가속기를 이용한 펨토초 테라헤르츠 펄스의 발생과 응용

DOI: 10.3938/PhiT.19.012

박 재 현

Generation and Application of fs-THz Pulses Based on Linear Accelerator

Jaehun PARK

The generation and detection of intense THz radiation has drawn a great attention recently. The dramatically enhanced energy, peak power, and peak electric field of the coherent THz radiation can be generated from the coherent superposition of the radiated fields emitted by ultrafast electron bunches. The fs-THz beamline at PAL (Pohang Accelerator Laboratory) can supply ultrafast and intense fs-THz radiation from 75 MeV linac (linear accelerator). The radiation is expected to cover up to 3 THz ($\sim 100 \text{ cm}^{-1}$) and the pulse width to be less than 200 fs. This intense THz source has a great potential for applications in nonlinear optical phenomena as well as material science, nano science, biomedical science, chemistry, physics, imaging, security, etc.

서 론

전자기 분광 스펙트럼에서 테라헤르츠(THz)(1 THz $\sim 33 \text{ cm}^{-1}$ or 4 meV) 영역은 중적외선(mid-infrared)과 초고주파(microwave) 영역 사이에 위치하고, 빛과 전자기파의 성질을 모두 갖고 있기 때문에 기초 과학 연구뿐 아니라 응용 분야에서도 매우 흥미로운 연구 대상이다. (그림 1 참조)

테라헤르츠 광원을 이용한 연구 분야는 물리, 화학, 나노과학, 생명과학으로부터 정보, 환경, 우주과학과 국방, 보안에 이르기까지 다양하다. 그럼에도 불구하고 테라헤르츠 영역이 아직까지 미개척 영역으로 남아 있는 이유는 테라헤르츠 광원과

저자약력

박재현 박사는 아이오와 주립대학교에서 펨토초 레이저를 이용한 광생물 광물리 연구로 물리화학 박사학위를 취득한 후(2001), 펜실베이니아 대학교 연구원(2001-2005)을 거쳐 2005년부터 포항가속기연구소에서 선임연구원으로 재직 중이며 fs-THz 분광 비라인을 맡고 있다. (jaehunpa@postech.ac.kr)

Fig. 1. THz radiation band and major applications of the frequency band.

검출장치에 대한 연구가 다른 영역들에 비해 상대적으로 미약했기 때문이다.

근래 들어 테라헤르츠 영역에 대한 관심이 증가되며 광원과 그 응용에 대한 연구가 꾸준히 증가하고 있다. 미국의 경우 여러 대학에서 레이저를 이용한 테라헤르츠의 발생 연구가 한창이고 선형 가속기와 저장링을 이용한 테라헤르츠의 발생 및 응용에 관한 연구도 점점 활발히 진행되어져 가고 있다. 유럽의 경우 여러 대학들과 연구소가 컨소시엄을 구성하여 집중적인 연구를 하고 있는데, Teraview나 Teravision 같은 회사는 이미 테라헤르츠 기술을 이용한 의료 및 이미지 장비를 비롯하여 여러 가지 다양한 기초 및 상업용 장비들을 출시하고 있다. 국내의 테라헤르츠 연구 기반은 아직 미약한 편인데 POSTECH, 서울대, 광주과학기술원, KAIST, 아주대, 한국해양대, 서울시립대 등의 대학과 전기연구원, 원자력연구원, 전자통신연구원, 포항가속기연구소 등의 연구소를 중심으로 연구가 진행되어지고 있다.

지금까지 테라헤르츠 관련 연구는 펨토초 레이저를 이용한 테라헤르츠 광원의 개발과 이의 응용이 주를 이루고 있었는데, 발생된 1 μJ 이하의 저출력 테라헤르츠 광원은 주로 스펙트럼 측정 후 굴절률이나 흡광계수 같은 물질의 특성을 알아내거나 테라헤르츠 이미징에 사용되어져 왔다. 최근 들어 강력한 테라헤르츠를 사용한 새로운 science를 찾는 연구가 시작되었고 이 저출력의 한계를 극복하기 위한 한 방법으로 가속기를 이용한 테라헤르츠 광원의 발생에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 독일의 BESSY II와 DESY, 그리고 미국의 NSLS와 Jlab 등의 연구소에서 저장링(storage ring)이나 선형가속기(Linac)를 이용한 고출력 테라헤르츠 빔

(high-power terahertz beam)의 발생과 응용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 선형가속기에서 가속된 초고속 전자 빔으로부터 결맞음 방사(coherent radiation)를 사용하여 광대역(broad band)을 갖는 고출력 테라헤르츠 빔을 발생시키는 연구가 진행되어지고 있다.^[1]

현재 테라헤르츠 빔은 공항 보안 검색에서부터 생물학적 영상(biological imaging)과 초전도체(superconductors)에 관한 연구까지 다양한 분야에서 응용이 시도되고 있다. 또한 원자 내에서 혹은 분자간의 상호 작용 시 일어나는 빠른 변화나 초고속으로 일어나는 스핀 현상 등의 기초 연구를 위해서 초고속의 테라헤르츠 펄스가 사용되어진다. 포항가속기연구소에서는 75 MeV의 선형가속기로부터 발생되는 고출력 펨토초 테라헤르츠 광원의 발생을 위한 빔라인이 2009년 말 완공되었고 2010년 전반기에 커미셔닝을 거쳐 하반기에는 이용자 지원을 시작할 예정이다. 강력한 펨토초 테라헤르츠 빔을 이용한 분광학적인 방법을 사용하여 여러 가지 물리, 화학 물질에서의 비선형 현상과 화학, 생물학적인 반응 동력학(Chemical and biological reaction dynamics), 그리고 스핀 동력학 등에 관한 연구와 영상(imaging) 기술 개발 등을 수행할 계획이다.

본 기고에서는 포항가속기연구소에서 건설 중인 테라헤르츠 빔라인에 대한 소개와 앞으로의 응용 등에 대하여 소개하고자 한다.

fs(femtosecond)-THz 빔라인 설계

3 THz의 밴드폭을 갖는 펄스폭 200 fs 이하의 테라헤르츠를 얻기 위하여 100 fs 미만의 번치 길이를 갖는 상대론적 전자빔이 사용되어진다. 상대론적 전자빔으로부터 모든 파장의 빛이 방출되지만 번치길이가 같거나 긴 파장의 빛만이 결맞음 상태로 나온다.

N_e 개의 전자로 된 번치로부터 방사된 빛 중에서 파장 λ 의 total spectral power는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\lambda) = p(\lambda) N_e [1 + (N_e - 1)f(\lambda)],$$

$p(\lambda)$ 는 하나의 전자로부터 방출되는 spectral radiation power이고 $f(\lambda)$ 는 실제 입자분포의 푸리에 변환(fourier transform)을 나타내는 form factor이다. Square bracket 내의 첫 번째 항은 결맞지 않은 방사광을 나타내고 두 번째 항은 결맞음이 있는 방사광을 의미한다. 즉 $f(\lambda) \approx 1$ 일 때 결맞음 부분의 power가 결맞음이 없는 부분에 비해 N_e 배 크다는 것을 보여주고 있다. 그림 2는 bending magnet에서 방출된 synchrotron radiation의 번치 길이에 따른 결맞음 효과를 보여주고 있다. 결맞음 방사의 photon flux는 결맞음이

Fig. 2. Coherent enhancement of synchrotron radiation from a bending magnet at different bunch lengths in rms.

Fig. 3. Layout of fs-THz Beamline (QD: quadrupole doublet, AC: accelerating column, QT: quadrupole triplet, CTR: coherent transition radiation).

없는 경우에 비해 N_e 배가 크다.

포항가속기연구소에서 진행 중인 fs-THz 발생을 위한 빔라인의 layout은 그림 3과 같다. 먼저 Ti:sapphire 레이저증폭기의 3차 조화에서 나온 266 nm 펄스를 1.6-cell 광음극 고주파전자총(RF-Gun)에 넣어 약 0.5 nC charge와 60 Hz까지의 repetition rate를 갖는 전자 번치를 발생시키고, 두 개의 S-band 가속관(AC1, AC2)으로 최대 75 MeV 에너지의 전자빔을 얻는다. 번치 길이를 압축하기 위해 두 개의 chicane (Chicane 1, chicane 2)이 사용되는데 0.2 nC beam으로는 75 fs까지, 0.5 nC beam으로는 150 fs까지 번치 길이를 줄일 수 있다. Linac의 건설에 사용되는 파라메타가 Table 1에, bunch charge와 bunch length 간의 관계가 Table 2에 나타나 있다. Bunch compression을 통하여 짧은 번치 길이

REFERENCES

- [1] Y. Shen *et al.*, PRL **99**, 043901 (2007).

Table 1. Parameters of the Linac.

Parameters	Value
Beam Energy	75 MeV
Beam Charge	0.2 – 0.5 nC
Beam Emittance	5 mm-mrad
Beam Pulse Repetition Rate	60 Hz max.

Table 2. Relation of bunch charge and bunch length.

Beam Charge	Bunch Length after RF-Gun	Bunch Length after Chicane
0.2 nC	0.5 ps	75 fs
0.5 nC	2 ps	150 fs

를 얻기 위해서는 emittance가 5 mm-mrad으로 비교적 높아지지만 0.2 nC beam charge의 사용이 필수적이다.

선형가속기를 통과한 약 75 fs 이하 길이의 전자 번치는 copper mirror 혹은 aluminum foil을 투과하며 coherent transition radiation(CTR)을 통해 결맞은 테라헤르츠 빔을 발생한다. 여기서 발생된 펄스초의 고출력 테라헤르츠빔은 지름 24 mm의 CVD 다이아몬드 window를 통해 나온 후 테라헤르츠 전송관을 따라 실험실로 이송되어 펄스 에너지와 펄스 폭 등의 빔 특성 측정이 이루어진 후 이를 이용한 다양한 실험에 사용되어지게 된다. 테라헤르츠 펄스 에너지는 Bolometer 나 Golay cell 혹은 pyroelectric detector를 사용하여 측정할 수 있고, 테라헤르츠 펄스의 propagation 측정은 <110> ZnTe crystal을 이용한 electro-optic sampling 방법을 사용한다.

Ti:sapphire 레이저 증폭기에서 나온 800 nm 빔의 일부는 앞의 Figure 3에서 보이는 것처럼 10 m 전송관을 통하여 실험실로 전송되어 OPA(optical parametric amplifier)로 보내져 필요에 따라 UV(240 nm)에서 IR(10 μ m)까지 원하는 파장의 초고속 레이저 펄스를 만들어 펌프 혹은 프로브의 광원으로 사용되어진다. 이 펄스와 테라헤르츠 펄스를 사용하여 UV/Vis/IR 펌프-THz 프로브 혹은 THz 펌프-UV/Vis/IR 프로브 등의 다양한 실험을 시도할 수 있다.

fs-THz의 응용

펄스초 레이저를 사용하여 발생시킨 테라헤르츠를 이용한 연구는 주로 THz Time Domain Spectroscopy(TDS) 방법을 사용하여 물리, 생명, 화학, 재료, 보안, 이미징 등 다양한 분야에 적용되고 있고,^[2] 근래 들어 가시광 펌프와 THz 프로브를 이용하여 펄스초 시분해능을 갖고 동력학적 정보를 얻고자 하는 Time resolved THz Spectroscopy(TRTS)가 많이 시

도되고 있다.^[3,4] 최근에는 고출력 펄스초 레이저를 이용하여 고출력 테라헤르츠를 발생시키려는 연구들이 진행되고 있지만 아직 가속기를 이용하여 발생시킨 고출력 테라헤르츠와 견주기는 힘든 단계이다. 최근 몇 년간 펄스초의 상대론적 전자 덩치(relativistic electron bunches)로부터 결맞은 테라헤르츠 방사를 얻는 연구들이 활발히 진행되어 왔다.^[5,6] 이 결맞은 방사로부터 얻은 테라헤르츠 펄스의 에너지와 첨두전력(peak power), 첨두 전기장(peak electric field)은 레이저를 사용하여 광전 스위치(photoconductive switch)나 광 정류(optical rectification)로 얻은 것보다 최소 수백 배 이상 획기적으로 개선되었다. 2007년에는 미국 Brookhaven National Laboratory의 National Synchrotron Light Source에서 포항가속기연구소와 유사한 방법으로 $\sim 100 \mu$ J의 강한 테라헤르츠 펄스를 발생시킨 후 800 nm 레이저와의 상호작용으로 비선형 cross-phase modulation을 관찰하였다. 현재 nano-particle이나 quantum dot과 같은 여러 가지 물질에 관한 비선형 흡광, magnetic system의 spin에 관한 연구나 분자간 인력에 관한 연구, 고출력 테라헤르츠의 생물학적 세포활동 등에 대한 영향 등 다양한 가능성들이 제기되고 있다.

요 약

테라헤르츠 영역은 현재 점점 많은 연구자들이 관심을 갖고 광원 개발과 그 응용에 대한 연구를 하고 있지만 아직까지 비교적 미개척된 과학의 블루오션이다. 현재는 펄스초 레이저를 사용하여 photoconductive antenna 혹은 광정류 방법으로 발생시킨 테라헤르츠나 자유전자레이저(FEL)에서 발생된 테라헤르츠를 이용한 연구가 주를 이루고 있다. 테라헤르츠 연구는 물리학, 화학, 생명공학, 재료공학 등의 다양한 분야의 협력이 필요하고 특히 기초 과학에서부터 나노기술, 반도체, 보안, 국방에 이르는 다양한 응용 분야가 존재하는 융합기술이라 할 수 있다. 따라서 2009년 말 포항가속기연구소에서 건설이 완공된 fs-THz 빔라인은 우리가 이전에 갖지 못했던 약 200 fs의 펄스폭에 펄스당 10 μ J 이상의 높은 에너지를 제공할 수 있으므로 위에 기술한 여러 가지 분야에서 아직 시도해보지 않은 새로운 연구의 분야를 개척하고 분야 간의 융합 연구를 활성화시킬 수 있는 중요한 구심점이 될 것이다.

REFERENCES

- [2] K. J. Tielrooij *et al.*, PRL **102**, 198303 (2009).
- [3] C. A. Schumuttenmaer, Chem. Rev. **104**, 1759 (2004).
- [4] P. A. George *et al.*, Nano Lett. **8**, 4248 (2008).
- [5] G. L. Carr *et al.*, Nature **420**, 153 (2002).
- [6] A. Doria *et al.*, PRL **93**, 264801 (2004).