테라헤르츠 통신: 동향과 전망

DOI: 10.3938/PhiT.19.011

조영달·이종수

Terahertz Communications: Trends and Perspectives

Young-Dahl JHO and Jongsoo LEE

We discuss the development trends and perspectives for the THz frequency band for communications. On the basis of the transmission speed trends which continue to expand, there is a need to supplement present microwave and millimeter wave bands with THz carriers in 10 to 15 years to come. The development of sources and detectors for THz communications are introduced in general terms and the 60-GHz-band wireless systems are also presented rather in the technical viewpoint. The recent tendency of THz technology fused with other areas are briefly summarized together with future perspectives in the end.

서론

인류 문명의 발달은 다양한 전자기파의 활용과 궤를 같이 해 왔다: 예를 들어, 에디슨의 백열전구(1879)나 쾰른의 X-ray의 발명(1895)은 누구라도 알 만한 인류의 위대한 업적으로 평가된다. 라디오파의 특허 출원이 1896년인 점을 감안하면, 다양한 주파수 대역의 전자기파의 발견과 활용은 이미 오랜 역사를 가지고 있다. 또한, 반도체 문명의 시작이 된 1950년대의 트랜지스터의 등장과 1960년대 이후의 레이저를

위시한 다양한 광공학 소자 기술의 등장에 힘입어, 인류는 X-ray부터 라디오파에 이르는 넓은 영역의 전자기파를 발생 혹은 활용할 도구를 작은 크기의 반도체를 통해 구현하고자 노력해왔다.

일반적으로 0.1테라헤르츠(terahertz; THz)에서 10 THz의 주파수 대역으로 분류되는 테라헤르츠 영역은, 전자공학적으로 접근하는 라디오파나 광소자적으로 접근하는 적외선 영역에 둘러싸여 있으며, 활용하기엔 다양한 난제를 안고 있는 것으로 평가되어 기술적 공백 영역(technological gap)으로 불리어 왔다. 이러한 테라헤르츠 관련 기술은 1975년의 D. H. Auston의 실리콘에서 피코초 속도의 광-전도 스위칭 구현^[1]과 1984년 보고된 Auston 안테나^[2]의 개발 이후, 여러 가지 기술 혁신이 현재까지 이루어지고 있다. 이러한 테라헤르츠 주파수 대역에서 발진, 측정, 변조 소자를 개발하고 이를 응용하고자 하는 테라헤르츠 기술은, 최근 들어 광공학 기술·나노 반도체 기술과 융합을 통한 혁신이 이루어지면서 그 응용 범위가 확대되는 추세이다.

대표적인 테라헤르츠 기술(Terahertz technology) 응용의 예로는, 기술 초창기와 연장선상에 있는 반도체와 신소재에 대한 분광학적 연구뿐만 아니라, 이미징 기술을 응용한 의료·바이오·보안 기술 등이 있다. 또한, 분석과학을 활용한 유해가스(NO_x, CO, 등) 측정, 대기 흡수가 크고 지향성이 큰 영역을 활용해 도청이 불가능한 군사용 무선 통신 활용도 제안된 바 있다.^[3]

테라헤르츠파의 광범위한 응용은 마이크로파나 광파가 투과할 수 없는 물질을 쉽게 투과하고 에너지가 매우 낮아 비파괴적인 특성을 지니고 있으며, 통신의 관점에서는 아직 상업적 활용이 되지 않은 마지막 영역이기 때문이다. 그 중요성은, 미국 매사추세츠 공대(MIT)의 테크놀로지 리뷰(Technology

저자약력

조영달 교수는 서울대학교 박사(2002)로서, 미국 국립고자기장연구소(NHMF) 박사후 연구원과 플로리다 대학 선임과학자(2002-2007)를 거쳐, 2007년부터 현재까지 광주과학기술원 정보통신공학과 교수로 재직 중이다. (jho@gist.ac.kr)

이종수 교수는 한국과학기술원 박사(2001)로서, 미국 조지아텍 연구원(2003-2004)과 RF Micro Devices (미국, 피닉스, 2004-2007)의 선임 연구원을 거쳐, 2007년부터 현재까지 광주과학기술원 정보통신공학과 교수로 재직 중이다. (jlseerf@gist.ac.kr)

REFERENCES

- [1] D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. **26**, 101 (1975).
- [2] D. H. Auston, Phys. Rev. Lett. **53**, 1555 (1984).
- [3] R. E. Miles et al. (eds.), *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects* (Spring, 2007), p. 325.

Review)의 2004년 2월호에 소개된 세상을 바꿀 떠오르는 10대 기술^[4]로 소개되면서 관심이 고조된 바 있으며, 최신 기술 관련 잡지^[5]에서도 자주 소개되고 있다. 이렇듯, 주요 기술로 분류되면서도 저가의 고출력 광원의 부재는 이 분야의 발전을 더디게 하는 주요 요인이다. 관련하여, 1 THz의 주파수에 해당하는 4 meV의 에너지는 절대온도로 약 70 K에 해당한다; 상온에서의 열에너지(~26 meV)에 비해 매우 작아 상온 동작 테라헤르츠 레이저 발진이나 광학적 여기에 의해서는 쉽지 않으며, 측정 소자 역시 많은 경우 저온 냉각이 필요함을 짐작할 수 있다. 또한, 대기 중의 수증기에 의한 흡수가 큰 점은 장거리 통신에는 장애 요인이다.

전자소자적 관점에서 보면, 갈륨비소나 인듐비소에 기반한 전계효과 트랜지스터(Field effect transistor, FET) 경우는 빠른 전자의 포화 속도에 힘입어, 소자의 크기를 현재 실현 가능한 5 nm 스케일까지 줄인다면 차단 주파수(cutoff frequency)를 1 THz 이상으로 확장^[6]할 수 있어 나노소자 제작 기술의 발달과 더불어 테라헤르츠 소자 기술의 개발이 향후 기대된다. 이 소개글에서는 본 논문에서는, 초고속 주파수 특성을 활용한 무선 통신 관련 기술의 동향을 소개하고 미래 전망에 관해 논의하고자 한다.

테라헤르츠 통신의 개념과 속도 추이

테라헤르츠 통신은, optical carrier를 활용하여 전송물을 테라비트급으로 고속화하는 기술과 구별되는, THz carrier를 이용한 통신을 의미한다. 300 GHz까지 대기 중 흡수가 적음에 따라, 무선 통신 carrier로 고려되어 미국의 경우 주파수가 할당되었다.^[7] 300 GHz 이상 영역은 표준화가 진행 중^[8]이며, 대기 흡수를 피해 육내 근거리 무선 통신 영역에 국한되어 활용될 것으로 예상된다. 또한, 지형적인 이유로 유선 통신선 설비를 구축할 수 없는 경우에, 테라파 통신이 대용량 무선 전송의 대안 역할을 하리라 기대된다.

최초의 THz carrier에 의한 데이터 전송은 독일 Braunschweig 대학의 M. Koch 교수 그룹이 펄스 레이저를 이용한 THz 시분해 분광학(time-domain spectroscopy)을 응용하여 근거리(~2 m)에서 시현하였고,^[9] 60 GHz 대역을 사용하는 근거리 무선 통신(wireless personal area network, WPAN)의 경우 IBM에 의해 최초로 상용화 된 바 있으며, IEEE 802.15 Task Group 3c에 의해 2010년 표준화가 예정되어 있다. 이와 관련한 기술적 사항은 “통신 응용 경향 개괄: 상용화된 60 GHz 무선 통신을 중심으로”에서 자세히 다루고자 한다. 또한, 일본의 NTT는 2006년 120 GHz 대역을 활용하여 10 Gbps HDTV 신호 전송을 보고한 바 있으며,^[10] 이는 광전소자인

Fig. 1. Yearly transmission speed trends based on standardization, compared with laboratory-based wireless demonstration. [Source: Ref. 12]

UTC-PD(uni-traveling carrier-photodiode)나 HEMT(high electron-mobility transistor) MMIC(microwave monolithic integrated circuits)를 사용하여 송신기로 활용하고 있다.^[11] 이렇듯, 테라헤르츠 통신은 그 기술의 초창기며, 미국·독일·일본 등을 중심으로 기술 선점이 이루어지고 있다.

위에서 언급된 선도적인 테라헤르츠 근접영역의 무선 통신 속도 추이는 그림 1의 점선으로 표시된 바와 같이, 기존 무선 통신(wireless LAN)에 비해 상대적으로 빠르며 유선 광통신(Ethernet, PON)과 맞먹는 속도로 발전하고 있다.^[12] 여기서 주목할 점은, 유선 무선 공히 반도체 트랜지스터에 적용된 바 있는 Moore's law에 비견될 만한 속도 증가 추세를 보이고 있다는 점이며, 현 추세대로 근거리 무선 통신 속도가 증가하려면 2020년대에는 300 GHz의 carrier 발생과 10 Gbps에 이르는 데이터 전송률이 요구된다. 이에 따라, 주파수의 초고속화를 통한 테라헤르츠 대역의 carrier 발생과 관련 기술과 제반 인프라 구축이 필수적이다.

참고문헌

- [4] Technology review, "10 Emerging Technologies That Will Change Your World", MIT Tech. Rev. (<http://www.technologyreview.com/article/13438/>).
- [5] See, e.g., "Special Edition for THz Herz Technology", IEEK Magazine, July issue (2009).
- [6] See, e.g., Microw. Opt. Techn. Lett. **26**, 279 (2000).
- [7] See: <http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allocchr.pdf>.
- [8] See, e.g., IEEE802_15_08_0133_00_0thz.
- [9] Kleine-Ostmann *et al.*, Electron. Lett. **40**, 124 (2004).
- [10] A. Hirata *et al.*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques **54**, 1937 (2006).
- [11] See: <http://www.ntt.co.jp/milab/en/project/index.html>.
- [12] H. Takahashi *et al.*, NTT Tech. Rev. **7**, 1 (2009).

Fig. 2. THz-emission power as a function of frequency. IMPATT diode stands for impact ionization avalanche transit-time diode, MMIC stands for microwave monolithic integrated circuit, TUNNET stands for tunnel injection transit time and the multiplexer is an SBD frequency multiplier. [Source: Nature Photonics, 1, 97 (2007)]

관련 기술 개괄

테라헤르츠 통신에 활용될 수 있는 발진 소자는 주요 핵심 기술로서, 그림 2에서 주파수 대역별 출력이 개괄되어 있다. 발진 소자의 연구 방향은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있는데, 첫 번째는 광전자 소자로 빛의 파장을 테라헤르츠 영역으로 변환하는 Top-down 형식의 접근 형태로 Quantum cascade laser나 Photo-mixing을 활용한 UTC-PD^[12] 등의 예가 여기에 해당한다. 두 번째는 전자소자로 기존의 밀리미터 파장에서의 발진을 고주파화하여 테라헤르츠 영역의 전자기파를 발진하도록 하는 경우이다. 이는 Bottom-up 형식으로 InP Gunn diode, GaAs Schottky diode, III-V MMIC[HEMT 혹은 Heterojunction Bipolar Transistor(HBT)와 같은 전자소자 활용]가 그 예가 될 수 있다. 현재, 기술적으로 중요한 60 – 300 GHz 영역에서는, UTC-PD와 MMIC가 중요한 역할을 하리라 예상된다. UTC-PD는 레이저 광원에 의해 (정공을 제외) 여기된 전자의 균일한 가속을 통해 테라헤르츠 발진을 얻는 구조다. UTC-PD는 비교적 소형화가 쉬우며, 넓은 밴드 폭에도 높은 발진 효율을 나타내어 앞으로 많은 활용이 기대된다.

전자소자인 MMIC의 경우는, 최근 비약적으로 발전하는 중이며 MIT의 del Alamo 교수 그룹의 600 GHz 영역 HEMT 발진 소자^[15]나 InP HEMT를 응용한 120 GHz 무선 통신 시스템을 시현한 NTT의 경우^[12]는 주목할 만하다. MMIC 기술의 소재로는 III-V족 화합물뿐만 아니라 Si이나 SiGe이 물질

Fig. 3. THz frequency-sensing schemes for (a) pulses THz waves based on photo-conductive antenna (b) CW THz waves by using interferometer.

이 활용되면서 광범위한 응용에 필요한 안정적 성능을 확보해나가기 시작했다. HBT와 HEMT를 이용한 MMIC 기술은 참고문헌 [13,14]에 자세히 소개된 바 있다. 안정성·고출력과 더불어 테라헤르츠 발진 소자에서 중요한 또 다른 이슈는 소자의 소형화가 있으며, 이는 리소그래피 등 관련 기술을 통한 대응과 더불어 접촉 저항 등의 소형화에 따른 내부 파라미터에 대한 대응 연구 또한 중요한 점이다. 이와 관련하여, quantum cascade laser의 경우는 I) 저온 장치의 필요성과 II) 동작 주파수가 1 THz 이상이므로 통신응用に 난제를 갖고 있다. Free Electron Laser나 분자 가스 THz 레이저 등은 가격이나 크기를 고려하여 정보 통신 응용에는 한계를 지니고 있다.

테라헤르츠 대역 센싱 기술도 소형화가 필수적이며 이는 실제 응용의 관점에서는 앞으로 해결해야 할 주요 과제 중의 하나이다. 상대적으로 테라헤르츠 주파수의 측정 기술은 램프 등의 thermal 광원을 이용하는 Fourier transform IR(FTIR) spectrometer 등의 연구를 통해 활용되면서 오랜 역사를 가지고 있다. 그림 3은 테라헤르츠 대역 신호 측정의 대표적인 두 가지 예를 보여주고 있는데, 3(a)는 펄스 레이저로 발진

REFERENCES

- [13] J. S. Lee, IEEK Magazine **36**, 820 (2009).
- [14] T. J. Jeong *et al.*, Elec. Tele. Trends **24**, 929 (2009).
- [15] D. H. Kim and J. A. del Alamo, IEEE Electron Device Letters **29**, 830 (2008).

소자를 여기한 후 발생하는 펄스 형태의 테라헤르츠 신호 측정의 경우이고 3(b)는 지속파 테라헤르츠 신호 측정을 위한 간섭계의 개념도이다. 펄스레이저에 의해 발진된 테라헤르츠 파의 경우 photo-conductive antenna를 활용하여 시간의 함수로 전기장의 크기와 방향 변화를 모니터링하며, 주로 분광학과 이미징에 활용이 되고 있다. 지속파 신호의 측정의 경우, 고전적이면서도 대표적인 방법이 그림 3(b)와 같은 간섭계를 이용하는 방법이다. 이 경우 delay line에서 발생하는 위상차에 따라 생기는 파동간의 간섭현상을 이용한다. 측정 장치로 쓰인 bolometer는 측정 신호의 크기에 따라 Pyroelectric detector나 Golay cells 등의 측정 소자로 대체 되면 소형화가 가능하다. 최근에 발표된 트랜지스터 기반 소자^[16]는 소형 THz detector의 가능성을 보여주고 있으며, 연구 개발이 더욱 진행되어야 할 분야이다.

통신 응용의 주요 요소로서 modulator도 매우 중요하다. 반도체 기반 modulator^[17]가 보고된 바 있으나, 저온 동작의 단점을 지니고 있다. 최근 들어, metamaterial를 이용한 modulator가 테라헤르츠 파장 영역에서 개발되어 주목을 받은 바 있으며,^[18] metamaterial 등의 적극적 활용은 테라헤르츠 분야 전반에 고무 연구 활용되리라 기대된다. 관련하여, 위상 조절 기술도 중요한데 liquid crystal을 이용한 연구가 보고된 바 있다.^[19]

통신 응용 경향 개괄:

상용화된 60 GHz 무선 통신을 중심으로

무선 통신의 관점에서 현재 가장 상용화에 근접한 테라헤르츠 분야는 60 GHz 대역을 사용하는 근거리 무선 통신(wireless personal area network, WPAN)으로써 미국 IBM이 2000년대 초반부터 매우 활발한 연구를 진행하고 있으며 상용화 제품을 선보이고 있다.

60 GHz의 무선 통신용 송·수신 시스템을 구현하기 위하여 필수적인 테라헤르츠용 반도체 소자는 전통적인 화합물 반도체(InP 계열), 나노미터급 Si CMOS 반도체 소자, 그리고 SiGe HBT를 기반으로 하는 반도체 소자 기술로 크게 나눌 수 있으며 대량 생산, 가격, 집적화 등 다양한 기술적 요소를 고려할 때 Si CMOS 혹은 SiGe HBT가 향후 테라헤르츠급 시스템의 핵심 반도체 기술이 될 가능성이 크다. IBM은 T. J. Watson 연구소를 중심으로 자사의 130 nm급 SiGe HBT 반도체 기술을 활용하여 60 GHz WPAN용 무선 송, 수신기 개발을 완료한 바 있다.^[20,21]

테라헤르츠급 무선 통신 시스템에 사용되는 IBM사가 보유한 나노미터급 SiGe HBT의 주파수 특성이 그림 4에 정리되

Fig. 4. Cutoff frequency of IBM SiGe HBT as a function of collector current density. Inset figure shows the cross-sectional diagram of HBT. [Source: Ref. 20]

어 있다. SiGe HBT는 기존의 Si CMOS에 비하여 매우 우수한 주파수 특성 및 잡음 특성을 보이며 동일한 크기의 트랜지스터에서 보다 높은 이득과 출력 전력을 얻을 수 있는 장점이 있다.

IBM은 자사의 SiGe HBT 기술을 이용하여 WPAN용 무선 통신시스템을 개발하였으며^[21] 이를 이용한 시스템 실현도 성공적으로 구현하였다. 그림 5는 IBM에서 개발된 시스템의 블록도 및 제작된 칩의 사진을 나타낸다. 130 nm SiGe BiCMOS 기술을 사용하여 하나의 송신기 칩과 하나의 수신기 칩으로 전체 시스템의 크기를 매우 소형화할 수 있으며 SiGe HBT를 사용함으로써 매우 우수한 전기적 특성을 얻을 수 있다. IBM은 130 nm급 SiGe 반도체 기술을 이용하여 근거리 무선 통신에 사용되는 모든 회로 블록을 하나의 반도체 칩에 구현하였고, 이를 바탕으로 근거리 무선 통신 시스템 구현을 하였다.

그림 6은 상용화되어 있는 반도체 칩을 이용하여, 2미터 거리를 두고 송신기와 수신기를 각각 설치한 후 quadrature phase shift keying(QPSK) 방법으로 변조된 신호를 송신하고 이를 60 GHz 대역의 안테나로 수신 후 다시 신호를 복조하는 시스템의 예로서, 본 저자들이 광주과학기술원에서 개발

REFERENCES

- [16] W. Knap *et al.*, Appl. Phys. Lett. **85**, 675 (2004).
- [17] R. Kersting, Electron Lett. **36**, 1156 (2000).
- [18] H. T. Chen *et al.*, Nature Photon. **3**, 148 (2009).
- [19] C. Y. Chen *et al.*, Opt. Exp. **12**, 2625 (2004).
- [20] A. Joseph *et al.*, "60 GHz Multi-Gigabit short range wireless connectivity," IWPC Workshop, Washington DC (2006).
- [21] B. Floyd *et al.*, ISSCC Dig. Tech Papers, Feb. (2006), pp. 184-185.

Fig. 5. 60 GHz WPAN system block diagram and relevant chip images developed by IBM. [Source: Ref. 21]

Fig. 6. 60 GHz wireless communications system developed at GIST. O/E is optical to electronics conversion, LNA low noise amplifier, BPF band pass filter, and PA power amplifier.

중인 시스템이다. 이 경우는, 60 GHz 대역의 테라헤르츠급 무선 통신 시스템을 대용량 바이오 영상 전송 시스템에 적용하여 그 응용 분야에 관해 연구를 진행하고 있다. 그림 6의 통신 단위 블록도에서 소개되듯이, 데이터를 광신호(optical signal)로 변조시킨 후 이를 다시 전기 신호로 변환하고, 60 GHz 송·수신 시스템을 통해 근거리 무선 AP(access point)로 전송하는 연구를 진행하고 있다. 2미터의 근거리에서 최대 155 Mbps(bit per second)의 전송 속도를 나타내고 있으며(IBM의 경우 200 Mbps) 송, 수신기 중간에 방해 물체가 존재하더라도 최대 전송 속도를 얻을 수 있는 시스템을 구현함

으로써 테라헤르츠급 무선 통신이 실생활에 활용될 수 있다는 잠재력을 보여준다.

IBM 이외에도 미국의 인텔과 모토로라, TowerJazz semiconductor, 그리고 필립스 반도체를 인수한 NXP 등 세계 유수의 반도체 회사들은 각자 Si CMOS 혹은 SiGe HBT 반도체 기술로 60 GHz 무선 근거리 통신 및 77 GHz 차량 충돌 방지 시스템 등 그 사용 주파수를 점점 높여가고 있으며 조만간 실생활에 적용되는 일이 그리 멀지 않을 것이다.

국내에서 수십 GHz 대역 이상의 테라헤르츠급 송·수신 시스템에 관한 연구는 대학과 연구소 등에서 Si CMOS와 InP HEMT 기술을 이용한 60 GHz 대역과 300 GHz 대역의 송, 수신 시스템 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 테라헤르츠 응용 시스템은 무선 대용량 고화질 영상 전송이나, 유선 연결이 불가능한 경우의 비도심이나 빌딩 간 통신, 병원에서의 원격 의료 등에 적용될 수 있다.

전 망

최근 들어 테라헤르츠 기술에서 두드러진 경향은 HBT, HEMT 등의 전자소자의 전면적인 활용과 신물질에 대한 연구이다. 신물질 연구의 대적인 예 중 하나가 그래핀이라고 할 수 있다. 실제로 MIT의 연구진 등은 그래핀이 전기적인 신호의 크기를 증폭시킬 수 있는 주파수 증대기(frequency multiplier)에 활용 가능성을 이론적으로 예측한 바 있고,^[22]

FET 구조를 활용한 측정 소자도 제시되었다.^[23] 이를 이용하면 나노물질을 이용한 초소형 테라헤르츠 디바이스의 구성이 가능하고, 나노기술의 IT 활용의 새로운 전기가 마련될 수 있을 것이다.

또한 최근 각광을 받고 있는 금속 기반의 metamaterial이나 플라즈몬계 물질 등을 이용하여 테라헤르츠파를 조절 활용하는 기술 연구가 활발하다. 메타 물질을 이용한 테라헤르츠 레이저 발전^[24]은 반도체 기술과 메타물질 활용의 유용한 예로써 크게 주목받았다. 유타 대학의 연구팀은 플라즈몬계 메타물질을 이용하여 테라헤르츠파를 선택적으로 투과시킬 수 있는 테라헤르츠파 필터와 같은 테라파 통신 디바이스를 실현하였다.^[25] 메타물질을 이용하여 테라헤르츠파를 modulation 할 수 있는 기술^[26]도 최근 들어 보고된 바 있다. THz carrier를 이용한 무선통신에는, modulation 고속화가 중요한 요소 기술이다.

또 다른 기술적 관점에서 보면, 무선 통신 carrier의 초고속화 특성과 더불어 주목할 점은, i) 인터넷을 위시한 유선 전송에 있어 아파트 단지까지 광케이블을 포설하는 FTTH(Fiber to the home)의 전면적인 사업화, ii) 아파트단지 입구 등에 무선 안테나를 세워 각 가정까지 따로 선을 연결하지 않고도 초고속인터넷, 영상전화, 주문형비디오(VOD) 등의 다양한 대용량 서비스를 제공할 수 있는 무선통신기술, 이른바, 광대역 무선가입자망(Broadband Wireless Local Loop)의 등장이다. 이는, 유선과 무선의 융합화가 중요하며, 현재 한국의 B-WLL 서비스는 26 GHz 대역(밀리미터파 영역)을 사용하나, 현재 통신 속도 발전 추이에 비추어 보아 100 GHz의 테라파 영역으로의 고속화가 2020년대를 대비한 당면과제이다. 일본 NTT의 경우 유선 전송 끝단 사이에 적용하는 120 GHz 대역 무선 통신을 2008년에 이미 시현한 바 있고, 런던 국립 대학교의 Alwyn J. Seeds 그룹에서는 1.55 μm 도파관 구조를 도입하여 끝단에서는 800 GHz의 발전이 가능한 집적소자 구현의 가능성을 발표한 바 있다.^[27] 이렇듯, 유선 광통신 기술과 테라파 대역의 무선 통신 기술의 융합이 앞으로 다양하게 연구될 것으로 보인다.

결 론

기본적으로 미래의 무선통신 시스템은 짧은 시간 안에 많은 정보를 처리해야 하기 때문에 필연적으로 기존에 사용하는 주파수보다 고주파를 사용할 수 밖에 없게 되고, carrier의 GHz에서 THz의 이동은 정해진 방향이라 할 수 있다. 이에 따라, 테라헤르츠파를 발생시키고 측정하는 기본적인 디바이스의 발전에서부터 테라헤르츠파 통신을 구현하기 위한 시스템과 기반 하드웨어를 구성하는 데 이르기까지 이 분야의 과급 효과는 매우 크며, 전자공학·광공학 기술의 적극적인 활용을 통해 cutoff 주파수가 THz에 근접한 MMIC, modulator, 통신 시스템 개발의 연구 개발이 지속적으로 추진될 것이다.

또한, 신물질과 메타물질들의 연구를 통해 얻은 지식이 기존의 통신 기술에 접목되어 테라헤르츠 영역 소자 기술의 융합화가 진행되리라 예상되며 궁극적으로 근거리 무선 통신이나 유선 광통신과의 결합을 통해 현재의 통신 환경이 진화될 것으로 전망된다.

미국, 독일, 일본을 위시한 통신관련 선두 그룹들은 현재 진보된 나노미터급 반도체 소자를 이용하여 실현 가능한 테라헤르츠 무선 통신 시스템 개발에 매우 근접한 상태로서, 국내에서도 테라헤르츠 과학과 기술의 통신 활용 기술을 위하여 소자, 공정, 회로, 그리고 시스템 연구 등의 체계적인 연구와 저변확대가 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

- [22] See: <http://physicsworld.com/cws/article/news/38384>.
- [23] V. Ryzhii *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 245311 (2009).
- [24] Y. Chassagneux *et al.*, Nature **457**, 174 (2009).
- [25] See: <http://www.technologyreview.com/Infotech/18475/?a=f>.
- [26] H.-T. Chen *et al.*, Nature Photon. **3**, 148 (2009).
- [27] C. C. Renaud, *et al.*, Proceedings of SPIE, **6194**, 61940C (2006).