Terahertz Photonics

DOI: 10.3938/PhiT.23.040

박 경 현

Terahertz Photonics

Kyung Hyun PARK

Over the last decades, there have been significant achievements in the terahertz (THz) technologies. Thanks to the continuous and intensive research on THz technologies, the performances of the main building blocks of THz technologies have been dramatically improved. In addition, several different types of dual-mode lasers and broadband antenna-integrated photomixers show potential for realizing a compact, cost-effective THz spectrometer which envisage a bright future for THz systems.

테라헤르츠 기술에서의 포토닉스 역할

사람이 태어나서 가장 먼저 인지하는 빛이 형광등 빛이라는 우스개 이야기가 있다. 일견 맞아 보이지만 무엇인가 많이 부족해 보인다. 전자기파 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 인간이 느끼고 볼 수 있는 영역은 전 전자기파 스펙트럼 대역에서 너무나 미미하다. 파장이 1 nm 이하인 x-선부터 파장이 수 센티미터 급인 마이크로파까지, 전자기파 대역 개척을 위한 노력을 볼 때, 이처럼 인류가 지속적이고 집중적인 노력을 하는 분야도 흔치 않을 것이다. 10년 이후의 우리들 세상이 어떻게 변모할지 정확히 예측하는 것은, 지난 시절의 기술발전 예측의

저자약력

박경현 박사는 연세대학교 물리학과에서 광학 전공으로 이학박사 학위를 취득한 후 미국 콜롬비아 대학에서 박사후 과정을 마쳤다. 1990년부터 1999년까지 한국과학기술연구원 광기술연구센터에서 집적광학을 연구하였으며, 이후 한국전자통신연구원 반도체 광소자 연구를 진행하였다. 현재 한국전자통신연구원 THz포토닉스창의연구센터에서 센터장을 맡고 있으며 포토닉스 기반 기술을 이용한 테라헤르츠 연구 분야에서 소자·소재 등의 원천연구에서부터 신 응용분야 창출까지의 다양한 연구들을 진행하고 있다. (khp@etri.re.kr)

Fig. 1. Terahertz spectral region.

정확도로 미루어 짐작해 볼 때 많은 한계가 따를 것이다. 하지만 분명한 것은, 전자기와 대역 확장을 위한 노력과 이를 통한 신산업 출현은 지난 세기와 같이 앞으로도 계속될 것이라는 점이다. 이미 많은 산업 영역을 확보한 광파 및 마이크로파 영역에서는 통신, 의료, 군수 등 매우 다양한 산업 분야에서 계속 발전하고 있으며, 산업간 융합이 진행되고 있다.

전자기와 대역 개척에서 가장 심연이라 할 수 있는 테라헤르츠(terahertz, THz)파는 적외선과 밀리미터파 사이에 존재하는 0.1~10 THz 주파수 영역의 전자기파이다. 전파의 투과성과 광파의 직진성을 동시에 가지고 있어 독특한 물리적 특성을 보이는 테라헤르츠파는, 비금속이나 무극성 물질의 투과 특성 또는 물질마다 고유한 특성을 드러내는 분자지문 분석에 적합한 전자기파이다.

우수하고 실용적인 테라헤르츠파 기술은, 소자 개발, 분광, 영상 기술 등의 기초과학 분야는 물론, 의공학, 보안, 환경/우주, 정보통신 등의 다양한 응용과학 분야에서 이미 그 중요성이 검증되었고, 매우 다양하고 광범위한 연구들이 진행되고 있지만, 아직 그 대부분이 실험실 수준에 머물고 있어, 여전히 해결해야 할 수많은 과제들을 가지고 있다.

현재에는 테라헤르츠 기술 구현을 위한 기반 기술로서, RF 전자기술과 포토닉스 기술이 경쟁을 하고 있으며, 종래에는 이들 기술이 융합된 독자적인 테라헤르츠 기술이 자리매김할 것으로 생각된다. 그 가운데, 포토닉스 기술 기반의 테라헤르츠

Fig. 2. Current status of THz generating devices.^[1]

기술은 언제 어디서나 실시간으로 인간들에게 필요한 초광대역 근접통신, 인간에 해로운 물질의 인지 및 추출, 다중 영상 기법을 통한 신개념 진단기술 등에서 차별화된 특성 제공이 가능하여 그 확보에 열띤 경쟁이 가속되고 있다.

특히, 테라헤르츠파의 높은 대비(contrast) 특성을 활용한 영상기술이나, 고유 분자지문 분석을 위한 테라헤르츠 분광기술, 그리고 테라헤르츠파를 활용한 초광대역 무선통신 기술 등은, 미래기술 패러다임의 핵심이 될 인간중심 기술의 제공을 가능케 할 것이다. 이를 위하여 2000년 초부터 집중적인 연구가 진행되고 있고, 그림 2에서 볼 수 있듯이 다양한 기술들이 발표되었다.

기술은 매우 빠르게 발전하고 있다. 혁신의 아이콘인 휴대단말기를 통하여 우리들은 이전에 상상할 수 없었던 인간들이 원하는 새로운 기능들을 나날이 보고 있다. 발전에 발전을 거듭하여 10년 후의 휴대폰은 어떻게 진화할까? 얼마나 많은 전자기와 대역 주파수들을 활용할 수 있을까? 인간중심 수요기술들은 얼마나 많이 채택되었을까? 배터리 성능은 얼마나 발전할 것인가라는 진부한 질문부터 시작해서, 배터리가 없는 단말기는 개발될 수 있을 것인가 하는 질문까지 매우 다양한 예측들을 해 볼 수 있다. 테라헤르츠파 고유 특성으로 볼 때, 테라헤르츠 갭을 채울 수 있는 전자기파 대역 개척은, 이를 통해 적절한 기술이 개발되었을 때, 이러한 많은 질문에 답을 줄 수 있을 것이다.

어떤 전자기파 대역에서건 고출력, 고감도, 광대역, 소형 및 저가격의 파원 및 검출기 기술은 전자기파 대역 개척의 시작점이다. 그러나 타 전자기파 대역에 비해 테라헤르츠파 대역은 소위 ‘테라헤르츠 갭’이라 불려 왔을 정도로 이러한 기술의 진

Fig. 3. Schematic diagram of a THz-TDS system.

입장벽이 매우 높은 분야이다. 그 이유는 이미 상용화가 된 그림 3의 TDS(time-domain spectroscopy) 시스템에서 쉽게 확인할 수 있다. TDS 시스템에서는 Ti-Sapphire 레이저의 모드 잠긴 펄스를 반도체 표면에 조사시키면 순간적으로 전하들이 생성되고 발생한 전하들이 외부 인가된 전압에 의해 가속되어 광전류가 발생한다. 이때 반도체에 집적된 수 μm 수준의 간격을 갖는 쌍극자 안테나에 수 V에서 수십 V의 전압을 인가하면 펄스형 테라헤르츠파가 발생한다. 발생한 테라헤르츠파는 샘플링스코프와 같은 원리의 광전도 검출법으로 검출한다. 검출 시에는 발생한 테라헤르츠 펄스파가 안테나 두 전극 사이에 전기장을 형성하고 있을 때 펄스초 여기광이 주입되면, 두 전극 간의 전도도의 급격한 증가로 인해 입사된 테라헤르츠 펄스파의 크기에 비례하여 흐르는 전류를 검출한다. 통상 검출 신호의 크기는 nA 수준으로 매우 작아 lock-in 증폭 장비가 사용된다.

이러한 방법은 0.1% 이하의 매우 낮은 광전 변환효율과, 크기가 큰 고가의 펄스레이저가 필요한 문제가 있다. 따라서 최근에는 초소형, 고분해능, 저가격 시스템 측면에서 인간중심의 센서 기술로 확장이 가능한 테라헤르츠 연속파 연구에 여러 그룹에서 주력하고 있다.

테라헤르츠 연속파 발생에서 주로 사용되는 방법은 주파수차가 테라헤르츠 대역에 해당하는 두 개의 광원을 사용하는 테라헤르츠 비팅(beatting) 광원을 이용한 방법이 주로 사용되고 있다. 이때 사용되는 광전변환 소자는 광전도안테나와 달리 포토믹서(photomixer)라 불린다. 이 방법은 시스템 크기와 요구 전력을 획기적으로 줄일 수 있고, 광통신 대역의 광원과 부품을 사용할 경우 경제적으로도 높은 이점이 있다. 또한 두 개의 독립된 비팅광원의 주파수를 전기적으로 조절하여 비교적 넓은 대역폭에서 테라헤르츠파의 발진 파장을 튜닝할 수 있다는 장

REFERENCES

- [1] D. Paul *et al.*, Laser & Photon. Rev. **3**, 1 (2009).

Fig. 4. Structure and emission spectrum from a SOA-integrated dual-mode laser.

점이 있다. 이로 인하여 테라헤르츠 연속파 기술은 향후 테라헤르츠와의 산업적 응용 분야를 넓히기 위한 핵심적 기술로 여겨지고 있다.

이러한 테라헤르츠와 기술을 실생활에 적용하기 위해서는 테라헤르츠 대역 소자의 특성을 향상시키고, 크기와 가격을 낮추는 것이 매우 중요하며, 고출력 테라헤르츠 파원과 고감도의 2차원 검출기 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 분야에서는 지난 십 수 년 동안 비팅 광원, 포토믹서, 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. 본고에서는 미래 핵심 기술 중 하나인 인간중심의 테라헤르츠 기술을 위하여 초소형, 저가격, 다기능 특성 제공이 가능한 포토닉스 기반의 테라헤르츠 핵심기술 개발을 추진하고 있는 ETRI 테라헤르

Fig. 5. High-performance broadband buried-type photomixer.

츠 포토닉스 창의연구센터의 각종 연구개발 성과들을 간략하게 살펴보고, 향후 테라헤르츠 포토닉스 분야의 발전 방향에 대한 전망을 살펴보고자 한다.

1. 테라헤르츠 비팅 광원

한 개의 공진기 상에 두 개의 DFB(distributed feedback, 공진기나 도파로상에 굴절률의 주기적인 변화를 주어 특정파장발진이나 파장필터로 상용한다)와 위상제어 영역을 집적화하여 최초로 dual-mode laser를 개발 튜너블 테라헤르츠파 발생에 성공하였다.^[2-4] 최근에는 비팅광원의 최종 연구결과물이라 할 수 있는 높은 이득을 가지는 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)

REFERENCES

- [2] N. Kim *et al.*, Optics Express **19**, 15397 (2011).
- [3] N. Kim *et al.*, Optics Express **20**, 17496 (2012).
- [4] H. Ryu *et al.*, Optics Express **20**, 25990 (2012).

Fig. 6. High-power waveguide-type photo-diode based THz photo-mixer.

광증폭기까지 한 칩에 집적된 단일 칩 비팅(beatting) 광원을 최초로 개발하였다. 이는 출사면에서 되돌아오는 반사손실 억제제를 위한 7° 경사 광도파로와 출력 향상을 위한 SSC(Spot-Size Converter) 광결합 구조가 집적된 고출력 1.3 μm 대역 이중모드 반도체 레이저이다. 1 THz 이상의 광대역 가변이 가능하면서 가변영역에서 안정적인 위상 특성을 갖고 있어, 이를 이용한 초소형 테라헤르츠 분광기/영상기 구현을 앞두고 있다.

2. 테라헤르츠 포토믹서

테라헤르츠파를 발생 및 검출하는 방법 중의 한 가지는 포토믹서(photomixer)를 이용하는 방법이다. 포토믹서는 크게 평면형과 도파로형의 두 가지로 구분할 수 있다. 평면형 저온성장 포토믹서는 구조가 간단하여 기존 반도체 공정을 이용하여 제작이 용이하다는 장점이 있고, 도파로형 포토믹서는 기본적으로 고속, 고효율의 동작이 가능하다는 장점이 있다. 현재 활발하게 연구가 되고 있는 도파로형 포토믹서는 TWPD(travelling-wave photodetector) 방식과 UTC-PD(uni-travelling carrier photodetector) 방식 등이 알려져 있다.

(1) 저온성장 평면형 테라헤르츠 포토믹서

광대역 포토믹서의 핵심인 반도체 운반자 수명시간 축소를 위한 저온성장 기법과 수백 펨토급 물질 성장 특성 확보를 바

1 × 240 SBD 어레이 검출기

오징어 투시영상

에이스 크래커 투시 영상

Fig. 7. 1×240 array of Schottky barrier diode (SBD) array for real-time large-area THz imaging.

탕으로 한 고품위 THz 포토믹서를 연구하고 있다. 저온 성장한 반도체막은 정상적인 박막에 비해 열전도도가 매우 낮는데, 매립형 포토믹서의 경우 그 주변부가 고전도도의 물질로 둘러싸임으로써 활성층에서 발생된 열이 효과적으로 방출될 수 있다. 최근 본 센터는 연속 주파수 가변형 테라헤르츠파 발생에서 중요한 열 문제를 해결한 세계에서 가장 작은 광대역 고성능 매립형 포토믹서 개발에 성공하였다.^[5]

(2) 도파로형 테라헤르츠 포토믹서

저가형, 포터블, 실시간의 영상/분광 복합 스캐너 기능을 제공하기 위해서는 고출력/광대역 포토믹서의 기술개발이 요구된다. 이를 위해서는 강한 광파워가 THz파로 변환이 가능한 초고속, 고감도, 고출력 특성을 가지는 도파로형 포토다이오드(photodiode)의 개발이 요구된다. 자체 제작 결과, 고감도(반응도 0.36A/W) 및 고출력(SNR 60dB @320GHz)의 도파로형 포토다이오드 THz 포토믹서를 개발하였다.

3. 1×240 SBD 어레이 THz 검출기

THz 대역에서의 영상 및 무선 통신을 위한 안테나집적형

REFERENCES

- [5] K. Moon *et al.*, Optics Lett. **38**, 5466 (2013).

Fig. 8. Non-contact real-time continuous-wave THz spectrometer system.

SBD(Schottky Barrier Diode) 검출기를 연구 개발하고 있다.^[6] 폭이 12 cm이면서 스캔 속도 25 cm/s의 빠른 속도를 가진 THz 라인 스캐너용 소형의 1×240 SBD 어레이형 THz 검출기를 개발하였다. THz 영상획득 측정결과, X-선 투시기에서는 검출이 되지 않는 연질의 오징어에 대한 영상과, 크래커 밑에 숨겨져 있는 이물질(금속 링/클립)에 대한 검출이 가능하였다.

4. THz 연속파 응용시스템: 분광, 영상 및 THz 무선통신

자체 개발한 단일 THz 소자를 이용한 초소형의 THz 연속파 분광/영상 시스템 연구를 진행하고 있으며, 고속변조(10 Gbps 급)가 가능한 이중모드 반도체 레이저와 SBD 검출기를 이용한 근거리 THz 연속파 무선 인터커넥션 연구를 함께 진행하고 있

다. 실시간 비접촉식으로 두께, 굴절률, 전기전도도 등의 물성 특성 측정이 가능한 테라헤르츠 측정 시스템을 개발하였다. 이 초소형의 테라헤르츠 두께/물성 측정기는 산업 현장에서 바로 활용이 가능하다.^[7]

테라헤르츠파 응용 및 전망

테라헤르츠파는 빛이 투과할 수 없는 많은 물질을 투과하며, 마이크로파에 비해서 분해능이 뛰어나기 때문에 분광, 이미징, 센싱 등의 응용 분야에서 매우 유용하게 사용이 가능하다. 테라헤르츠 분광이나 이미징을 위해서는 공간상에 방출되는 테라헤르츠파의 경로에 시료를 두고, 그 투과 혹은 반사된 테라파의 진폭이나 위상변화를 분석한다. 이를 통해, 물질의 굴절률, 두께, 전기전도도, 표면저항 등의 물성치 추출은 물론, 외관에 드러나지 않는 불량판독, 감추어진 금속제 무기검출 등의 용도로도 널리 사용되고 있다. 실시간으로 보다 높은 분해능과 감도를 얻기 위해, SBD 검출기를 어레이 형태로 배열하거나, 다양한 전기 신호 분석기법 등이 적용되기도 하며, 나노 스케일의 이미징을 얻기 위하여 테라헤르츠 근접장 이미징에 대한 연구도 진행되고 있다. 이 밖에도 육내 근거리 대용량 무선 통신이나 무선 전력 전송 등을 목표로 테라헤르츠 통신에 대한 연구 또한 관련 표준을 근거로 진행되고 있다.

지금도 테라헤르츠 기술은 나노, 정보, 생명, 환경, 우주, 군사 기술 등의 다양한 분야를 망라하여 다양한 분야에서 그 응용 가능성이 속속 발견되고 있으며, 세계적인 기술경쟁이 치열한 분야이다. 따라서 향후에도 테라헤르츠 기술의 연구 개발에 대하여 지속적이고 규모 있는 더욱 많은 투자가 필요하다.

REFERENCES

- [6] S. Han *et al.*, Optics Express **21**, 25874 (2013).
- [7] K. Moon *et al.*, Optics Express **22**, 2259 (2014).