌즈,” Photonics Conference 2009.