

연속파 테라헤르츠 기반 능동형 실시간 투시 영상 기술

한 성 태

한국전기연구원

I. 머리말

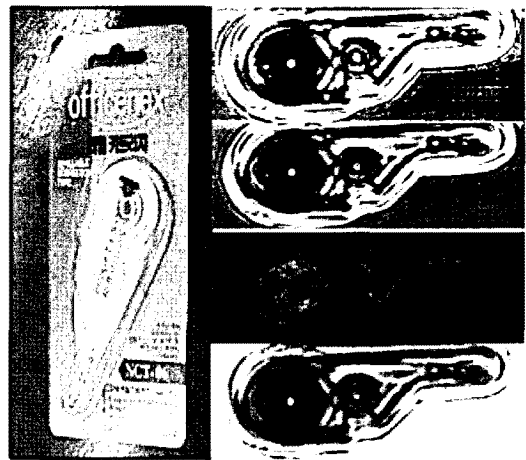
광적인 성질과 전파의 성질을 동시에 갖는 테라헤르츠파(terahertz wave, 0.1~10 THz)는 우주 배경 복사나 단백질 접힘과 같은 기초과학 연구에서부터 보안 검색 및 의료 응용과 같은 실용 기술에 이르기까지 다양한 분야에서 활용이 가능한 주파수 자원이다. 그중에서도 특히 불투명한 물체에 대한 투시가 가능하면서도 X-ray와 같은 고에너지 이온화 복사가 아니라는 장점 때문에 보안 검색을 위한 은닉 물질 탐색 등에 활발한 응용이 기대되고 있다. 아울러 현장 적용이 가능한 비파괴/비접촉식 품질 관리 기술로서도 다양한 형태의 연구 개발이 진행되고 있다.

본 원고에서는 여러 가지 테라헤르츠 영상 기술 중에서, 연속파 소자에 기반한 능동형 원거리 실시간 투시 영상을 구현하기 위한 요소 기술을 중심으로 관련 연구 동향을 살펴보고자 한다.

II. 테라헤르츠 실시간 투시 영상 기술

우주선 단열재의 내부 결함을 비침습적으로 검사하는 시연을 통하여 건조한 유전체에 적용 가능한 비파괴 투시 영상 기술로서 테라헤르츠 전자파가 주목을 받게 되었다.

[그림 1]에서 보는 바와 같이 테라헤르츠 전자파는 광학적으로 불투명한 포장재(종이) 이면에 위치한 수정테이프의 구조를 투시해서 볼 수 있을 만큼, 투과도가 우수하며 각종 보안 영상이나 품질 관리에서 요구하는 수준의 해상도를 확보할 수 있다는 장점이 있다.

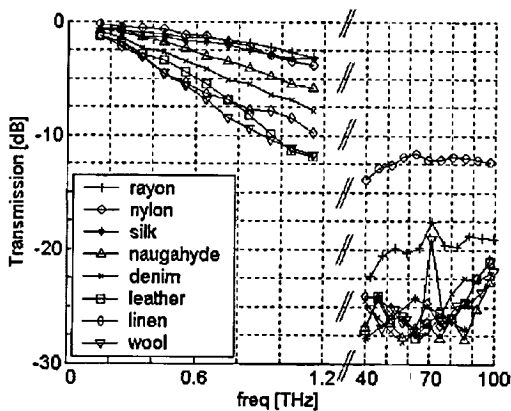


[그림 1] 연속파 0.2 THz 소자(Gunn diode)를 이용한 수정 테이프 이미지(2차원 스캔). (종이와 같이 광학적으로 불투명한 물질로 가려진 구조의 내부를 투시할 수 있다.[한성태 외, 광학과 기술 14, 12 (2010)])

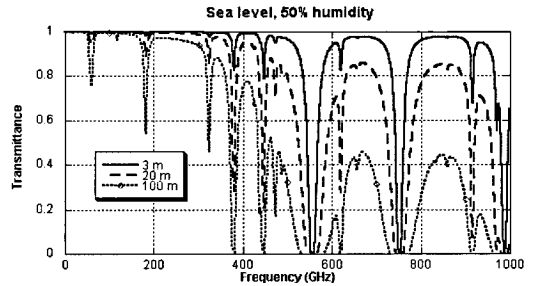
그러나 대부분의 테라헤르츠 발생 장치는 출력이 약하기 때문에, 에너지를 한 곳에 집중하여 출력 밀도를 높인 뒤 피사체에 주사(scan)해야 하므로, 대면적의 2차원 영상을 구성하기 위해서는 scan에 소요되는 시간이 매우 길어진다는 문제가 있다. 아울러 회절 한계에 의해 주어지는 빔의 집속 크기를 최소화하고 검출기에 투입되는 출력을 최대화하기 위하여 고 집속 시스템의 개발이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 빠른 영상 획득을 가능하게 하는 고속 프레임 처리 기술이나 고속 scan 기술 등이 중점적으로 개발되고 있으며, 상업적 시제품까지 나오고 있다.

이러한 진전에도 불구하고, scan을 위한 대기 시간 때문에 발생하는 적체 없이 현장에서 전수 검사를 구현하기 위해서는 다중의 검출기로 이루어진 배열(array)을 이용하는 실시간 영상 기술이 요구되고 있다. 실시간 영상 기술은 해상도와 투시 능력, 대기 흡수와 차폐재에 의한 흡수 및 산란 등을 종합적으로 고려해 볼 때 0.1~1 THz 사이가 선호된다. 특히 보안 영상의 경우, 대부분의 의류 재질이 [그림 2]에서 보이는 바와 같이 1 THz 이상에서 심한 감쇄를 보이기 때문에 반드시 1 THz 이하의 대기 창(atmospheric window)에 해당하는 주파수를 활용하여야 한다.

수동형 영상 기법의 경우, 0.1~1THz 영역에서의 흑체 복사 에너지가 적외선 영역에 비해 매우 약하기 때문에 신호 증대를 위하여 광대역의 고감도 검출기를 필요로 한다. 0.1 THz 근방에서 대역폭을 100 GHz 정도로 잡았을 때, pW 이하의 복사 에너지를 1/30초 이내에 신호 대 잡음비 10 정도로 검출해 내기 위하여  $10^{-14} W/\sqrt{Hz}$  정도의 잡음 등가 출력(NEP)를 갖는 검출기가 필요하다. 이러한 요구 조건을 만족시키기 위하여 극저온 micro-bolometer 검출기나 heterodyne 혹은 pre-amplified direct 검출기와 같은 Schottky



[그림 2] 전형적인 의류 소재에 대한 THz-IR 투과도 비교 [J. E. Bjarnason et al., *Appl. Phys. Lett.* 85, 519 (2004)]



[그림 3] 대기를 진행하는 THz 전자파의 투과율(계산) [E. N. Grossman, et al., *Proc. SPIE* 5411, 68 (2004)]

diode 기반의 coherent 검출 기법을 고려할 수 있다.

그러나 heterodyne 방식을 적용하는 경우, local oscillator(LO)가 필수적인 소자이기 때문에 대규모 array로 만들기가 어렵고, 대역폭이 한정되어 버린다는 한계가 있다. Schottky diode 뒤에 pre-amplifier를 적용하는 coherent 검출 기법의 경우 0.1 THz 대역에서 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 방식으로 array 제작이 가능하기 때문에 최근 들어 국내에서도 활발하게 연구 개발이 진행되고 있다. 하지만 현재의 저 잡음 선형 증폭기 기술 수준이 0.34 THz 정도에 머무르고 있고, 단위 소자의 가격이 매우 비싸기 때문에 구현할 수 있는 화소(pixel)의 개수에 제한이 따른다는 문제가 있다. 이러한 이유 때문에 대면적으로 다수의 검출기를 array화하는 대신, 소수의 array로 검출기를 구성하고, 시계(field of view)를 빠르게 scan하는 방식을 적용하여 영상을 구성하고 있다. 유사한 방식으로 Brijot, Thruvision, Millivision passive imagers 등의 업체에서는 이미 오래전부터 0.1~0.3 THz 대역에서 제품화에 성공하였으나, 시장에서 크게 주목받지는 못하였다. 이와는 별도로 최근 안테나 구조와 결합된 극저온 초전도 micro-bolometer array에 고속 scan 방식을 적용하여 실시간에 준하는 수동형 영상을 얻는 방법도 활발하게 연구되고 있다.

기본적으로 수동형 테라헤르츠 영상은 외부 조건에

민감하기 때문에 매우 감도가 높은 광대역 검출기를 필요로 하지만, 화소를 구성하는 고감도 검출기의 수를 증가시켜 대면적으로 array화하는 데는 현실적인 한계가 따른다. 따라서 감도가 다소 불량하더라도 화소 수 증대 및 array형 대면적화가 용이한 다른 검출기를 사용하는 대신, 능동형 조사(active illumination)를 통해 검출기의 낮은 감도 문제를 보상하는 방안이 현실적인 대안으로 간주되고 있다.

다음 장에서는 능동형 실시간 영상을 구현하기 위한 요소 기술로서 검출기 및 광원 기술의 state-of-the-art를 간략히 검토해 보기로 한다.

### Ⅲ. 테라헤르츠 검출기 및 연속파 광원 기술

테라헤르츠의 양자 에너지( $h\nu \sim 4$  meV)는 상온 에너지( $k_B T \sim 26$  meV) 근방에 해당하기 때문에 에너지 갭 기반의 고감도 array형 상온 검출기 개발이 용이하지 않다. 이러한 이유로 pixel화 되어 있는 conducting electrode나 absorber sheet 등에 테라헤르츠 전자파를 조사하여 열로 변환한 뒤 흑체 복사에 의한 적외선을 bolometer와 같은 고감도 2차원 열상 검출기를 활용하여 실시간으로 영상화 하는 기법 등이 활용되고 있다. 이러한 방법을 사용하면 테라헤르츠 빔 자체의 profile 정도는 실시간으로 영상화할 수 있으나, 20 mW 정도의 입력 flux에 대한 온도 변화가 대략 1.6도 정도에 불과하고, 열 확산에 의한 영상 왜곡 등의 우려가 있기 때문에 고감도 영상 응용에는 어려움이 있다.

최근에는 micro-bolometer array와 같은 열 검출기(thermal detector)에 테라헤르츠 파장에 최적화된 안테나, 소형 렌즈 혹은 주파수 선택성이 높은 필터나 흡수체 등을 각 pixel 단위에 적용하여 테라헤르츠 신호에 대한 감도를 높이기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 시정수(time constant)가 수십  $\mu$ s인 다이오드 검출기에 비하여 열 검출기는 응답 시간이

수십 ms 정도로 길다는 단점이 있지만, 수 십 Hz의 video-rate로 실시간 영상을 구현하는 데는 지장이 없을 것으로 기대된다.

FET(Field Effect Transistor)에 나노 스케일의 gate를 적용하고 여기(excite)되는 플라즈마 웨이브의 비선형성을 이용하여 차단 주파수(cutoff frequency)보다 높은 주파수에서 반응할 수 있도록 고안된 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)-FET는 최근 들어 가장 주목받고 있는 상온 테라헤르츠 검출기이다. 나노 구조에서 발생하는 국소적인 surface plasma oscillation 현상에 기반하여 검출감도를 향상시킬 수 있음이 보고되었고, antenna 구조 등을 적용하여 최적화 하면 상온 bolometer array와 유사한 수준의 NEP가 가능할 것으로 예상된다. 아울러 매우 저가의 Si-CMOS 공정으로도 고감도의 MOSFET array를 구현할 수 있을 것으로 기대되기 때문에 향후 능동형 실시간 테라헤르츠 영상 기술의 실용화 측면에서 하나의 돌파구가 될 가능성이 클 것으로 예상된다.

이밖에도 초전도 터널 조셉슨(Josephson) 접합(STJ)에 기반한 초전도 THz파 검출기의 개발이 진행되고 있으며, 최상의 NEP는  $10^{-14} \sim 10^{-16}$  W/ $\sqrt{Hz}$  이상까지 가능할 것으로 예상된다. 그러나 비슷한 수준의 NEP를 갖는 극저온 bolometer와 마찬가지로 극저온 용기 내에서 대면적으로 array화하는 데는 한계가 있을 것으로 예상된다.

상온 검출기에서도 충분한 신호 대 잡음비를 갖는 실시간 능동 영상을 구현하기 위해서는 필스보다 연속파 테라헤르츠 광원이 선호된다. 연속파 광원은 그 발생 기작(mechanism)에 따라 photonics 기반 소자와 electronics 기반 소자로 나누어 볼 수 있다.

양자 점(quantum dot)이라는 주기적인 구조를 활용하여 인공적인 band gap을 형성하고, 테라헤르츠 대역의 광자를 방출시키는 QCL(Quantum Cascade Laser)은 대표적인 photonics 기반의 테라헤르츠 소자이다. MIT의 Q. Hu 그룹에서 4.3 THz에서 근방에서 동작

하는 QCL과 micro-bolometer array를 이용하여 실시간 능동형 테라헤르츠 영상을 성공적으로 시연하면서 매우 유용한 테라헤르츠 소자로서 관심을 끌고 있다. 하지만 아직 3 THz 이하의 영역에서는 가용할 만한 출력이 보고된 바 없기 때문에, 0.1~1 THz 대역의 능동형 실시간 영상에 활용하기 위해서는 주파수를 낮추면서도 출력을 유지하기 위한 연구 개발이 선행되어야 한다.

기체 분자의 병진 운동과 회전 운동 등에 해당하는 에너지 갭을 이용하는 gas laser는 오래 전부터 고출력의 테라헤르츠 소자로서 개발되어 왔으나, 원하는 주파수를 임의로 선택하는 것이 불가능하다는 단점 때문에 활용 폭이 제한적이다.

주파수 차이가 THz 대역에 해당하는 2개의 레이저 혹은 dual-mode laser에서 나오는 출력을 광다이오드에서 mixing하여 연속파 테라헤르츠를 발생시키는 photo-mixing 기법은 주파수 가변성이 우수하며, 소형화가 용이하다는 장점이 있다. 그러나 출력이 미약하기 때문에 실시간 영상 응용보다는 초소형 분광 분석 쪽에 보다 적합할 것으로 예상된다.

이상과 같은 광학적 접근법 이외에도 고체 소자 내에서 전자의 conductional transport에 기반한 diode 광원과 체배기(multiplier)를 결합한 연속파 테라헤르츠 광원과 같은 solid state electronics 기반의 광원을 활용한 능동형 실시간 영상 기술을 고려해 볼 수 있다. 하지만 결정 내에서 charge carrier의 느린 유동 속도나 열 문제와 같은 원리적인 제약 때문에, 상온 검출기 기반의 능동형 실시간 영상 구현에 적용할 만큼 충분한 출력을 발생시키는 것은 어려울 것으로 예상된다.

이와 달리, 진공 중에서 전자의 convective transport를 이용하는 vacuum electronics 기반의 광원은 진공 내에서 전자의 transport를 방해하는 제약이 없기 때문에 고출력 연속파 구현에 수반되는 제약으로부터 상대적으로 자유롭다. 대표적인 예로서, 자유 전자 레이저는 고출력 광대역 발전이 가능하다는 장점

때문에 세계 각국에서 널리 연구되고 있는 테라헤르츠 광원이다. 그러나 빛의 속도에 가까운 전자의 운동을 필요로 하는 가속기 기반의 장치이기 때문에 활용성에 제약이 있어 왔다. 최근에는 한국원자력연구원을 중심으로 탁상형(table-top) 테라헤르츠 자유 전자 레이저 개발을 진행하고 있으므로, 향후 활용성이 크게 증대될 것으로 기대된다.

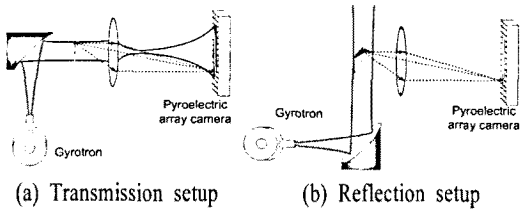
선형 전자 빔과 복잡한 구조를 진행하는 전자파와의 상호 작용에 의해 테라헤르츠를 발생시키는 BWO, Clinotron, EIO 등도 0.1~1 THz 대역에서 활용 가능성이 크게 기대되는 광원으로서 다양한 방법으로 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 MEMS 공정을 활용하여 3차원의 초소형 회로를 정밀 가공하기 위한 노력이 세계 각국에서 경쟁적으로 진행되고 있다.

장기적이고 연속적인 사용 환경에서 광원의 신뢰성을 고려할 때 gyrotron은 매우 매력적인 광원이다. Gyrotron은 강한 자기장 하에서 도플러 편이(shift)된 전자 빔의 회전 운동이 공진 공동 내부의 주파수와 공진하여 고출력의 전자파를 발생시키는 ECRM(Electron Cyclotron Resonance Maser)의 일종이다. 자기장의 세기가 주파수를 결정하기 때문에 주파수가 증가할수록 높은 자기장을 필요로 한다는 단점이 있으나, 초전도 고자장 기술의 발달에 힘입어 경량화 소형화가 급진될 것으로 예상된다. 공진기의 고차 모드로 회전 전자 빔의 에너지를 환원하기 때문에, 0.1~1 THz 대역에서 단위 부피당 출력 밀도가 가장 높은 광원으로 자리매김하고 있다.

#### IV. 실시간 테라헤르츠 능동형 투시영상

능동형 실시간 테라헤르츠 투시 영상을 구현하기 위해서는 대면적 array형 검출기의 감도(sensitivity)와 공간분해능(spatial resolution), 대조도(contrast) 등을 동시에 고려하는 종합적인 설계가 필요하다.

[그림 4]는 현재 기술 수준에서 가용한 component



[그림 4] 실시간 테라헤르츠 능동형 영상 시스템 개념도

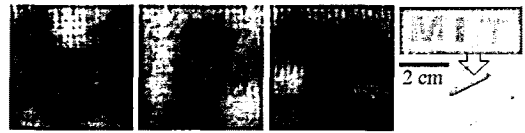
들을 활용하여 능동형 실시간 영상의 개연성을 시연하기 위해 설계된 시스템의 개념도이다. Gyrotron으로부터 발생하는 고풍력 테라헤르츠 빔의 출력밀도를 focal plane array cell에서 검출 가능한 수준으로 유지하면서 시준(collimate)시키고, 피사체에서 산란되는 테라헤르츠 신호를 광학계를 통해 집속하여 focal plane 상에 결상하도록 하여 실시간 영상을 구현할 수 있도록 하였다.

본 실험에서 활용한 pyroelectric array camera는 대표적인 열 검출기의 하나로서, 적외선 영역에서 높은 감도를 보이기 때문에 이를 차단하기 위해서 가시광 및 적외선 영역에서는 불투명하고 테라헤르츠에 대해서만 투명한 HDPE(High Density Polyethylene) 필터를 array 검출기 전면에서 적용하였다.

[그림 5]는 0.46 THz gyrotron을 고풍력 테라헤르츠 조사(illumination) 장치로 활용하고, 상용 pyroelectric array camera를 2차원 검출기로 활용하여, 우편봉투 속에 은닉된 금속 글자에 대한 실시간 투시 영상을 구현한 결과를 보여주고 있다. 실시간 능동 영상을 기록한 video에서 획득한 정지 영상으로서, 보안 검색 및 냉동/건조 식품내의 이물질 검사 등에 활용하기 위한 실시간 투시 영상의 개연성을 입증해 주고 있다.

### V. 맺음말

테라헤르츠를 이용한 다양한 응용 분야 중 보안 검색 및 품질 관리를 위한 실시간 능동 영상 기술에



(a) Captured images("MIT" by transmission)



(b) Capture images("KERI" by reflection)

[그림 5] 0.46 THz 실시간 능동 영상을 기록한 video에서 획득한 정지 영상(2~3 mm 가량의 두께를 갖는 금속 글자를 우편봉투 속에 숨겨두고 반사, 투과 영상을 찍은 모습)

대한 연구가 특히 활발하게 진행되고 있다. 이는 기존의 마이크로파를 이용한 영상보다 고해상도의 영상을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 X-ray가 가지는 생체에 대한 유해함을 극복할 수 있기 때문이다. 이러한 응용을 위한 핵심 기술로서 고풍력 테라헤르츠 소자와 array화 가능한 고감도 검출기 기술에 대하여 살펴해보았다.

보안 검색을 위한 영상 기술은 미국 국방부 산하의 Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA)가 후원하는 TIFT(the Terahertz Imaging Focal-plane Technology) program, SWIFT(the Sub-millimeter Wave Imaging Focal-plane Technology) program, MATA(Micro-antenna Array Technology and Application) program 등을 통해서 집중적인 연구 개발이 이루어지고 있으며, array형 고감도 검출기 및 vacuum electronics 기반의 고풍력 테라헤르츠 증폭 기술에 관한 연구가 진행되고 있다.

보안 검색 응용 이외에도 식품이나 약품 내에 포함된 이물질 검색과 같은 품질 관리를 위해 테라헤르츠 능동형 실시간 영상 기술에 대한 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 한국전기연구원은 한국식품연

구원(주관) 및 한국전자통신연구원과 협동으로 식품이물질 실시간 비파괴 탐지 기술을 개발하기 위한 협동 연구 사업을 수행하고 있으며, 그 일환으로 능동형 실시간 테라헤르츠 영상 요소 기술을 개발 중에 있다. 해당 과제외의 성공적인 수행을 통하여 국내의 실시간 테라헤르츠 능동형 영상 기술이 선두적인 위치를 점하게 되기를 기대해 본다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한성태, 전석기, 김정일, 김근주, "고출력 연속파 테라헤르츠 기술", 광학과 기술, 14, 12, 2010.
- [2] J. E. Bjarnason *et al.*, "Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing", *Appl. Phys. Lett.*, 85, 519, 2004.
- [3] E. N. Grossman, A. Luukanen, and A. J. Miller, "Terahertz active direct detection imagers", *Proc. SPIE*, 5411, 68, 2004.
- [4] A. Lisauskas *et al.*, "Terahertz imaging with GaAs field-effect transistors", *Electronics Lett.*, 44, 408, 2008.
- [5] S. Kim *et al.*, "Room temperature terahertz detection based on bulk plasmons in antenna-coupled GaAs field effect transistors", *Appl. Phys. Lett.*, 92, 253503, 2008.
- [6] W. Stillman *et al.*, "Sub-terahertz testing of silicon MOSFET," *Electronics Lett.*, 44, 1325, 2008.
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Terahertz\\_radiation](http://en.wikipedia.org/wiki/Terahertz_radiation)
- [8] Q. Hu, "Terahertz quantum cascade lasers and real-time T-rays imaging at video rate", *Terahertz Sci. Technol.*, 2, 120, 2009.
- [9] S. T. Han *et al.*, "Continuous-wave submillimeter-wave gyrotrons," *Proc. SPIE*, 6373, 63730C, 2006.

≡ 필자소개 ≡

한 성 태



1999년 2월: 서울대학교 물리교육과 (이학사)

2001년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학석사)

2005년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학박사)

2005년 8월: 서울대학교 기초과학연구원 연구원

2008년 2월: Massachusetts Institute of Technology, Plasma Science and Fusion Center (Postdoctoral Research Associate)

2008년 3월~현재: 한국전기연구원, 의료-IT 융합기술 연구본부 선임연구원

[주 관심분야] 고출력 연속파 THz 발생 및 응용