

테라헤르츠 이미징과 안전 · 보안 분야 응용

Terahertz Imaging and Its Applications in Security and Safety

목 차

- I. 서론
- II. THz파의 특징
- III. 고성능 이미징 디바이스의 개발
- IV. THz파를 사용한 우편물 검사
- V. THz파의 산란을 활용한 분말검출
- VI. 결론

| | |
|------------------|---------------|
| 윤두협 (D.H. Yoon) | 테라전자소자팀 책임연구원 |
| 유용구 (Y.G. Yoo) | 테라전자소자팀 선임연구원 |
| 곽민한 (M.H. Kwak) | 테라전자소자팀 선임연구원 |
| 류한철 (H.C. Ryu) | 테라전자소자팀 연구원 |
| 이승권 (S.K. Lee) | 테라전자소자팀 위촉연구원 |
| 정세영 (S.Y. Jeong) | 테라전자소자팀 위촉연구원 |

종래의 서브-밀리미터파 또는 원적외선 대역까지 이르는 THz파는 지금까지 발생 및 검출이 어려웠기 때문에 과학연구 및 산업 분야로의 응용연구가 제대로 진행되지 못했다. 그러나 최근 레이저 기술의 발전에 힘입어 발생법과 분광법의 개발연구가 진척되고, THz파가 새로운 센싱통로(sensing through)로서 각광을 받게 되었다. 따라서 본 고에서는 THz 기술개발 및 이를 이용한 응용연구 관련 주요 기술들을 소개하고자 한다.

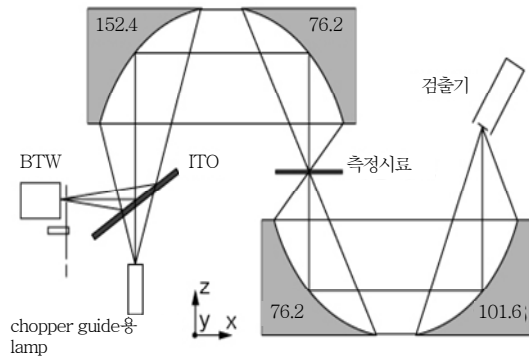
I. 서론

주파수가 0.3~10테라헤르츠(이후, THz라고 약칭) 대역(파장 1mm~30 μ m)에서의 전자파인 THz파는 적외선과 전파의 중간 주파수 영역에 위치한다. THz파는 전기적 측면에서 보면 물질투과성을 갖는 최단파장 대역에 있고, 실용적 측면에서 보면 적용 가능한 공간 분해능을 활용하여 물질의 투시 이미징을 얻는 데 이용 가능하다. 또한 광과 똑같은 방식으로 취급하기 쉬운 이점도 있어서 광학렌즈와 반사경 등의 광학부품을 사용하여 광학계를 구축하든지, 공간 내의 일정거리를 점프하여 이동(운반)시키는 것도 가능하다. 그리고 최근 분광 진단응용 및 이미지 진단응용을 시작으로 하여, 다양한 응용 가능성이 제안되고 있다[1]-[4]. 그뿐만 아니라 21세기에 들어와서 생체고분자를 중심으로한 분자의 특징적인 흡수 스펙트라(“지문 스펙트라(finger print spectra)”라고 함)가 많은 결정에서 발견되어, 이 구조를 이용한 물질판별 등 매력적인 응용도 제안되고 있다[5],[6]. 한편 다양한 광원 개발이 진전되는 것과는 대조적으로 물질 투과성과 공간분해능을 살린 우수한 어레이(array)형 검출기 개발은 좀처럼 발전되지 않고 있다.

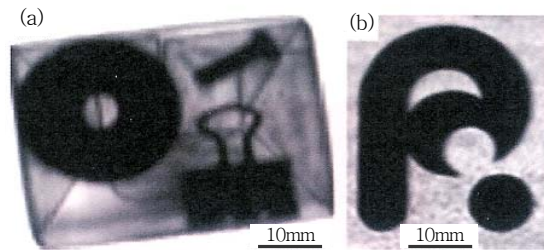
본 고에서는 우선 THz파의 특징을 간단히 기술하고, 고성능의 어레이형 검출소자로 개발중인 초전도 터널 접합소자(tunnel junction)를 사용한 검출기에 관하여 기술한다. 또한 THz파의 구체적인 응용으로서 기대되고 있는 우편물 속에 들어 있는 불법 약물 검출에 관한 연구개발 성과를 소개한다.

II. THz파의 특징

THz파가 보유한 전파적인 물질 투과성과 공간 분해능의 특성을 살려서 물질의 투과 이미징을 얻는데 적용되고 있다. 하나의 예로써, 후진파관(BWO 광원)을 이용한 이미징 시스템(그림 1) 참조)으로 얻은 THz파 투시 영상(이미지)의 예를 (그림 2)에 표시하였다[7]. 사용 주파수는 0.6THz(파장 0.5mm),



(그림 1) BWO 광원을 이용한 THz 이미징



(그림 2) 상자 속에 들어 있는 5엔짜리 동전, 클립, 엔의 THz 투시이미징(a)과 테프론 블록의 뒷면에 숨겨진 패턴의 THz 투시 이미징(b)

공간 분해능은 약 0.6mm이다. 사용 가능한(얻어진) 공간 분해능은 사용한 광학계의 회절 한계와 거의 같다. (그림 2)에 나타낸 바와 같이 THz파는 다양한 공업제품의 실용적인 투시 이미징 검사에 적용되고 있다. 또한 X선과는 달리 피폭의 염려가 없기 때문에 시스템 운용자에게 주는 부담도 경감시킨다.

THz파 대역의 또 다른 한 가지 특징은 결정을 중심으로, 물질 고유의 독특한 흡수 스펙트라, 소위 지문 스펙트라가 발견되었다는 점이다. 유사한 스펙트라 구조가 적외 영역에도 존재하지만, THz파는 물질에 대한 투과성이 적외선보다 높을 뿐만 아니라 파장이 길어서 물질 내부의 미세 구조에 의한 산란의 영향이 상대적으로 작다. 이것 때문에 표면에서는 보이지 않게 숨어 있는 구조물을 투시하면서 물질을 판별하는 응용이 기대된다. 또한 동일한 물질 투과성을 가지는 X선에서는 특성 X선에 의한 원소의 판별은 가능하지만 분자의 판독은 용이하지 않

다. 위와 같은 장점은 THz파 고유의 특성이다. 이러한 장점을 살려 제안된 응용의 하나가 THz파를 이용한 우편물 검사이다.

Ⅲ. 고성능 이미징 디바이스의 개발

최근 분광진단 응용 및 이미징진단 응용을 시작으로, THz파를 이용한 여러 가지 응용가능성이 제안되었고 정밀한 측정을 실행하기 위한 이미징 디바이스의 필요성이 높아지고 있다. 이러한 배경을 가지고 다양한 초전도 터널 접합소자(STJ)를 사용한 새로운 THz파 검출기의 개발이 진행되고 있다. STJ는 초전도체-터널 장벽(barrier)-초전도체라고 하는 3층 구조를 가지는 조셉션(Josepson) 소자의 일종이다. 이 구조는 SIS 구조라고도 하는데 전파천문학에서 사용하고 있는 SIS-주파수 혼합기와 동일한 소자이다. SIS-주파수 혼합기는 고감도의 밀리미터파-THz파 검출기로서 우수한 특성을 보이지만, 한편으로 헤테로다인(heterodyne) 검출실험을 행하는 경우, 국부발진원(LO)이 필수적인 소자이기 때문에 대규모 어레이화가 어렵고 대역폭이 한정되어 버린다. 따라서 일반적인 응용에도 사용할 수 있는 어레이형 검출기 제작을 목표로, STJ를 THz파의 직접 검출에 이용한 2가지 종류의 검출기 개발이 진행되고 있다.

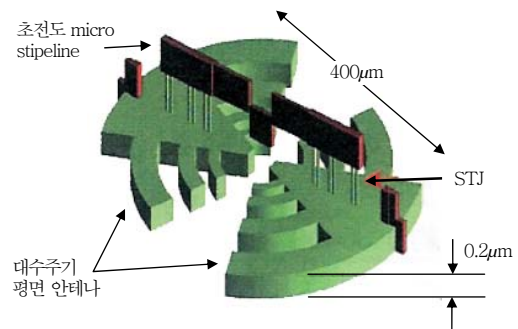
1. 공진회로형 THz파 검출기 어레이

첫번째 검출기는 초전도체의 구동주파수가 수백 GHz이며 상당히 고주파인 것을 이용하여, STJ를 포함한 초전도 회로에서 공진주파수에 해당하는 THz파를 검출하는 부품이다[8],[9]. 한 개의 검출소자는 ① 직경이 THz파의 파장 정도의 크기를 가지는 Nb계 초전도 박막으로 제작한 대수주기형(log periodic) 평면 안테나이고, ② 안테나 양쪽 날개를 연결하는 초전도 마이크로스트립선(micro-stripe line), ③ 안테나와 마이크로스트립선을 연결하는 2 직렬 6병렬(합계 12개; 직경 수 μm)의 원형 STJ로

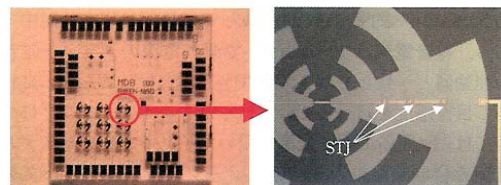
구성된다(그림 3) 참조). THz파가 기판에서부터 안테나에 입사하면, STJ와 초전도 마이크로스트립선으로 구성된 LCR 회로와 공명을 일으켜, 준(準)안정적(安定的)으로 회로내부에 에너지가 축적되고, 최종적으로 STJ 내부에 준입자의 여기·터널 효과를 유도한다(PAT)[10]. 1개의 THz파 광자(photon)는 전자 1개의 터널을 유도하기 때문에 터널전류를 모니터하면 THz파 강도를 측정할 수 있다.

검출되는 THz파의 주파수는 다양한 조합으로 이루어진 공명 피크(peak)의 중첩으로 결정되고, 밴드형 주파수 응답을 보여주므로, STJ의 크기와 배치 등을 최적화하여 검출하고자 하는 주파수에서 뛰어난 감도를 갖는 검출기를 제작할 수 있다. 제작된 3×3 검출소자 어레이와 단위 소자를 확대한 사진을(그림 4)에 표시하였다.

이 검출기는 일본 국립천문대가 관측을 수행하고 있는 ASTE 망원경에 탑재하는 것을 목표로 하고 있고, 목표 성능은 중심주파수 0.65THz, 대역폭 10% 이상, 잡음등가계수(NEP)는 $10^{-16}\text{W}/(\text{Hz})^{1/2}$ 이다. 이 성능을 실현하기 위한 각각의 STJ에 대한 성능은 직경 $3\mu\text{m}$ 이하, 임계전류밀도(J_c) 500~1000



(그림 3) 단소자의 박막구조



(그림 4) 5mm 사각형 기판 칩에 제작된 검출소자 어레이와 검출소자의 확대그림

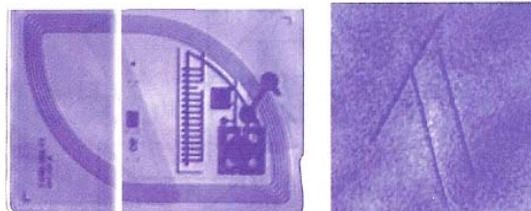
A/cm², 서브갭(sub-gap) 누설전류 < 10pA(@ T= 0.35K)이다.

어레이 규모는 25 화소를 목표로 하고 있다. 이 경우 가장 중요한 개발요소의 하나는 STJ 제작에서 원료 대비 제품의 비율이다. 1화소 검출소자는 어레이를 구성하는 12개의 STJ가 전부 정상적으로 작동하여 검출기로서의 성능을 충족시키는 것이다.

지금까지의 제품은 STJ의 크기 3.3μm, 전류밀도 600A/cm²의 조건에서, 98%의 원료 대비 제품의 비율로 양호한 정적(static) 특성을 획득하는 데 성공하였고, 더욱더 원료 대비 제품 비율을 향상시키면 25 화소 어레이화의 실현이 달성 가능할 것으로 생각된다.

검출소자의 성능평가는 ³He 감압형 냉각기(cryostat)를 사용하여 온도를 약 0.35K까지 냉각하고, 냉각기 내부에 THz파를 도입하여 응답특성을 평가하고 있다. 검출소자를 제작하는 사파이어 기판은 실리콘 또는 사파이어의 초반구(hyper-hemisphere) 렌즈에 밀착시켜 마운트(mount)하였다. 지금까지 주파수 감도특성, 검출효율 및 잡음특성 등을 평가하였을 때, 중심주파수 0.65THz, 비대역 10% 이상을 실현하고 있다. 한편, 검출효율은 약 20%로서 설계치의 50%에 비하여 약 2.5배 정도 낮다. 그러한 원인은 현재 검토중이다.

잡음전류는 10fA/(Hz)^{1/2}으로서, 누설전류에 관한 단락(short) 잡음특성의 이론값과 일치하고 있고, NEP=1.6×10⁻¹⁶W/(Hz)^{1/2}에 근접하는 목표 감도를 확인하였다[9]. 또한 이미징에 관해서는 다음과 같다. 전술한 BWO 광원을 이용한 이미징시스템



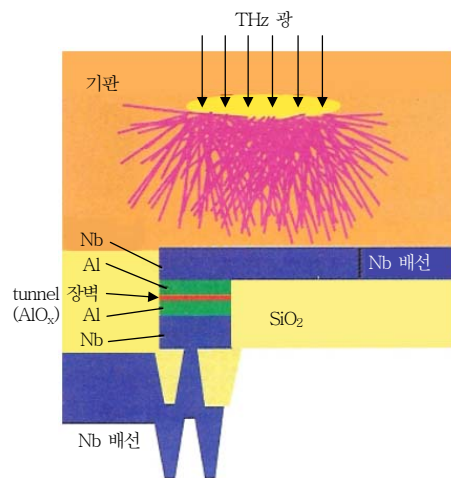
(a) STJ 검출기를 이용한 IC 카드의 (b) 분말밀크 속에 혼합시킨 바늘의 THz 투시상

(그림 5) THz 투시상

과 함께 편성된 단위소자를 사용하여 이미징 실험을 행하여서 대체로 양호한 결과를 얻었다(그림 5 참조)[11]. 어레이의 제작은 3×3=9 화소 어레이(그림 4) 참조), 6×6=36 화소 어레이를 단계적으로 추진하였고, 현재 5×5=25 화소 어레이에 대하여 신호 입력력 회로계와 조합하는 실험 단계에 와있다.

2. 기판 흡수형 광대역 THz파 검출기

앞 절에서 기술한 검출기는 소위 밴드형 주파수 응답특성을 가지므로 배경 방사에 의한 잡음을 최소한으로 억제하여 고감도 검출이 가능하다. 다른 한편, 대역폭이 한정적이기 때문에 THz파 특징의 하나인 “지문 스펙트라”의 측정에는 적합하지 않다. 또한 특정영역에서 사용하는 초전도체의 에너지갭 이하에서 (소자제작기술이 성숙되어 있는 Nb계 초전도체를 사용하는 경우), 고감도 검출이 가능한 주파수는 0.7THz 이하로 한정된다. 한편, 소자 제작용 기판이 THz파를 흡수하여 기판 내부에 THz 정도의 주파수를 가지는 격자진동(phonon)이 발생하면, 이것을 STJ로 검출하는 것에 의하여 보다 광대역의 THz파 검출기가 구현 가능할 것으로 기대된다(그림 6) 참조). 또한, STJ는 반드시 작을(微小) 필요는 없기 때문에 지금까지 축적(배양)된 특성이 양호한 광자(photon) 검출기의 제작기술을 활용하는 것이



(그림 6) 기판흡수형 광대역 THz 검출기 개념도

가능하다[12],[13].

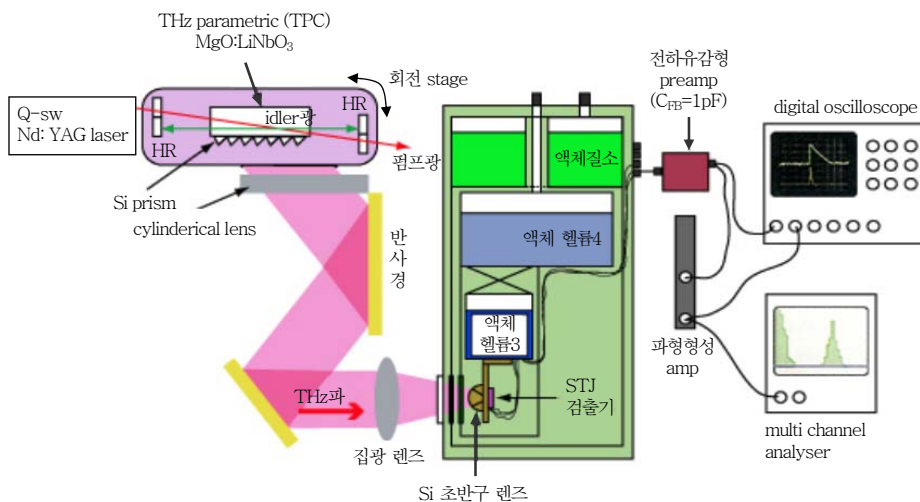
이 검출기에서는 기판이 THz파 광자를 흡수하고 포논을 발생한다는 것이 중요한 열쇠이다. 그리하여 THz파 대역에서 비교적 흡수율이 높은 물질로서 LiNbO₃와 LiTaO₃를 새롭게 채용하였다. 특히, 발생된 포논의 격자결함에 의한 산란을 억제하기 위하여 격자결함이 작은 화학당량적(stoichiometric) 단결정 기판(예, Oxide사 제품)을 사용하였다. 기판의 두께는 노광장치의 사양치와 비슷한 0.5mm로 하고, 각 기판 위에 광자검출기와 같은 크기인 20~100 μ m의 STJ를 제작하였다.

먼저, LiNbO₃ 기판 위에 STJ를 제작한 소자의 누설전류가 충분히 작다는 것을 확인하였다(14nA). 그래서 앞절의 평가실험과 같이 실리콘 초반구 렌즈 위에 기판을 실장하고(mount), ³He 감압형 냉각기에 탑재하여 THz파 조사실험을 행하였다. THz파 광원으로는 1~2THz 범위에서 파장변이가 가능한 THz파 펄스 광원인 테라헤르츠 파라메트릭 발진기(TPO)를 사용하였다. 발생된 THz파 펄스폭은 약 10ns, 펄스의 반복 주파수는 49Hz이다. 신호 입출력 회로는 고 에너지 입자선 계측에서 표준적으로 사용되는 AC 결합형 전하유감형 preamp (ORTEC 142A, 피드백 정전용량 1pF, 시정수(時定數) 약 30ns)를 사용하였다. STJ는 약 10M Ω 의 부하(load) 저항

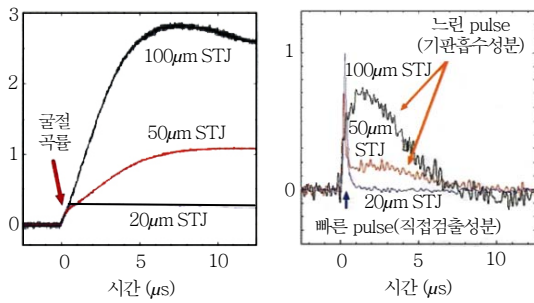
을 끼운 전류 바이어스로 구동하였다. 또한, 참조용 검출기로서 초전형(焦電型) 광대역 검출기인 DLATGS 검출기를 사용하였다. 실험을 위한 시스템 개략도를(그림 7)에 표시하였다.

일본의 C. Otani 연구그룹은 이 실험 셋업을 사용하여 주파수 1.5THz의 펄스형 THz파를 49Hz로 입사하여 THz파의 입사에 따른 펄스 신호 출력을 얻는 데 세계 최초로 성공하였다[12],[13]. 이어서 새로운 검출기의 검출과정을 확인하기 위하여 Li-NbO₃ 기판 위에 제작한 20 μ m², 50 μ m², 100 μ m²의 STJ 소자의 검출 파형과 비교하였다(그림 8a) 참조). 비교 결과, 20 μ m²의 STJ 소자에서는 파형의 형성 시간이 빠른 성분, 100 μ m²의 소자에서는 파형의 형성 시간이 느린 성분, 50 μ m²의 소자에서는 파형의 형성 시간이 빠른 성분 및 느린 성분의 중첩된 파형이 검출되었다. 이 차이를 이해하기 쉽게 파형의 시간 미분으로 계산한 것을(그림 8b)에 표시하였다.

상기 두 가지 성분의 시간변화 특성은 지금까지의 STJ를 X선 검출소자로서 작동시킨 경우의 전극 흡수성분과 기판흡수성분이 동등한 수준이다. 신호의 빠른 상승(raising) 시간성분은 초전도체 전극에 직접 흡수된 성분이라 하고, 신호의 늦은 상승 시간 성분을 기판에 흡수된 성분이라고 생각할 때, 여러



(그림 7) 기판흡수형 검출기의 실제 셋업



(a) 20, 50, 100μm의 STJ를 사용한 THz파 펄스를 검출했을 때의 출력신호. 신호 입력력은 전하적분형 preamp를 사용하였고, 증폭의 1V는 1pC에 대응한다.

(그림 8) LiNbO₃ 기판 위에 제작한 STJ 소자의 검출 파형

가지 실험결과를 잘 설명할 수 있다. 예를 들어, (그림 8)의 예는 상승시간의 느린 성분과 빠른 성분의 혼합비에 따른 소자 크기 의존성을 나타내고 있다고 생각할 수 있다. 조그만 소자에서 상승시간이 느린 성분이 약한 것은 조그만 소자에서는 기판에 흡수되는 성분에 비교하여 소자가 펼치는 입체각(solid angle)이 작기 때문이다.

역으로, 크기가 큰 소자의 경우는 기판 깊숙한 위치에서 흡수한 성분까지도 출력 신호에 영향을 미치기 때문에 기판흡수성분에 의한 영향이 지배적으로 되어, 상승이 느린 성분이 지배적인 것으로 해석할 수 있다.

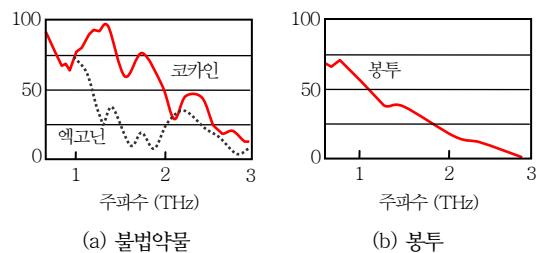
IV. THz파를 사용한 우편물 검사

전세계적으로 검열이 법적으로 금지되어 있는 관계로, 조사영장 없이 봉투와 같은 우편물을 개봉하는 것이 불가능하다. 하지만, 봉투를 개봉하지 않고도 마약, 각성제와 같은 불법 약물과 폭약, 생물(각성)제와 같은 위험물질을 검출하는 것이 종래의 X선 검사와 같은 기술로는 어렵다. 따라서, 유효한 검출 방법이 없기 때문에 지금까지는 약물 검사 없이 우송되어 유통되었을 가능성이 많고, 이런 사태조차 제대로 파악하지 못하고 있는 것이 현실이다. 하지

만, 불법약물과 위험물질의 사용은 범죄와 테러행위로 직결되는 만큼, 개방하지 않고 검출하는 것은 자칫 큰 실수를 범할 수 있는 세관, 국제우편국 및 경찰 검역 활동 등의 아슬아슬한 현장에서는 절대적으로 필요하다.

이러한 상황에서, 일본 C. Otani 연구그룹은 경찰청과학연구소 및 (주)S.I. 정공 등과 공동으로 대표적인 약 20종의 마약, 각성제, 폭약에 대하여 우선 푸리에(Fourier) 변환 적외선 분광 광도계를 사용하여 THz파 분광 스펙트럼을 측정하였다. 측정용 시료는 위와 같은 위험물질을 폴리에틸렌 분말로 15% 정도로 희석하여 정제(pellet) 제조기에 의하여 펠릿을 (직경 13mm, 두께 1.5mm) 제조하였다. 검출기에는 Si bolometer를 사용하였다. (그림 9a)에 대표적인 분광 측정결과를 나타내었다. 가로축은 주파수, 세로축은 투과율을 나타낸다. 각각의 금지(불법) 약물은 특징적인 고유 스펙트럼 구조를 가지고 있는데, 특히 0.5~3THz 영역에 있어서 스펙트럼 형태에 의한 성분 정량분석이 가능하다는 것이 확인되었다. 폭발물을 포함한 다른 측정시료에 대하여는 같은 방식의 측정을 실행하여 제각기 다른 스펙트럼을 나타내는 것을 확인하였다. 여기에 비하여 봉투의 투과 스펙트럼은 현저한 특징을 볼 수 없고, 투과율도 3THz에서는 거의 0에 가까운 것이 확인되었다 ((그림 9b) 참조). 이와 같은 사실로부터 3THz 이하의 주파수 대역 측정에 의하여 금지 약물 등 봉투 내부에 들어 있는 물질의 판별이 가능해졌다.

다음으로, 봉투 내부의 약물 검출 실험으로써 약물을 15mm×15mm의 폴리에틸렌 포대에 넣고 국제 우편용 봉투 속에 넣어, TPO 광원을 사용하여



(그림 9) THz 투과 스펙트럼

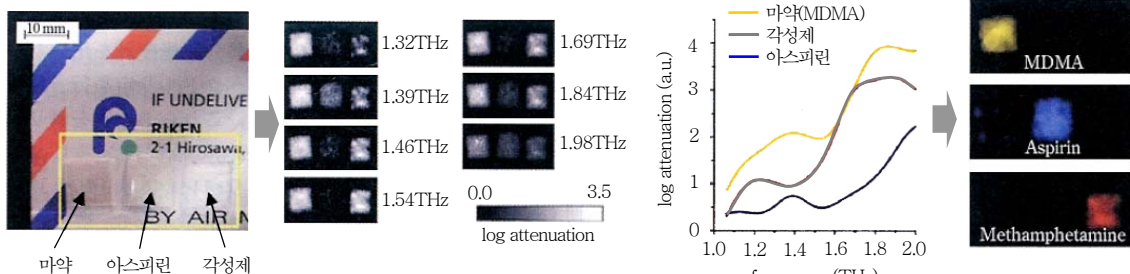
분광 이미징 실험에 의하여 검출하였다. TPO 광원은 발진 파장 1064nm의 Q-switch Nd: YAG 레이저로부터 펌핑 광을 비선형 광학 결정 MgO: LiNbO₃에 조사하여, non colinear 위상정합 조건이 만족되는 경우에 발생하는 파라메트릭 발진에 의하여 THz파를 발생시킨다. 이때, THz파의 파장제어 및 선폭을 좁게(狹線化) 조정하기 위하여 비선형 광학결정 내부에 발생하는 아이들러(idler)파에 대응하는 공진기 구조를 사용하였다. 파장제어에는 회전 스테이지를 사용하여 펌핑파와 공진기 내부의 아이들러파의 파수 스펙트럼의 상대각을 변화시킴으로써 발생하는 THz파의 주파수를 제어할 수 있다. 실험시 펌핑파의 반복 횟수, 펄스폭 및 출력은 49Hz, 25ns, 1.5W로서, 이때 발생하는 THz파의 펄스폭 및 피크 출력은 각각 약 10ns 및 약 10mW이다. TPO 광원으로부터 방사되는 THz파는 세로 방향으로 공간적으로 확장되면서 출력되는 관계로, 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 평행 광원으로 바꾼 후, THz파를 초점거리 100mm의 플라스틱 렌즈에 의하여 집광하여 시료에 조사하였다. 실험에 사용한 약물은 합성 마약 MDMA, 각성제 메탄페타민 그리고 참고시약으로 아스피린이다. 데이터 처리는 흡수 피크뿐만 아니라 스펙트럼 데이터 전체의 정보를 유용하게 활용할 수 있는 주성분 분석법을 사용하였다[5]. 이러한 주성분 분석법은 측정 스펙트럼 데이터를 이미 알고 있는 “지문 스펙트럼”과 조합시키고 최소 2승법 피팅을 실시하여 각 화상 픽셀로부터 얻어진 각 약물 성분의 기여를 산출한 후,

공간분포적으로 plot한다. 그 결과를 (그림 10)에 표시하였다[6]. 오른쪽 끝에 있는 화상은 멀티스펙트럼 화상과 스펙트럼 데이터로부터 얻어진 각 성분의 공간 분포를 나타내었다. 위 순서로부터 MDMA, 아스피린, 메타페타민이고, 개개 성분의 2차원 분포가 추출 가능하다. 또한, 이 방법은 여러 가지 물질이 혼재되어 있는 경우에도 적용 가능한 것으로 확인되고 있고, 간단하고 유효한 처리방법이다[14].

현재, 일본 C. Otani 연구그룹은 이 아이디어를 사용하여 우편물검사 프로토타입 장치의 개발을 목표로 삼고서, 일본 문부성 과학기술진흥조정 연구비에 의한 프로젝트 “불법 약물, 위험물질의 비파괴탐지 장치의 개발”을 추진하고 있다. 참여 기관은 일본의 이화학연구소(RIKEN), 경찰청 과학경찰연구소, 오사카대학 레이저 연구소, (주)일본분광, (주)SI 정공, (주)히타치제작소 등이 있고, 경찰청, 일본우편공사, 재무성 관세국, 문부과학성 등 관련기관은 운영위원의 형태로 참가하고 있다.

V. THz파의 산란을 활용한 분말검출

이와 같이, THz파를 이용함에 따라 지금까지 검출이 어려웠던 봉투의 비파괴 분석이 가능하다는 것을 보았다. 하지만 해외로부터 국내로 배달되는 우편물은 하루에 수십만 통 이상으로 대량이고, 개개의 우편물을 분광 측정하여 불법 약물과 위험 물질

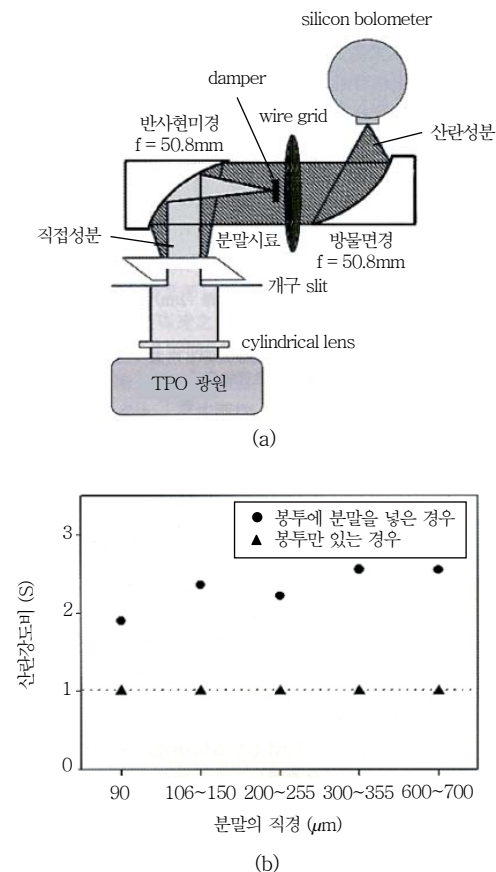


(그림 10) 봉투에 들어 있는 금지약물의 분광이미지와 참고용 지문. 스펙트럼을 이용한 주성분 분석에 의해 약물 은의(隱匿) 위치도 동일하게 결정

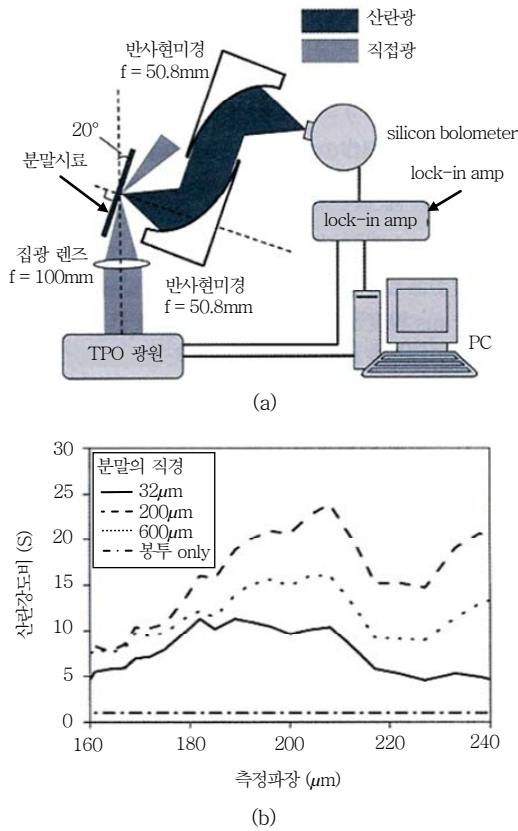
의 검출을 실시한다는 것은 실질적으로 불가능하다. 여기서 우리는 약물의 은폐 가능성을 단시간에 점검하여 의심이 가는 봉투만을 선별하고, 분광분석을 통하여 성분을 정량화한다고 하는 2단계 검사를 제안한다. 통상적으로 금지(불법) 약물과 분말의 형태로 우송되는 전형적인 입자의 직경은 (수백 μm 정도) THz파의 파장과 같은 정도이다. 이 경우 분말은 산란체로 간주할 수 있기 때문에 THz파를 조사할 경우의 산란광 강도에 의하여 분말의 유무를 판별할 수 있다. 한편, THz파로 볼 경우 봉투 등의 종이 표면은 충분히 평탄하다고 간주할 수 있기 때문에 투과성을 높이기 위한 산란 측정에 방해가 되지는 않는다. 이 방법은 단일 주파수의 THz파에서도 판정할 수 있기 때문에 신속한 검사가 가능하다. 이런 차폐(screening) 방법의 원리 실증 및 최적의 광학계 검토를 목적으로, 투과 및 반사에 의한 2종류의 산란광 검출 실험을 행하였다.

(그림 11a)와 (그림 12a)에 투과법 및 반사법 관련 실험장치의 개략도를 각각 나타내었다. 이 양쪽 실험에서는 THz파 광원으로서는 TPO 광원을 사용하였고, 검출기에는 액체 헬륨을 사용하여 냉각시킨 Si 볼로미터를 사용하였다. 볼로미터로부터의 신호는 전치증폭기(pre-amplifier)를 통하여 잠금증폭기(lock-in amplifier)로 전달되어, THz파 여기용의 Nd:YAG laser의 펄스신호에 동조시켜 잠금(lock-in) 검출하였다. 실험시 레이저의 반복 횟수는 49Hz, 잠금증폭기의 시정수(時定數)는 100ms이다. 또한, 투과법에서는 충분한 신호 대 잡음비(SNR)가 얻어지지 않았기 때문에, THz파의 주파수를 1.5THz(파장 $200\mu\text{m}$)에 고정하여 측정하였다. 측정시료는 체를 사용하여 분말 직경에 해당하는 크기로 분리한 bulk-dose 결정분말을 봉투에 넣었다. 참조시료로서는 봉투만 있는 경우를 측정하여 (그림 11b)와 (그림 12b)에 표시하였다. 각각의 세로축(scattering degree: S)은 분말 시료에서 나오는 산란광의 검출 강도 I_s 를 참조시료(봉투의 것)로 사용한 경우의 검출 강도 I_0 로서 규격화시킨 것($S = I_s/I_0$)이다. 분석 결과, 양쪽의 경우 분말이 들어 있는 봉투로부터의 산

란광의 신호강도가 증가하는 것을 확인하였다. 이 경우 투과계에서는 발생하는 THz 광의 편광 및 직접광과 산란광의 광 경로(pass)의 차이를 이용하여 산란광을 분리 측정하였지만, 직접광의 제거가 용이하지 않고, 시료의 두께가 증가할수록 흡수에 의한 산란광의 강도를 감소시키는 경향이 있어서 상대적으로 S 값은 작아진다. 여기에 비해, 반사계에서는 직접광을 효과적으로 제거할 수 있고, 산란광의 분리도 쉬워서 두께가 있는 시료에 대해서도 흡수에 의한 강도의 감소가 일어나지 않아서 투과계에 비교하여 S 값은 약 10배 정도 강하게 된다. 또 약하긴 하지만 광원파장(주파수) 의존성도 확인되는데, 이는 시료에 의한 흡수와 산란의 입경(粒徑) 의존성 영향 때문이라고 생각된다.



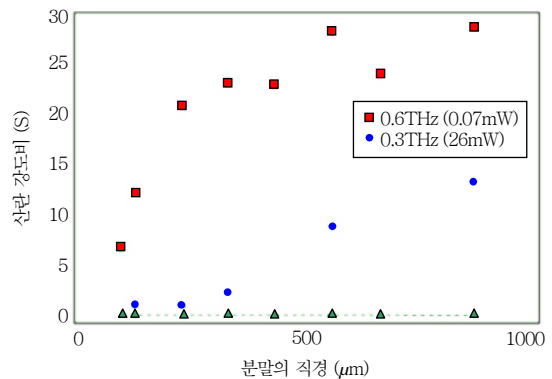
(그림 11) 투과광학계를 이용한 산란검출실험의 개략도 (a) 및 알갱이 직경에 대한 산란강도비(b)



(그림 12) 반사광학계를 이용한 산란검출실험의 개략도 (a) 및 알갱이 직경에 대한 산란강도비의 THz 파 파장의존성(b)

다음으로, 반사계를 기본으로 실제기기 탑재(搭載) 모델을 검토하였다. 최대 차이점의 하나는 액체 헬륨 냉각용 볼로미터 검출기를 상온 검출기로 교체하는 것이다. 이렇게 하여 상대적으로 감도가 낮은 상온 검출기에서도 충분한 신호 대 잡음비를 얻기 위하여 광원은 펄스 광원 대신 연속파 광원을 사용하였다. 연속파 광원에는 BWO 광원과 최근에는 THz 레이저 등이 사용되지만 장기적, 연속적 사용에도 견디는 신뢰성, 유지보수(maintenance), 소형(compact) 등을 고려하여 밀리미터파 diode 광원과 체배기(遞倍器)를 결합한 광원을 채용하였다. 이런 다이오드 광원은 지금까지 밀리미터파를 넘어선 주파수 영역에서는 충분한 강도를 가지는 것이 없었기 때문에, 전파천문학을 위한 대형 망원경 계획(ALMA 계획)용의 국부발진기(LO)로서 이용하기 위하여 상

용 광원의 개발이 추진되어 왔고, 신호 강도 및 신뢰성이 좋은 광원이 계속해서 출시되고 있다. 현단계에서 검토되고 있는 제품은 주파수 0.3THz의 광원(파장 1mm, 출력 26mW) 및 0.6THz의 광원(파장 0.5mm, 출력 0.07mW)이다. 또한, 검출기로서는 초전(焦電)형 DLATGS 검출기를 사용하였다. 이 검출기의 크기는 약 2mm ϕ 이다. 이 검출기를 사용하여 반사계에서 얻은 결과를 (그림 13)에 표시하였다. 이 그림에서는 출력이 약한 0.6THz 쪽이 대조비(contrast)가 오히려 선명하고, 작은 입경에서 감도가 점차 약해지는 것을 관찰하였다. 두 가지 경우, 대조비의 차이는 검출기 수광부에서의 THz파를 압축할 때의 빔 직경과 검출기 강도의 주파수 의존성 등의 영향을 고려하였다. 또 입자 크기에 의한 변화는 산란강도가 입자 크기에 의존한다는 것을 나타내고 있어, 실질적인 용도에서는 광원강도가 다소 낮더라도 파장이 짧은 광원을 사용하는 것이 효과적이라는 것을 알았다. 이상의 결과를 바탕으로, 현재 프로토타입 모형에 탑재하는 차폐부의 개발을 진행하고 있다. (그림 14)에 프로토타입 제작을 위한 시험기기의 사진을 나타내었다. 이 시험기기에는 광학조정을 간단하게 하고, 광학부품 수효를 줄이기 위하여 포물면경(拋物面鏡)으로 구축한 입사광학계를 렌즈로 대체할 예정이다. 향후, 검출광학계에도 렌즈계를 채용할 예정이다. 또 현재 사용중인 초전검



(그림 13) 0.3THz, 0.6THz의 연속파 광원과 상온 검출기를 결합시켜 얻은 산란 강도비의 입경(粒径) 의존성



(a) 개발중인 프로토타입 전체도 (b) 입사광학계를 가로방향에서 본 그림. 렌즈들을 채택함. (c) 입사광학계의 위에서 본 그림

(그림 14) 프로토타입 제작을 위한 시험기기

출기는 응답시간이 수십 ms 정도로 길기 때문에, 시정수(時定數)가 수십 μ s인 다이오드 검출기의 채용을 검토중이다. 또한 광원으로는 주파수가 약 0.55 THz에서 출력이 0.7mW 정도인 것을 새롭게 도입할 예정이다. 이와 같은 개선을 통하여 최종적인 사양(spec.)을 만족하는 프로토타입의 구축을 목표로 한다.

VI. 결론

21세기에 들어온 이래로, THz파의 “물질투과성”이나 “지문 스펙트럼”을 이용한 다양한 응용이 많이 제안되었다. 특히, THz파가 잘 투과하는 비금속 물질(soft matter)은 산업분야에서 매우 이용이 확대되기 때문에 공업제품 등의 다양한 측정 대상의 검사 기술로서 응용전개가 기대된다. 응용전개를 위한 필요 기술로서는 소형(compact) 광원, 분광장치 및 촬상형(撮像型) 검출기의 개발이 중요한 열쇠로

서, 현 시점에서는 전자를 중심으로 개발이 진행되고 있지만, 검출기술의 개발은 늦어지고 있으므로 개발을 서두를 필요가 있다고 생각된다. 또한 세계적으로는 국가적인 지원이 지연되고 있는 가운데, 미국에서 THz파 연구를 후원하는 움직임이 시작되고 있어서 안전(security) 관련 활용 목적으로 막대한 자원이 투입되고 있다. 이런 움직임은 THz 분야의 전개를 후원해 줄 것에 대한 기대와 함께 일본, 한국 등에서는 THz 분야 기술 및 응용·개발을 조속히 추진하는 것이 중요하다고 생각된다.

약어 정리

| | |
|--------|--|
| ASTE | Atacama Submillimeter Telescope Experiment |
| BWO | Backward Wave Oscillator |
| DLATGS | Deuterated L-Alanine Tri-Glycine Sulfate |
| ITO | Indium Tin Oxide |
| LO | Local Oscillator |
| NEP | Noise Equivalent Power |
| PAT | Photon-Assisted Tunneling |
| STJ | Superconducting Tunnel Junction |
| TPG | THz Parametric Generation |
| TPO | Terahertz Parametric Oscillator |

참고 문헌

- [1] B.B. Hu and M.C. Nuss, “Imaging with Terahertz Waves,” *Opt. Lett.*, Vol.20, 1995, p.1716.
- [2] D.M. Mittleman et al., “T-ray Tomography,” *Opt.*

● 용어해설 ●

TPO 광원: 최근에 개발된 THz파 신호원(광원) 기술 중 에서 중요한 아이템으로서, 비선형광학결정(예, LiNbO₃ 등) 좌우에 고 반사율 거울(mirror) 면을 위치시킨 후, 광 손실이 작은 공진기 내에 이를 구성함으로써 특정한 파장값을 가지는 고효율 THz 신호원인 광주입형 테라헤르츠 파라메트릭 발진기(TPO)가 있음. 그리고 비선형광학결정(예, MgO-LiNbO₃ 등)에 나노초 레이저 펄스를 조사하면 광여기되는 광주입형 파라메트릭 THz 발생기(TPG)가 있음.

- Lett.*, Vol.22, 1997, p.904.
- [3] Z. Jiang, X.G. Nu, and X.C. Zhang, "Improvement of Terahertz Imaging with a Dynamic Subtraction Technique," *Appl. Opt.*, Vol.39, 2000, p.2982.
- [4] M. Yamashita et al., "Imaging of Large-scale Integrated Circuits Using Laser-terahertz Emission Microscopy," *Opt. Exp.*, Vol.13, 2005, p.115.
- [5] Y. Wantanabe et al., "Component Spatial Pattern Analysis of Chemicals Using Terahertz Spectroscopic Imaging," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.83, 2003, p.800.
- [6] K. Kawase et al., "Non-destructive Terahertz Imaging of Illicit Drugs Using Spectral Fingerprints," *Opt. Exp.*, 2003, Vol.11, p.2549.
- [7] A. Dobroiu et al., "Terahertz Imaging System Based on a Backward-Wave Oscillator," *Appl. Opt.*, Vol.43, 2004, p.5637.
- [8] H. Matsuo et al., "Development of Submillimeter-wave Camera for Atacama Submillimeter Telescope Experiment," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.11, 2001, p.688.
- [9] S. Ariyoshi et al., "Characterization of an STJ-based Direct Detector of Submillimeter Waves," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.15, 2005, p.920.
- [10] J.R. Tucker and M.F. Millea, "Photon Detection in Nonlinear Tunneling Devices," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.33, 1978, p.611.
- [11] H. Sato et al., "Improved Fabrication Method for Nb/Al/AlOx/Al/Nb Superconducting Tunnel Junctions as X-Ray Detectors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.39, 2000, p.5090.
- [12] C. Otani et al., "A Broadband THz Radiation Detector Using a Nb-based Superconducting Tunnel Junction," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.15, 2005, p.591.
- [13] K. Kawase, J. Shkata, and H. Ito, "Terahertz Wave Parametric Source," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.35, R1, 2002.
- [14] Y. Watanabe et al., "Spatial Pattern Separation of Chemicals and Frequency-Independent Components by Terahertz Spectroscopic Imaging," *Appl. Opt.*, Vol.42, 2003, p.5744.