테라헤르츠 파를 이용한 분광/영상 및 무선 데이터 전송 기술

DOI: 10.3938/PhiT.19.010

백문철·곽민환·김성일·강승범·류한철·전동석·정세영·강광용

Time Domain Spectroscopy/Imaging and Wireless Data Transfer Technologies with Terahertz Wave

Mun Cheol PAEK*, Min Hwan KWAK, Sungil KIM, Seung Beom KANG, Hanchool RYU, Dong Suk JUN, Se Young JEONG and Kwang Yong KANG

We introduce research activities on terahertz (THz) technologies of time domain spectroscopy/T-ray imaging and

wireless data transfer. Investigation of materials and package modules for THz wave generation and detection, and setup of the THz systems for time domain spectroscopy(TDS), T-ray imaging, and sub-THz wireless communication are main topics of the THz research field. We have developed a table-top scale THz-TDS/imaging system and terahertz continuous wave(CW) generators for THz communications and T-ray imaging. Poly-GaAs films as a photoconductive switching antenna material, dielectric properties of ferroelectric BSTO films at the THz frequency range, and terahertz wave Transmitter/Receiver (Tx/Rx) device package modules have been studied also.

서론

테라헤르츠파(THz wave)는 전자기파 스펙트럼에서 0.1 ~ 10 THz의 주파수 범위에 해당하며 전파와 광파의 중간영역에 위치하고 그 파장은 30 μm 에서 3 mm에 이른다. 그러므로 가장 짧은 파장의 전파이면서 가장 긴 파장의 광파에 해당한다. 이러한 테라헤르츠 기술은 그동안 적합한 신호원이나 검출기술이 개발되지 않아 미개척 분야에 있었지만, 최근의 눈부신 과학기술에 힘입어 수많은 다양한 기술들이 등장함으로써 미래를 기약할 수 있는 과학기술 분야에서 가장 중요한 도구 중의 하나로 인식되고 있다.^[1-3] 한편, 테라헤르츠파는 전파의 투과성과 광파의 직진성을 모두 갖추고 있으며 이를 이용하여 X-ray와 같은 투과영상을 얻을 수도 있고, 테라헤르츠 영역의 스펙트럼으로부터 물질의 고유한 물리적인 특성들을 분석할 수도 있기 때문에 테라헤르츠파를 T-ray라고 부르기도 한다. 특히, 시간영역 분광(Time Domain Spectroscopy;

저자약력

백문철 박사는 한국과학기술원 박사(1990)로서 1982년부터 현재까지 한국전자통신연구원의 책임연구원으로 재직 중이며 미국 Bell Lab. (Murray Hill)에서 신소재 분야의 교환연구원(1996.3-1997.3) 및 충남대학교 겸임교수(2002.3-2004.2)로 활동하였다. 현재의 관심분야는 테라헤르츠 소재 및 소자, 그리고 고밀도 정보저장 소자 및 소자이다. (backmc@etri.re.kr)

곽민환 박사는 경상대학교 전기공학 박사(2002)로서 2002년부터 한국전자통신연구원 선임연구원 재직 중이며 고온초전도, 강유전체 등 산화물 초고주파 박막소자의 연구를 진행하여 왔고, 현재는 테라헤르츠 송수신 소자 설계 및 제작과 테라헤르츠 분광 이미징 시스템 분야에 대한 연구를 진행하고 있다. (mhkwak@etri.re.kr)

김성일 박사는 아주대학교 박사(2008)로서 1997년까지 현대전자(현 하이닉스 반도체) 연구원 및 2000년까지 LG 전자 주임연구원으로 근무하였다. 2000년부터 현재까지 한국전자통신연구원의 선임연구원으로 재직 중이다. 현재의 관심분야는 테라헤르츠 무선 통신 시스템 및 초고속/고밀도 반도체 집적회로/패키지를 위한 Signal Integrity/EMI/EMC 설계 및 측정이다. (silkim@etri.re.kr)

강승범 박사는 충북대학교 물리학 석사, 의용생체공학 박사(2008)로서 2008년부터 한국전자통신연구원 선임연구원 재직 중이며 fiber laser 제작/응용에 대한 연구를 수행하였고 현재 THz 분광 이미징 시스템 및 Bio 응용분야에 관한 연구를 진행하고 있다. (sbkang71@etri.re.kr)

류한철 연구원은 포항공과대학교 석사(2002)로서 2002년부터 현재까지 한국전자통신연구원의 선임연구원으로 재직 중이다. 현재의 관심분야는 테라헤르츠 연속파 분광 및 이미징 시스템 및 테라헤르츠 연속파 소자 개발 그리고 테라헤르츠 펄스파/연속파 분광 시스템을 이용한 물질 분석이다. (hcryst@etri.re.kr)

전동석 연구원은 충북대학교 석사(1996)로서 1984년부터 현재까지 한국전자통신연구원의 책임연구원으로 재직 중이다. 현재의 관심분야는 mm파/테라헤르츠파 무선 통신 시스템, 이미지 시스템 그리고 안테나 다중빔 시스템 설계 및 개발이다. (dsjun@etri.re.kr)

정세영 연구원은 충남대학교 나노기술학과 박사과정으로 2006년부터 현재까지 한국전자통신연구원의 위촉연구원으로 재직 중이다. 현재의 관심분야는 테라헤르츠용 박막 MBE 성장 및 소자 제작, 3-5족 화합물반도체 열차원, 일차원 나노구조 MBE 성장과 특성평가, 그리고 양극산화 알루미늄 나노템플릿 제작 및 이를 이용한 열차원, 일차원 나노구조 성장이다. (alfajsy@etri.re.kr)

강광용 박사는 서울대학교(1975)와 부산대학교 박사(1988)를 거쳐 현재는 한국전자통신연구원 테라헤르츠 연구팀의 팀장으로 재직 중이다. 재직 중에는 초전도체, 금속-절연체 전이현상, 초대용량 정보저장장치, flexible 디스플레이 등 다양한 분야의 연구를 수행하였으며, 현재의 주요 관심분야는 테라헤르츠 분광/영상시스템 및 수십 Gbps급 무선데이터 전송시스템과 테라헤르츠파 통신, 그리고 테라헤르츠파를 이용한 다양한 응용분야의 연구개발 등이다. (kykang@etri.re.kr)

REFERENCES

- [1] H. B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Chen and X.-C. Zhang, Proc. IEEE **95**, 1514 (2007).
- [2] W. L. Chan, J. Deibel and D. Mittleman, Rep. Prog. Phys. **70**, 1325 (2007).
- [3] J. Chen, Y. Chen, H. Zhao, G. J. Basiaans and X.-C. Zhang, Opt. Express **15**, 12060 (2007).

TDS) 기술과 T-ray 영상(image) 기술은 테라헤르츠 기술의 가장 많은 응용분야로서 연구되어 오고 있으며, 100 GHz에서 수 THz 영역에 이르는 테라헤르츠파를 이용하여 100 Gbps급 이상의 초고속 무선데이터 전송기술이 머지않은 미래에 실현될 것으로 전망되기도 한다.^[4]

본 고에서는 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute; ETRI) 테라헤르츠연구팀의 연구내용을 중심으로 하여 테라헤르츠 기술개발의 현황에 대하여 논의하기로 한다. 본 글에서는 테라헤르츠 기술을 편의상 2개 그룹으로 구분하였다. 첫째는 테라헤르츠 센싱기술 그룹으로 테라헤르츠 펄스파(pulse wave; PW)를 이용한 분광 및 영상 기술을 연구하며, 테라헤르츠 연구를 위한 기본적인 도구인 실험실 수준(Lab. scale)의 THz-TDS 시스템에 대한 중요한 기능과 이를 이용한 주요 연구결과를 설명한다. 그리고 이동이 가능하도록 소규모로 개발한(scale down) 탁상형(table-top type) THz-TDS/T-ray 영상 시스템에 대하여 간략하게 소개하며, 테라헤르츠 신호원 소자개발에 활용되는 광전도 안테나용 소재와 THz 영역에서의 광학적 특성을 분석한 결과도 설명한다. 두 번째 기술그룹은 테라헤르츠 펄스파 기반의 기술과 대조시키기 위하여, 테라헤르츠 연속파(continuous wave; CW)를 이용한 신호원 기술에 대해 설명한다. 즉, 초고속 근거리 무선데이터 전송용으로 120~240 GHz 대역의 THz-CW를 생성하는 기술과 T-ray 영상을 얻기 위하여 THz-CW를 생성하고 검출하는 기술에 대해 논의한다.

테라헤르츠 펄스 센싱기술

1. THz-TDS 시스템

테라헤르츠파의 신호원은 펄스파와 연속파로 구분되며, 주파수의 대역폭 등에 따라 여러 가지 방법으로 생성할 수 있으며, 최근까지도 많은 방법들이 제안되고 발표되고 있다. 하지만 THz-TDS용으로 가장 많이 사용되는 광전도 안테나(photoconductive antenna; PCA)를 이용한 펄스파 발생/검출방식이 각 실험실마다 기본적인 테라헤르츠 연구용 도구로써 활용되고 있다. 그것은 가장 안정적이면서 가장 많은 연구를 통하여 개선되어 왔기 때문이다. ETRI의 테라헤르츠 연구실에서 보유하고 있는 THz-TDS 시스템은 실험실 규모의 크기와 성능을 가지고 있으며 테라헤르츠 연구의 기본적인 도구로써 소재의 테라헤르츠 특성분석과 일부 T-ray 영상분석 등의 업무를 수행하고 있다. 이 시스템의 구성요소로는 Ti:Sapphire 펄스 레이저, 광학적 시간지연장치, 광전도 안테나방식의 테라헤르츠 발진/검출기, 테라헤르츠 파를 집광시키기 위한 포물면 거울 및 로크-인 증폭기 등이 있다. 모드 잠금 방식의 Ti:Sapphire 펄스 레이

Fig. 1. A photograph of the Lab. scale THz-TDS system of ETRI. A dry station with a nitrogen gas purge is installed to prevent the terahertz wave from the water vapor absorption in the air.

저는 15~30 fs의 펄스폭과 80 MHz의 반복률로서 중심 파장 795 nm, 펄스폭 62 nm의 펄스파를 방사한다. 테라헤르츠 발진 및 검출기에 입력되는 펄스 레이저의 파워는 각각 40 및 20 mW이며 검출기에 가해지는 바이어스 전압은 15~21 V이다. 그리고 수분에 의한 테라헤르츠 파의 흡수감쇠를 방지하기 위하여, 테라헤르츠파의 진행경로에 대해 <그림 1>과 같이 습기제거용 제습 장치(dry station)를 제작하였다. 여기에는 질소를 불어 넣어주면서 내부 습도를 4% 이하로 유지한다. 질소의 충전 전후에 대한 테라헤르츠 파의 검출파형을 살펴보면 <그림 2>에서 보듯이 수분에 의한 흡수 피크가 시간 영역에서는 잡음처럼 보이지만 주파수 영역 스펙트럼에서는 뚜렷한 흡수라인을 보이고 있음을 알 수 있다. 그런데 이 시스템은 매우 무겁고 부피가 커서 분석을 하고자 하는 시편을 실험실에 가져와야 하므로 많은 기능에도 불구하고 활용범위에 큰 제약이 존재한다. 이에 따라 본 연구팀에서는 이동이 간편한 작은 크기의 THz-TDS 시스템을 제작하였으며 그 모양을 <그림 3>에 나타내었다. 전체 시스템 크기의 대부분을 차지하는 펄스 레이저는 100 fs 정도의 펄스폭을 가지면서 부피가 작고 가벼운 광섬유 레이저로 대신하여 적용하였고 모든 구성요소들의 배치를 작은 공간에 밀집시켰다. 그 결과 탁상 위에 거치할 수 있는 크기의 Table-top형 THz-TDS 시스템을 제작하였으며 원하는 위치로 이동을 간편하게 할 수 있도록 설계되었다. 본 이동형 시스템에는 펄스 레이저의 시간지연을 위하여 압전 방식의 단일축 방향 선형 스테이지(single axis piezo linear stage)를 적용하였고, T-ray 영상 획득을 위한 시편의 2차원 스캔용으로 양축 방향 선

REFERENCES

- [4] T. Nagatsuma and Y. Kado, "Towards 100 Gbit/s wireless using terahertz waves", TeraTech 09, 2nd International Workshop on THz Technology, Osaka, Japan, 21-C2 (2009).

Fig. 2. Time domain wave forms and the corresponding frequency domain spectra of the terahertz pulse beam detected with and without nitrogen purge showing the clear water vapor lines.

Fig. 3. A photograph of the portable THz-TDS/imaging system of ETRI.

형 스테이지(double axis piezo linear stage)를 적용하였다.

상기 THz-TDS 시스템에서는 저온성장(Low Temperature Grown: LT) GaAs를 기반으로 하는 광전도 안테나를 적용하였으며, 초반구형(hyper-sphereic) 실리콘 렌즈를 부착하여 테라헤르츠파의 집속에 이용하였다. 광전도 안테나를 이용한 테라헤르츠 파의 발진 및 검출을 위해서는 펄스 레이저에 의해 생성한 전자-정공 등의 전하 수송자(charge carrier)들이 높은 이동도(mobility), 짧은 수명주기(lifetime) 및 높은 암전류(dark

Fig. 4. A terahertz wave form and the corresponding frequency domain spectrum (inserted) obtained with the poly-GaAs on Si based photoconductive antenna device.

resistance)를 가져야 하는데, 이를 잘 만족시키는 소재 중의 하나로 LT-GaAs가 가장 많이 사용된다. LT-GaAs는 저온 MBE에서 과잉의 As 분위기로 성장할 경우 점결함(point defect)이 많이 생성하여, 전자-정공 등의 전하이동 시에 포집 사이트(capture site)로 작용하므로 짧은 수명주기 및 높은 이동도를 가질 수 있기 때문이다. 그러나 MBE 등 고가의 적층장비를 사용해야 하고, 공정이 까다로우며, 대량생산을 할 경우 생산성이 매우 낮은 것이 단점이다. 또한 저온에서의 에피택시 성장을 위해 반드시 반절연(Semi-insulating; SI) GaAs 기판을 사용해야 하는 것도 단점이 된다. 본 실험실에서는 LT-GaAs 소재를 개선하여 다결정질(polycrystalline)의 GaAs 소재를 개발하였다. 다결정은 기판의 종류에 제한을 받지 않고 성장할 수 있어 GaAs 기판이 아닌 실리콘, 사파이어, quartz 기판 등에도 적용할 수 있다. 그러나 다결정체는 불규칙한 형태의 결정립(grain)과 많은 결정립계(grain boundary)가 혼재되어 있으므로 성장공정을 조정하여 전기적 특성과 광학적 특성을 제어하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 이유로 다결정 GaAs에 대한 광전도 안테나 소재로서의 연구는 그동안 진행되지 않았다. 본 연구에서는 다결정 GaAs를 SI GaAs뿐만 아니라 고저항 실리콘 및 사파이어 기판에 적층하여 테라헤르츠 파의 발진 및 검출 특성을 측정한 결과, 단결정의 LT-GaAs에 비하여 더 우수하거나 동일한 값을 가지는 것으로 나타났다. <그림 4>는 고저항 실리콘 기판에 적층한 다결정 GaAs 소재의 광전도 안테나로 발진 및 검출한 테라헤르츠 파의 파형을 보인 것이다. 신호대 잡음비는 10^4 이상으로 나타났으며 테라헤르츠 파의 주파수 범위도 3.5 THz까지로 측정되었다. 이것은 다결정질의 결정립계가 전자-정공의 전하수송자를 포집하는 사이트로 강하게 작용하는 것으로 판단되며, 이로 인하여 전하의 수명주기가 짧아지고 테라헤르츠파의 발진 및 검출이 일어나는 것으로 생각된다.^[5]

Fig. 5. A photograph of the photoconductive antenna device package module.

<그림 5>는 THz-TDS 시스템을 구성하는 과정에서 가장 중요하고 어려운 일의 하나로서 핵심부품인 광전도 안테나를 정렬하는 문제를 해결하고자 제작한 패키지 모듈이다. 이 모듈은 펄스 레이저 펄스에 의해 발생하는 최대값의 테라헤르츠 파를 얻기 위하여 광전도 안테나 소자와 실리콘 렌즈를 정렬시키는 기능을 한다. 또한 안테나소자에 바이어스 전압을 가하거나 광전류를 측정하기 위한 전극을 외부 회로에 연결하는 인터페이스 기능을 갖추고 있어 편리하게 사용할 수 있다. 이 모듈을 사용하면 광전도 안테나 소자의 교체가 용이하며 테라헤르츠 펄스를 이용하는 THz-TDS 시스템 외에도 광혼합(photomixing)을 이용한 연속 테라헤르츠 파를 발생/검출할 때에도 적용할 수 있다. 이로써 시간과 노력을 크게 절감할 수 있고 새로운 실험의 시도에 쉽게 적용할 수 있게 한다.

2. THz-TDS 분광

상기한 THz-TDS 시스템을 이용하여 강유전체 소재^[6] 및 칼코제나이드 소재^[7]에 대한 테라헤르츠 영역에서의 광특성 및 유전특성을 조사 연구하였다. <그림 6>은 강유전체 소재 중의 하나인 BSTO ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$) 소재에 대한 테라헤르츠 특성을 측정한 것이다. BSTO 박막은 높은 유전율을 가지고 있는 강유전체로서 높은 유전상수, 낮은 유전손실을 보이며 강한 외부자계에서도 우수한 가변특성을 나타낸다. 따라서 마이크로파와 밀리미터파 소자의 상온에서 동작하는 이상기(phase shifter), varactor 및 가변필터용 소재로 연구되고 있다. 최근에는 전자소자의 동작주파수 및 통신용 주파수의 값이 점차 증가하고 있기 때문에 테라헤르츠 주파수 영역에서 유전체 소재의 특성을 연구할 필요가 있다. $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ 는 BSTO에서도 가장 높은 유전상수와 상온에서의 유전특성을 보이는 Ba/Sr 성분비로서 여기에서는 THz-TDS를 이용하여 테라헤르츠 영역에서의 유전상수를 측정하였다. BSTO 박막을 투과

Fig. 6. Complex dielectric constants of the $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ films of (100) and (110) plane in the THz frequency range obtained by ETRI THz-TDS system.

한 테라헤르츠 파형으로부터 $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ 박막의 (110) 및 (100)면에서 복소 유전상수의 실수 및 허수부 값을 측정할 수 있다. <그림 6>은 그 결과로서 0.2~2.0 THz 범위에서 BSTO 박막의 복소 유전상수를 구한 결과를 나타낸 것이다.

3. T-ray 영상

테라헤르츠 파는 투과영상을 얻어내는 X-ray와 비교하여 T-ray로 불리기도 한다. 일반적으로 THz-TDS 시스템에서 영상을 얻어내기 위해서는 테라헤르츠 파를 시편에 2차원으로 주사(scan)하거나 테라헤르츠 파를 고정하고 시편을 주사하는 방법이 있다. 본 실험에서는 시편을 주사하는 방법을 선택하였다. <그림 7>은 수술용으로 사용되는 메스를 대상으로 하여 T-ray 영상을 얻어낸 것이다. 왼편의 영상은 수술 메스의 형태를 일반적인 광학사진으로 나타낸 것이고, 오른편의 영상은 T-ray 영상을 보인 것이다. 이 경우에는 테플론 상자에 수술용 메스를 넣은 채로 테라헤르츠 파를 이용하여 2차원 스캔영상을 얻은 것인데, 테플론 상자는 테라헤르츠 파에 대해 투명하며, 금속제인 수술용 메스는 테라헤르츠를 모두 반사하기 때문에 그림과 같은 투과영상이 얻어진다. T-ray 영상의 해상도는 2차원 스캔의 방법이나 화소의 크기 등에 따라 달라지며, 최대 해상도는 테라헤르츠 파장의 1/2에 해당한다.

REFERENCES

- [5] Se Young Jeong, *et al.*, "Terahertz Detection with Polycrystalline GaAs Films", Tera Tech 09, 2nd International Workshop on THz Technology, Osaka, Japan, 1P-06 (2009).
- [6] Dae Won Kang, *et al.*, "THz dielectric response of ferroelectric $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films with different crystalline orientation", Tera Tech 09, 2nd International Workshop on THz Technology, Osaka, Japan, 1P-50 (2009).
- [7] Seung Beom Kang, *et al.*, ETRI J. **31**, 667 (2009).

Fig. 7. An optical image of a surgeon's knife (left) and the T-ray image (right) of the same knife concealed in a Teflon box.

Fig. 8. A T-ray image of an explosive HMX powder packaged in a Teflon box with ETRI logo shape.

본 실험의 경우 $300\ \mu\text{m}$ 이하의 해상도를 얻을 수 있었다. 1 THz의 주파수에서 파장이 $300\ \mu\text{m}$ 이므로 이 값은 거의 최적의 해상도라고 할 수 있다. <그림 8>은 또 다른 T-ray 영상으로 화약의 종류인 HMX 분말을 대상으로 한 것이다. 화약 분말은 일반 분말과 육안으로 구분이 어렵고 더욱이 밀봉된 상태에서 비파괴로 분석하기는 거의 불가능하므로 이 경우 테라헤르츠파를 이용한 분광 및 영상기법은 훌륭한 해결수단이 된다. 시편은 테플론 상자에 ETRI 로고 모양으로 HMX 분말을 채운 후 밀봉하여 2차원 T-ray 영상을 얻은 것이다. 그림에서와 같이 폭 2 mm의 ETRI 로고가 선명히 나타나고 있으며 이때의 해상도도 $300\ \mu\text{m}$ 내외인 것을 확인할 수 있다. 심지어 화약분말을 고정하기 위해 부착한 셀로판 테이프의 윤곽까지 관찰되는 것을 볼 수 있다. 서로 다른 분말을 사용하여 분광 스펙트럼에서의 차이를 이용한 분광 영상(spectral image)을 얻을 수도 있으며, 이 경우 색상이나 명암을 대비하여 구분하게 된다.

테라헤르츠 연속파 기술

테라헤르츠 연속파 신호원은 무선 데이터전송 및 영상을 위한 목적으로 많이 개발되고 있다. 본 연구실에서는 미래의 초고속 무선 데이터통신을 위한 반송파(carrier frequency)로서 sub-THz파를 개발하고 있으며 THz-TDS 영상과는 다른 형태의 연속파 T-ray 영상을 얻기 위한 테라헤르츠 연속파 신호원을 연구하고 있다.

1. 무선 데이터전송용 Sub-THz CW 기술

머지않은 미래에 대부분의 영상 데이터들은 HDTV급 이상의 고화질로 3D, 4D 등의 형태를 가지게 될 것이다. 이 경우 데이터 전송을 위해서는 최소한 10 Gbps급 이상의 전송속도가 요구되며, 수퍼 비전 등의 초고화질이 되면 100 Gbps급을 요구하게 된다. 현재에도 HDTV 데이터를 압축하지 않고 7개 채널을 끊임없이 무선으로 전송하기 위해서는 10 Gbps 이상의 전송속도를 필요로 한다. 그러므로 이를 만족하기 위해서는 무선 전송용 반송파는 테라헤르츠 영역의 주파수를 가져야 한다.

테라헤르츠 파를 발진하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구실에서는 광전 방식을 이용하였다. 이 방법은 고품질의 저잡음 신호를 얻을 수 있으며 가변성 및 고출력화 등에 있어서 많은 장점을 가지고 있다. 광전 방식은 모드 로킹 레이저(Mode Locking Laser) 기법, 듀얼 모드 레이저(Dual Mode Laser) 기법 혹은 인젝션 로킹(Injection Locking) 기법 및 광반송파가 억제된 양측대역(Double Sideband Suppressed Carrier: DSB-SC) 발생 기법, 주파수 콤(Frequency Comb) 기법 등이 연구되고 있다.^[8-14]

모드 로킹 레이저 기법과 듀얼 모드 레이저 기법의 경우, 광 소자 제작이 어렵고, 소자의 개발비 및 가격 면에서 경쟁

REFERENCES

- [8] Amarildo J. C. Vieira and Peter R. Herczfeld, "Microchip laser for microwave and millimeter-wave generation," *IEEE MTT-S IMOC'97 Proceedings* (1997), pp. 333-337.
- [9] D. Y. Kim, M. Pelusi, Z. Ahmed, D. Novak, H.-F. Liu and Y. Ogawa, *IEE Electronics Letters* **31**, 733 (1995).
- [10] G. Allen Vawter, Alan Mar, Vince Hietala, John Zolper and John Hohimer, *IEEE Photonics Technology Letters* **9**, 1634 (1997).
- [11] S. Fukushima, C. F. C. Silva, Y. Muramoto and Alwyn J. Seeds, *IEEE Journal of Lightwave Technology* **21**, 3043 (2003).
- [12] Hiroyuki Furuta, Mikio Maeda, Toshihiro Nomoto, Jun Kobayashi and Shegeo Kawasaki, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **11**, 19 (2001).
- [13] J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann and R. Hofstetter, *IEE Electronics Letters* **28**, 2309 (1992).
- [14] Guohua Qi, Jianping Yao, Joe Seregelyi, Stephane Paquet and Claude Belisle, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **53**, 3090 (2005).

Fig. 9. A configuration diagram of the generation of the DSB-SC signal and photomixing system.

력이 부족하여 상용화를 위한 실효성이 문제가 되며, 인젝션 로킹 방법은 원하는 신호의 주파수를 얻기 위하여 로킹 과정을 거쳐야 하고 이로 인하여 동작 조건이 까다롭다는 단점으로 인하여 실효성에 제약이 있다. 주파수 콤 기법은 광원과 광 강도 변조기(Optical Intensity Modulator), 광 위상 변조기(Optical Phase Modulator), AWG(Arrayed Waveguide Grating) 및 광혼합기로 구성되어 발생하는 신호의 주파수는 광 위상 변조기와 AWG의 성능에 따라서 가변적이며, 고가의 광 변조기 두 개와 AWG가 필요하다는 단점이 있다.

DSB-SC 방법은 광학적 헤테로다인(Heterodyne) 방식의 일종으로서 그 구성이 단순하며, 원하는 주파수의 신호를 얻기가 상기한 다른 기법들에 비하여 용이하기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다.^[12-14] 하나의 광원(Laser Diode: LD), 광 강도 변조기(Optical Intensity Modulator), 초고주파 대역용 국부 발진기(Local Oscillator: LO), 광혼합기, 그리고 광 필터(Optical Filter)를 비롯한 수동 광 부품 등으로 구성되는 DSB-SC 기법을 이용한 테라헤르츠 연속과 발생 장치의 개념도를 <그림 9>에 나타내었다. 하나의 광원(Optical Source, Laser Diode: LD)은 DSB-SC 기법의 테라헤르츠-파 발생 장치에서 상관관계가 강한 두 개의 서로 다른 파장을 갖는 광 신호를 생성하기 위한 광 반송파(Optical Carrier) 발생원이며, 이러한 광 반송파는 초고주파 국부 발진기에서 출력되어 광 강도변조기로 입력되는 LO 신호에 의해서 양측대역(Double Sideband: DSB) 신호로 변조된다. DSB 신호에 포함되어 있는 광 반송파 신호는 광 강도 변조기에 인가되는 DC 바이어스를 적절히 조절함으로써 억제되어 DSB-SC 신호를 형성한다. DSB-SC 변조된 광 신호가 광혼합기로 입력된 후, 광혼합 과정을 통하여 테라헤르츠파 대역 연속과 신호가 발생된다. 그림에서 LD, MZM, LO, EDFA, 3-dB Coupler, Photomixer, Electrical SA, 그리고 OSA는 각각 광 반송파를 발생시키는 레이저다이오드, DSB 광 신호 발생을 위한 마하젠더 광 변조기(Mach-Zender Optical Modulator), 광 반송파를 DSB-SC 변조하기 위한 국부 발진기, 광 변조기의 삽입 손실과 변조 손실을 보상하기 위

Fig. 10. Experimental results of the generation of the (a) DSB-SC signal and (b) 0.12 THz CW.

한 에르븀이 증착된 광 섬유 광증폭기(Er-Doped Optical Fiber Amplifier: EDFA), 발생된 DSB-SC 신호의 모니터링(Monitoring)을 위하여 설치된 3-dB Coupler, 서로 다른 파장을 갖는 두 개의 광 신호를 비팅(Beating)시켜 밀리미터파 대역 연속과 신호를 발생시키는 광혼합기, LO 신호 모니터링과 광혼합기 출력 신호 측정을 위한 전자 주파수분석기(Electrical Spectrum Analyzer), 그리고 광 신호 분석을 위한 광 주파수 분석기(Optical Spectrum Analyzer)를 나타낸다. 또한, V_{LO} , f_{LO} , V_{DC} , 그리고 V_R 는 각각 국부 발진기 출력의 전압과 주파수, 광 변조기와 광혼합기의 바이어스 전압을 나타낸다.

<그림 9>의 실험 개요도를 이용하여 발생된 DSB-SC 광신호를 광 주파수 분석기(Optical Spectrum Analyzer: OSA) 측정 결과와 테라헤르츠 연속과 발생 결과를 <그림 10>에 나타내었다. 그림에서 λ_c , P_c , λ_{SL} , P_{SL} , λ_{SR} , 그리고 P_{SR} 는 각각 1546.6885 nm의 파장을 갖는 광 반송파, 광변조기의 DC 바이어스에 의하여 최대 억제되어 -6.759 dBm의 파워를 갖는 광 반송파의 전력, DSB 신호 중 광 반송파의 왼쪽에 생성된 측

(a)

(b)

Fig. 11. (a) Measurement system of the sub-THz CW generation and 10 Gbps modulation, and (b) the results of the 10 Gbps modulation measurement.

대역 신호의 파장과 전력, 그리고 DSB 신호 중 광 반송파의 오른쪽에 생성된 측대역 신호의 파장과 전력을 나타낸다. 그림에서 DSB 신호와 광반송파의 신호 크기가 10 dB 이상을 가지므로 광반송파의 역레벨이 적절함을 확인할 수 있다.^[15] 또한, 전자 스펙트럼 분석기(Electrical Spectrum Analyzer)를 이용한 0.12 THz 연속파 신호 측정 결과, 0.12 THz의 중심 주파수에서 약 3.6 kHz의 좁은 반치폭을 가지며, -10 dBm 이상의 안정적인 테라헤르츠 연속파 신호 발생이 가능함을 확인하였다.

발생된 테라헤르츠 연속파 신호를 초고속 무선 통신용으로 사용하기 위하여 상기한 테라헤르츠 파 발생기에 ASK(Amplitude Shift Keying) 변조기를 장착하여 19" 표준 Rack 형태로 THz CW Generator with ASK Modulator Part를 제작하였으며 10 Gbps 변조 특성을 측정하였다. <그림 11>은 테라헤르츠 연속파의 주파수 특성 및 10 Gbps 변조 특성 측정 구성도와 10 Gbps 변조 특성 측정 결과를 나타낸다. 측정 결과, 10 Gbps급 변조가 성공적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 12. A configuration diagram and the real photograph of the THz CW photomixing system for T-ray imaging.

테라헤르츠 연속파 발생 결과는 밀리미터파 이상의 주파수 대역에서 안정적으로 동작할 수 있는 광전 방식의 연속파 발생 기법의 기본적인 데이터로서 그 활용 가치가 높다. 또한, ASK 변조 특성을 포함한 테라헤르츠 연속파 발생기는 향후 HD급 이상의 고화질 영상 데이터의 무압축 전송 및 기간 통신망인 광 통신망과 무선 통신망의 끊임없는 연결을 위한 기본적인 장비로서 효율적일 것으로 기대된다.

2. T-ray 영상용 테라헤르츠 연속파 시스템

테라헤르츠 연속파를 이용한 영상은 펄스와 영상에 비하여 소형/저가격으로 구성할 수 있으며, 가변(tunable) 레이저 광원을 사용함으로써 영상을 획득하는 테라헤르츠 파의 주파수 대역을 제어할 수 있다. 본 연구에서는 850 nm 대역용 두 개의 DFB-LD(Differential feedback-Laser diode)와 광혼합소자를 이용하고 광혼합방식을 기반으로 테라헤르츠 연속파를 생성하였다. 여기에 사용된 광혼합소자는 LT-GaAs 소재

REFERENCES

- [15] Sungil Kim and Kwang-Yong Kang, The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science **20**, 974 (2009).

Fig. 13. Simulation results of the frequency tuning range (top) and the amplification of the output power (bottom) of the THz CW.

Fig. 14. Measurement of the output power of the THz CW signal obtained with the photomixer.

에 광전도안테나를 모놀리식하게 집적하여 구현하였다. <그림 12>는 테라헤르츠 연속파 시스템의 개요도 및 실제의 구성도를 나타낸 것이다. 양질의 신호대 잡음비를 가지는 테라헤르츠 연속파 영상시스템을 구축하기 위하여, 레이저에 간섭계를 사용한 FCS(Feedback control system)과 실리콘 반도체를 이용한 증폭기를 자유공간을 통하지 않고 광섬유로서 연결하

여 구축하였다. 그리고, 광섬유의 출력을 광혼합 소자에 집속한 후, 테라헤르츠 신호를 정렬할 때 광섬유의 광출력 집속 위치가 이동(변화)하지 않게 하기 위한 레이저 집속 부품과 광혼합 소자를 일체형 모듈로 개발하였다.

이와 같이 개발된 전체 시스템의 구성은 다음과 같이 세 블록으로 나눌 수 있다.

- ▶ 블록 1: Laser & Feedback Control System
- ▶ 블록 2: Laser Amplifier & Laser State Checking System
- ▶ 블록 3: CW-THz Spectroscopy & Imaging Setup using Fiber Output

두 개의 DFB-LD와 피드백 간섭계를 이용하여 레이저가 동일한 출력값을 가지면서 0~1500 GHz까지 안정적인 출력을 내는 것을 확인하였으며, 두 개 레이저의 비트 주파수(Beat Frequency)가 0 GHz일 경우의 출력은 비트 주파수가 100 GHz 이상일 때의 개별 출력의 두 배임도 확인하였다. 또한, 비트 주파수를 100 GHz에 고정하고, 실리콘 반도체 증폭기(BoosTA)의 구동 전류를 700 mA에서 1900 mA까지 증가시키며 따라 반도체 증폭기를 거쳐 1×2 광섬유 분리기에 결합된 Tx 및 Rx 포트에 나오는 광섬유 최대 출력은 각각 9 mW에서 42 mW로 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 광출력의 가변 및 증폭에 대한 특성을 <그림 13>에 나타내었다. 그리고 <그림 14>는 테라헤르츠 연속파 시스템에서 포토믹서를 이용하여 0.1~1 THz 대역에서 측정된 연속파출력을 나타낸 것으로, 본 시스템의 안정성을 확인한 결과이다.

맺음말

테라헤르츠 파를 이용한 시간영역 분광 및 영상기술, 그리고 미래를 위한 초고속 무선 데이터전송기술에 대하여 본 연구실의 연구개발 내용을 중심으로 살펴보았다. 이미 일부 영상장치 기술은 상품화하여 시장을 형성하고 있기도 하지만 대부분의 테라헤르츠 기술은 현재보다는 미래를 전망하면서 개발되고 있는 실정이다. 본 글을 통하여 테라헤르츠 기술의 중요성 및 시급성에 대한 인식이 좀 더 깊어지고, 보다 많은 연구자들의 동기부여가 될 수 있기를 기대한다. 이미 미국, 일본, EU 등의 과학기술 선진국에서는 2000년대 초기부터 많은 연구투자를 하여 상당한 수준의 기술을 확보하고 있으며 미래를 책임질 수 있는 기대기술로서 가치를 부여하고 있다. 정보통신, 의료, 보안, 생명공학, 농식품, 환경, 에너지, 우주항공 등 거의 전 분야에 걸쳐 그 응용범위가 확대되고 있는 기술로서 테라헤르츠 기술의 연구개발이 더욱 활성화되기를 희망하면서 본 글을 맺고자 한다.