

## ZnTe 결정을 이용한 테라헤르츠파의 발생 및 검출 특성

진윤식<sup>†</sup> · 전석기 · 김근주 · 손채화 · 정순신

한국전기연구원 전기물리연구그룹  
Ⓞ 641-120 경남 창원시 성주동 28-1

(2005년 8월 11일 받음, 2005년 12월 19일 수정본 받음)

(110) ZnTe 결정을 사용한 광정류(Optical Rectification)법에 의한 테라헤르츠파의 발생과 자유공간 전광 샘플링(Free-Space Electro-Optic Sampling; FS-EOS)법에 의한 테라헤르츠파의 검출특성에 대해서 보고한다. ZnTe 결정에 펄프용 레이저 광에 대한 반사방지막 코팅을 실시함으로써 테라헤르츠파 신호크기가 27% 증가함을 알 수 있었다. ZnTe결정의 두께가 얇을수록 테라헤르츠파의 신호의 크기는 작으나 광대역의 주파수를 가진 스펙트럼이 얻어졌다. 또한 레이저 광의 편광방향과 ZnTe 결정의 (001)축사이의 각도에 따른 테라헤르츠파의 신호 변화, 펄프광 출력에 따른 테라헤르츠파의 신호크기 변화 등에 대한 특성이 조사되었다.

주제어 : Terahertz, Optical rectification, Electro-optic Sampling, ZnTe crystal.

### I. 서 론

최근 테라헤르츠파에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되고 있다. 테라헤르츠파가 가진 고유한 특성을 이용한 분광 및 이미징 기술은 신물질, 의료, 바이오, 보안, 국방, 환경, 우주 및 통신 등과 같은 다양한 고부가가치 서비스 및 첨단 산업 분야에서 관심을 갖고 있을 만큼 매력적인 연구 분야로 성장하고 있다<sup>[1-4]</sup>. 따라서 향후 5-10년 이내에 테라헤르츠 시스템의 기술 수준과 상용화 가능성이 크게 확장될 것으로 전망된다. 이와 같은 전망은 미국의 MIT대학 발행의 Technical Review 지가 2004년 2월, 경제와 인간의 삶에 큰 영향을 미치는 10대 기술로서 테라헤르츠 기술을 6번째로 선정한 사실과 2005년 1월초 일본정부가 일본의 미래 10대 근간기술로서 테라헤르츠 기술을 첫 번째로 선정한 것 등이 뒷받침해 준다.

광정류(Optical Rectification)법에 의한 테라헤르츠파의 발생은 광전도 안테나법과 반도체 표면전계법과 더불어 대표적인 펄스형 테라헤르츠파의 발생법으로 활용되고 있으며, 장치 구성의 용이성과 고주파수의 광대역 펄스가 얻어지는 점 등의 장점이 있다. 또한 자유공간 전광 샘플링(Free-Space Electro-Optic Sampling; FS-EOS)법에 의한 테라헤르츠파의 검출 방법은 광전도 안테나법에 비해 감도는 떨어지나 광대역의 주파수 응답특성, 사용의 용이성 등의 장점 때문에 펄스형 테라헤르츠파의 측정법으로서 연구 초기부터 많이 사용되어져 왔다<sup>[5]</sup>. ZnTe 결정을 이용한 테라헤르츠파의 발생 및 검출에 관하여 선행된 많은 연구들이 발생기와 검출기에 동시에 ZnTe결정을 이용하지 않고, 광전도 안테나에 의하여 테라헤르츠파를 발생하고 전광 샘플링법에 의해 계측하거나, 광정류법에 의해 발생하고 광전도 안테나로 측정하는 방식

을 사용하였다. 그러나 발생과 계측 모두에 (110) ZnTe 결정을 적용한 시스템의 동작특성에 대해서는 구체적인 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 발생과 계측 모두에 비선형 광학소자를 이용한 시스템을 구축하여 이 시스템의 동작특성에 대하여 체계적인 조사를 수행하였다. 구체적으로는 ZnTe 결정두께에 따른 발생 및 검출특성, 펄프 및 검출광의 편광방향과 ZnTe 결정의 광축과 상대적 각도에 따른 테라헤르츠파 신호변화, 펄프광의 강도에 따른 테라헤르츠파 신호 강도 및 포화특성 등에 관하여 보고한다. 또한 광전도 안테나를 이용한 테라헤르츠파 발생에서는 테라헤르츠파의 강도가 안테나에 인가된 바이어스 전압과 펄프 레이저광에 의해 결정되는데 반하여 비선형 광학소자를 이용하는 광정류 방식에서는 테라헤르츠파의 강도가 펄프 레이저의 강도에만 의존한다. 따라서 광정류 방식에서 테라헤르츠파의 신호를 증가시키기 위해서는 펄프 레이저의 출력을 높여야 한다. 본 연구에서는 제한된 레이저 출력으로 테라헤르츠파의 신호를 증대시키는 방법으로서 ZnTe 결정 표면에 반사방지막을 코팅하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 반사방지 코팅막은 또한 펄프(또는 검출)광이 결정표면에서 반사되어 펄프 초 레이저에 역으로 입사되어 레이저의 동작에 악영향을 주는 것을 줄이는 효과도 기대할 수 있다.

### II. 광정류 테라헤르츠파 발생 및 EOS 테라헤르츠파 검출 시스템

광정류에 의한 테라헤르츠파의 발생과 EOS에 의한 계측을 위한 전체시스템의 구성을 그림 1에 보인다. 펄프 및 검출에 사용된 극초단 레이저는 상용의 모드 잠금 티타늄 사파이어 레이저(Spectra Physics MaiTai)이며, 발진파장 780-920 nm에서 펄스폭은 70-120 fs를 가지며 반복율은 80 MHz, 평균 출력은 600-1200 mW이다. 본 실험에서는 레이저 파장을 비

<sup>†</sup> E-mail: ysjin@keri.re.kr

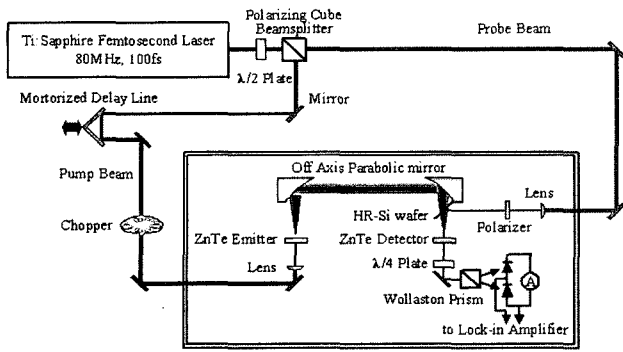


그림 1. ZnTe 결정을 채용한 광정류에 의한 테라헤르츠파 발생 및 EOS에 의한 검출장치 구성도

교적 동작 특성이 우수한 800 nm에 고정하여 사용하였으며 이 때의 레이저 펄스폭은 약 70 fs 이다. 레이저에서 나온 펄스 레이저 빔은 반파장판(half-waveplate)와 편광 빔 분배기(polarizing beam splitter)에 의하여 테라헤르츠파 발생을 위한 펌프빔과 테라헤르츠파를 측정하기 위한 검출빔으로 나누어진다. 레이저로부터 나오는 편광된 레이저 빔과 반파장판의 광축사이의 각도를 변화시킴으로서 편광 빔 분배기에서 펌프광과 검출광의 상대적 강도를 조절할 수 있게 된다. 펌프 레이저 빔은 렌즈에 의해 집속되어 광정류를 위한 ZnTe 결정에 조사된다. 광정류는 영이 아닌 2차 투자율 계수( $\chi^{(2)}$ )를 가지는 물질에서 발생하는 2차 비선형효과로서, 극초단의 레이저 펄스가 광학결정에 조사되면 결정내에 순시분극(transient polarization)  $P(t)$ 을 유기하고 이 순시분극의 2차 시간 미분에 비례하는( $E_{THz} \propto \partial^2 P_{OR} / \partial t^2$ ) 전자기파(THz 파)를 방사한다. GaAs, LiTaO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, DAST, ZnTe 등의 결정에서 광정류에 의한 THz파의 발전이 확인되었으나, ZnTe 결정이 화학적으로 안정하고, 비교적 큰 전기광학계수(electrooptic coefficient = 4.04 pm/V)를 가지고 있으며, 테라헤르츠파와 펌프용(검출용) 가시광파의 군속도 정합성( $n(800 \text{ nm}) = 2.853$ ,  $n(300 \mu\text{m}) = 3.178$ ) 면에서 우수한 성질을 가지고 있어<sup>[6]</sup> 최근에는 대부분의 시스템에서 이 결정을 사용하고 있다. 두께에 따른 테라헤르츠파의 발생 및 검출 특성을 조사하기 위하여 1 mm, 0.5 mm 그리고 0.1 mm 두께의 ZnTe (110) 결정(일본 Nikko Material Co.)을 사용하였다. ZnTe 결정에서 발생된 테라헤르츠파 빔은 2개의 off-axis parabolic mirror(초점거리 = 10 cm)에 의해 검출용 ZnTe 결정에 유도된다.

한편 검출용 레이저 빔은 광지연기(optical delay line)와 편광자를 거쳐 테라헤르츠파 빔 광로상에 설치된 고저항 실리콘 웨이퍼에 반사되어 테라헤르츠파 빔과 평행하게 검출용 ZnTe 결정에 조사된다. 검출용 레이저 빔은 광지연기에 의해 펌프광과 시간차를 가지고 검출기 결정에 도달한다. 테라헤르츠파 펄스가 검출용 ZnTe 결정에 입사하게 되면 광전효과(linear electrooptic effect or Pockels effect)에 의해 테라헤르츠파 전기장은 결정내에 복굴절(birefringence)을 유기한다.

이 복굴절은 편광된 검출용 레이저 빔의 위상지연을 일으키고 이 위상지연의 정도는 테라헤르츠파의 전기장 세기에 비례한다. 테라헤르츠파가 없는 경우, 선형 편광된 검출빔은 ZnTe를 통과하여  $\lambda/4$  파장판(quarter-wave plate)을 지나면 원편광이 되고 Wallaston Prism에 의해 두개의 편광성분(p-파와 s-파)으로 나누어져 두개의 광다이오드로 구성된 평형 광다이오드(balanced photo diode)에 전달된다. 이때 원편광된 빔으로부터 분리된 p-파와 s-파의 진폭은 동일하므로 밸런스 광다이오드에 흐르는 전류는 영이 된다. 그러나 테라헤르츠파가 검출빔과 동일하게 ZnTe 결정에 입사되면 검출빔의 전파방향에 수직인 두 편광성분은 서로 다른 굴절률을 겪게 됨으로서 두 성분 사이에 위상 지연이 발생한다. 위상지연이 발생한 검출빔은  $\lambda/4$  파장판(quarter-wave plate)을 지나면 타원편광(elliptical polarization)이 되고 Wallaston Prism에 의해 강도가 다른 두개의 편광성분으로 나누어져 평형 광다이오드에 입사하므로 검출회로에 전류가 흐르게 된다. ZnTe 결정을 이용한 EOS 시스템에서의 테라헤르츠파 펄스의 전개는 다음 식으로 주어진다<sup>[7]</sup>.

$$E_{THz} = \left( \frac{-\Delta I}{I_0} \right) \cdot \frac{2c}{\omega n_0^3 r_{41} d} \quad (1)$$

여기에서  $\Delta I = I_1 - I_2$  로서 두 다이오드를 흐르는 전류의 차이이며,  $I_0 = I_1 + I_2$  로서 검출빔에 의해 발생하는 광다이오드 전류의 합이다.  $\omega$ 는 검출빔의 각주파수이며  $n_0$ 는 검출빔에 대한 ZnTe 결정의 굴절률(800nm에서 3.178)이며,  $r_{41}(= 3.9 \text{ pm/V})$ 은 ZnTe 결정의 전기광학계수이며,  $d$ 는 결정의 두께이다. 신호대 잡음비를 개선하기 위하여 펌프빔은 기계식 초퍼를 이용하여 1.5kHz로 변조시켰다. 밸런스 다이오드로부터의 출력신호( $\Delta I$ )는 상용의 Lock-in Amplifier (Standford Research사의 SR 830)를 이용하여 측정하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 반사방지 코팅 효과

광정류에 의한 테라헤르츠파를 발생시키기 위해서 전기광학 결정을 이용할 경우, 결정 표면에서 반사되는 펄스 레이저 광은 레이저 공진기에 피드백되어 레이저 동작에 영향을 미쳐 펄스 레이저의 모드잠김 동작을 정지시키거나 하는 악영향을 끼칠 뿐 아니라, 효율적인 레이저 출력의 이용 면에서도 불리하게 작용하여 발생하는 테라헤르츠파의 출력의 감소를 초래한다. 상용의 ZnTe결정은 표면이 미러연마(mirror finish)로 처리되어 있어 아래 표 1에 보이는 바와 같이 800 nm파장의 레이저 광에 대해서 1 mm 두께의 ZnTe 결정은 약 30%의 반사를 보인다. 이와 같은 반사문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 ZnTe 결정 표면에 유전체의 반사방지막을 코팅하여 반사율을 감소시키는 방법을 처음으로 제안하였다. 반사방지막은 ZnTe결정의 펌프광 파장에 대한 굴절률을 고려하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 재료로 사용하였고 막의 두

표 3. 800 nm 레이저 광에 대한 ZnTe 결정의 광학적 특성(두께 ; 1 mm, 반사각 : 10°)

	입사(mW)	반사(mW)(반사율)
코팅하지 않은 ZnTe	400	127(31.75%)
반사방지 코팅 ZnTe	400	7(1.75%)

계는  $600 \pm 10$  nm이다. 반사방지 코팅을 실시한 후 펄프용 레이저 광에 대한 반사율을 2% 이하로 억제할 수 있었다(표 1 참조). 반사율이 감소한다는 것은 동일한 레이저 입사에너지에 대해서 결정내로 투입되는 에너지가 증가함을 의미하고 따라서 더욱 큰 테라헤르츠파 신호가 발생될 것으로 기대할 수 있다. 그림 2에 테라헤르츠파의 이미터(emitter)와 검출기(detector)에 전반사코팅을 실시한 ZnTe 결정을 사용하였을 때의 테라헤르츠파 신호의 변화를 보인다. 본 실험에서는 1 mm 두께의 ZnTe 결정을 사용하였다.

그림 (a)에서는 코팅되지 않은 ZnTe 결정을 검출기로 사용하고, 이미터 결정에 코팅을 한 경우와 하지 않은 경우의 신

호크기 변화로서, 코팅을 실시한 결정을 사용시 약 18%의 신호크기의 증가가 있었다. 그림 (b)는 이미터로서는 코팅되지 않은 결정을 사용하고 검출기에 코팅을 실시한 것과 실시하지 않은 것 사이의 변화를 나타내고 있는데, 코팅을 실시한 검출기에서 크기가 약 6%의 증가한 테라헤르츠파 신호를 얻었다. 마지막으로 그림 (c)는 이미터와 검출기 모두에 반사방지 코팅을 실시한 경우와 실시하지 않은 경우의 테라헤르츠파 신호의 크기 변화를 나타낸 것으로서, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 코팅을 실시함으로써 약 27%의 신호크기의 증가효과를 낼 수 있었다. 반사방지막 코팅에 따른 테라헤르츠파의 스펙트럼 변화는 관찰되지 않았으며, 테라헤르츠파의 발생 및 검출에 다른 악영향은 없는 것으로 판단된다. 상기의 결과는 전기광학 결정을 테라헤르츠파의 발생 및 검출용으로 사용할 때 결정표면에서의 반사에 의한 레이저의 고장을 줄이고, 테라헤르츠파의 신호를 증가시키는데 있어서 반사방지 코팅이 매우 유효함을 입증하는 결과라 할 수 있다. 이하의 실험에서는 반사방지막을 코팅한 ZnTe 결정들을 사용하여 실험을 진행하였다.

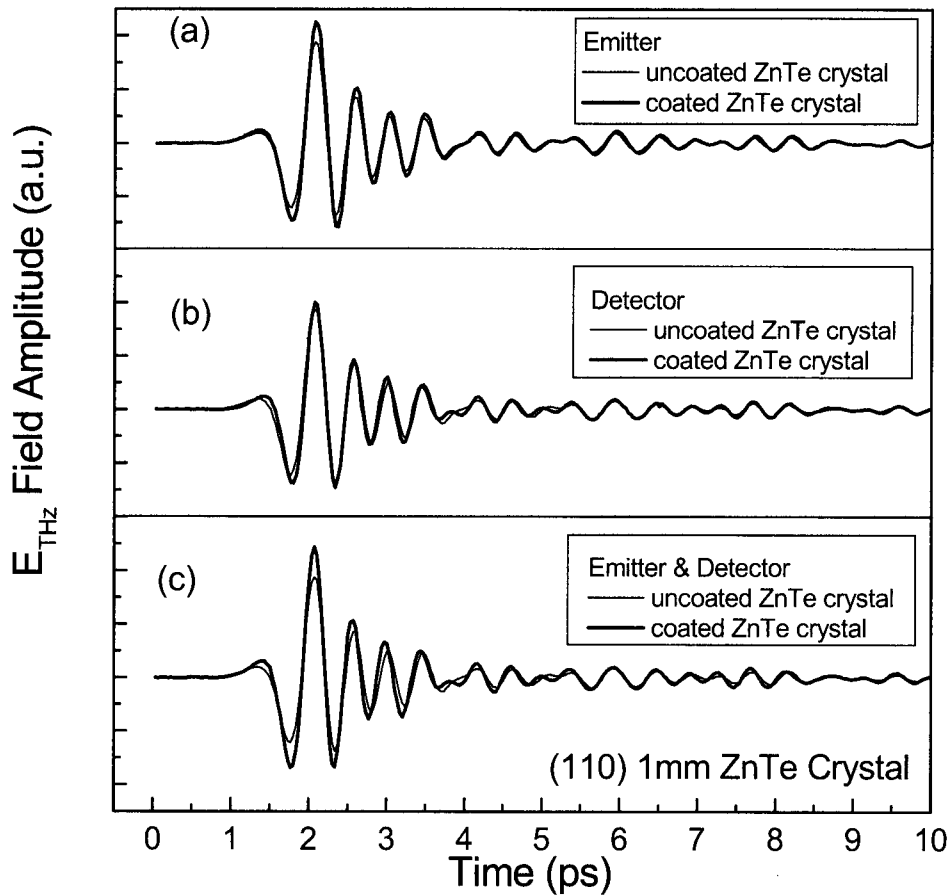


그림 2. ZnTe 결정의 반사방지 코팅 유무에 따른 테라헤르츠파 신호의 크기 변화 (a)uncoated detector (b) uncoated emitter (c)검출기와 이미터 동시 변화.

### 3.2 ZnTe 결정 두께에 따른 발생 및 검출 특성

그림 3은 검출기에 1 mm의 ZnTe 결정을 이용하고 이미터로서 결정의 두께를 1 mm, 0.5 mm, 0.1 mm로 변화시켰을 때의 테라헤르츠파 신호의 크기 및 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 결정의 두께가 증가할수록 신호의 크기는 증가하나 스펙트럼 폭은 감소함을 알 수 있다. 비선형 결정에서의 광정류에 의해 발생된 테라헤르츠 펄스의 파형과 대역폭은 여기 레이저 펄스의 시간적 형상(펄스폭)과 대역폭, 동시에 전파해가는 광과 테라헤르츠파의 결정내에서의 위상 비정합(mismatch) 그리고 결정내에서의 테라헤르츠파의 흡수 등에 의해 결정된다. 결정의 두께 변화는 위상의 비정합 정도와 테라헤르츠파의 흡수에 영향을 미친다. 펌프광과 THz파의 위상차 ( $\delta$ )는 다음식으로 주어진다.

$$\delta = \frac{d}{c}(\sqrt{\epsilon(\omega)} - n_g) = \frac{d}{c} \Delta n \quad (2)$$

여기에서  $d$  는 결정의 두께이고,  $c$ 는 빛의 속도,  $n_g$ 는 레이저 펄스에 대한 굴절률,  $\epsilon(\omega)$  는 THz 주파수  $\omega$ 에서의 결정의 유전상수이다. 결정의 두께가 증가하면 펌프광이 긴 광로를 진행하면서 광자의 많은 수가 광정류에 기여하여 테라헤르츠파의 전계가 커지는 반면 테라헤르츠파의 흡수도 증가하고 위상 정합도도 감소하므로 상기의 결과가 얻어지는 것으로 추정된다.

그림 4는 이미터로서 0.1 mm의 ZnTe 결정을 이용하고 검출기에 두께가 다른 결정을 이용했을 때 시간에 따른 테라헤르츠파의 파형 및 주파수 스펙트럼의 변화를 보인다. 광정류에 대한 특성을 나타내는 그림 3에서와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. EOS에 의한 테라헤르츠파의 측정에 있어서 결정의 두께가 증가할수록 테라헤르츠파 전계에 의한 검출 빔의 전파효과를 일으키는 경로가 길어지므로 검출빔의 위

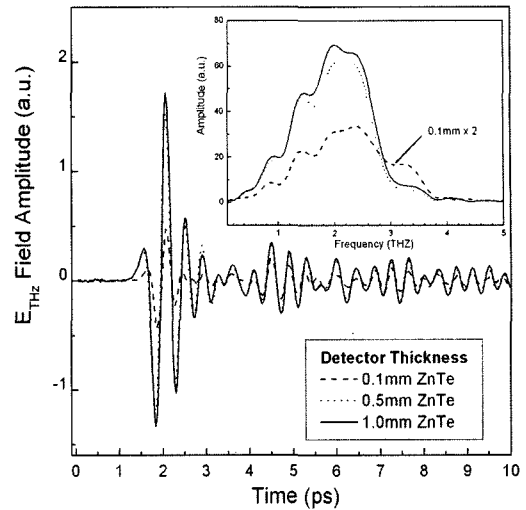


그림 4. 검출기 두께에 따른 테라헤르츠파의 파형 및 스펙트럼 변화(이미터: 1 mm ZnTe 결정).

상지연의 정도가 증가하여 검출되는 테라헤르츠파의 신호의 크기가 증가하지만 검출광과 테라헤르츠파 사이의 완벽한 위상 정합은 어렵게 된다. 얇은 결정에서는 위상 비정합에 의한 분산(dispersion)이 적게 일어나므로 더욱 넓은 대역폭에 대한 검출이 가능한 것으로 이해할 수 있다.

그림 5에 이미터와 검출기 모두에 ZnTe 결정을 이용하는 본 실험장치의 특성을 살린 결정 두께에 대한 효과를 나타내었다. 즉 이미터와 검출기에 동일한 두께의 결정을 사용하여 테라헤르츠파 신호의 시간적 파형과 주파수 스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 1 mm의 결정을 사용한 경우 0.1 mm 결정에 비해 약 9배의 신호크기 증가가 있지만, 유효한 대역폭에 있어서는 0.1 - 2.8 THz 로서 0.1mm 결정의 0.1 - 3.8 THz

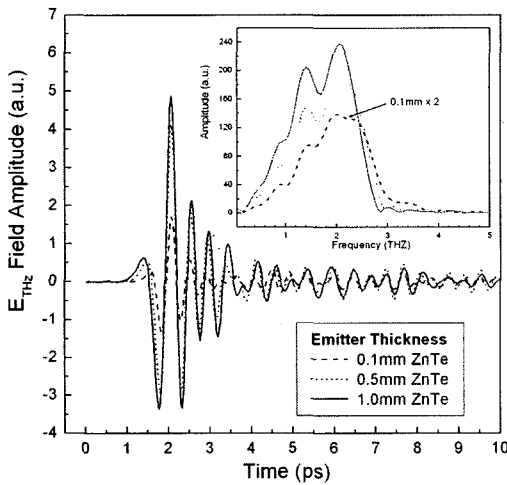


그림 3. 이미터 두께에 따른 테라헤르츠파의 파형 및 스펙트럼 변화(검출기: 1 mm ZnTe 결정).

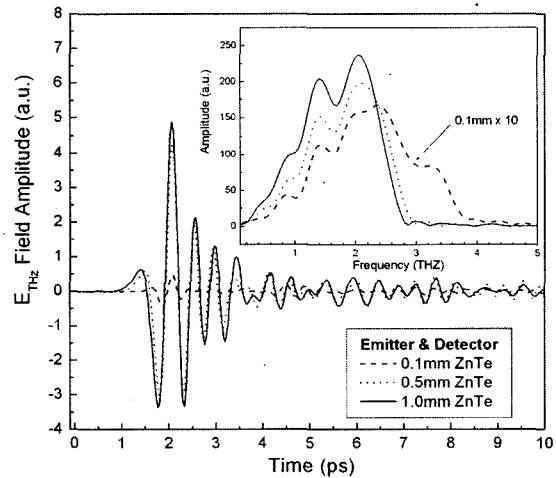


그림 5. 이미터와 검출기의 두께를 동시에 변화 시켰을 때의 테라헤르츠파 파형 및 스펙트럼 변화.

보다 약 1 THz의 좁은 스펙트럼이 얻어졌다. 광정류와 EOS에 의한 테라헤르츠파의 발생 및 검출에 있어서 결정의 두께는 분광 및 이미징의 대상에 따라 적절히 선택하여 사용함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있을 것이며, 상기의 실험결과는 하나의 참고 데이터로서 활용할 수 있을 것이다.

**3.3 ZnTe 결정방향 의존성**

광정류는 2차 비선형 광학현상이고, ZnTe 결정으로부터의 광정류에 의한 테라헤르츠파의 발생은 결정의 방위(orientation)에 의하여 강하게 영향 받는다. 쌍극자 근사에 의하면 원거리장에서의 테라헤르츠 전자기파의 전계는 광유도 분극의 2차 시간 미분에 비례한다. 광정류에 의한 테라헤르츠파의 발생시, GaAs, CdTe, InP, ZnTe와 같은 첨아연광(zinc-blende) 결정들에 대한 레이저 빔의 편광 방향과 결정의 방위에 따른 테라헤르츠파의 변동에 대한 이론적, 실험적 연구들이 진행되었다<sup>8-10)</sup>. 그러나 대부분의 연구에서 이미터로 광전도 안테나를 이용하고 검출기를 전기광학 소자로 사용하거나<sup>9)</sup>, 전기광학 소자(ZnTe)를 이미터로 하고, 검출기를 광전도 안테나를 이용하는 방법<sup>10)</sup>을 취했으나 본 연구에서는 이미터와 검출기 모두에 ZnTe 결정을 이용하여 결정의 방위에 따른 테라헤르츠파의 변화를 측정하였다. 레이저의 편광방향은 고정하고, 이미터와 검출기의 ZnTe 결정을 회전시키면서 테라헤르츠파 신호의 피크값을 측정하였다. 그림 6 (a), (b)에 펌프빔 레이저의 편광방향과 ZnTe (110) 결정의 <0,0,1> 방향 사이의 방위각( $\theta$ )을 변화시켰을 때의 테라헤르츠파의 변화를 보인다. 펌프빔을 기준으로 펌프빔의 편광방향과 같은 방향의 편광을 가진 테라헤르츠파 성분(a)과 수직인 테라헤르츠파 성분(b)을 각각 측정할 수 있었다. 원으로 나타낸 실험결과치와 참고문헌 10에서 제시한 이론식( $P_{\parallel} \propto (\cos 3\theta - \cos \theta)$ ,  $P_{\perp} \propto (3\cos \theta + \cos 3\theta)$ )을 나타낸 실선과 잘 일치함을 알 수 있다. 그림에 나타낸 결과는 펌프빔과 검출빔의 편광방향은 동일한 방향일 때이며, 펌프빔과 검출빔의 편광 방향을 수직으로 하면 신호의 위상이 180도 이동하여 x축(각도축)에 대칭인 형태가 나옴을 알 수 있었고 이러한 결과는 참고문헌<sup>9)</sup>에서 제시하는 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

**3.4 펌프광 레이저 출력 의존성**

광정류에 의해 발생된 테라헤르츠파의 전계의 진폭은 낮은 에너지 밀도(fluence)에서는 펌프 파워에 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있다. 그러나 DAST나 ZnTe 결정에서는 신호크기의 포화가 관찰되었다<sup>11-12)</sup>. 이것은 최대의 변환 효율을 달성하기 위한 결정의 위치가 펌프 레이저 빔의 초점에 있지 않고 초점보다 약간 벗어난 위치에 있을 수도 있다는 사실을 암시한다. 그림 7에 ZnTe 결정의 집광렌즈(초점거리 10 cm)로부터의 거리에 따른 테라헤르츠파 진폭의 변화를 보인다. 초점에서보다 초점에서 2 cm 벗어난 거리(8 cm)에서 최대값을 보인다. 이 결과는 렌즈로 펌프 빔을 최대로 집속했을 때, 단위면적당 펄스 출력 밀도(약 7.4 MW/cm<sup>2</sup>)

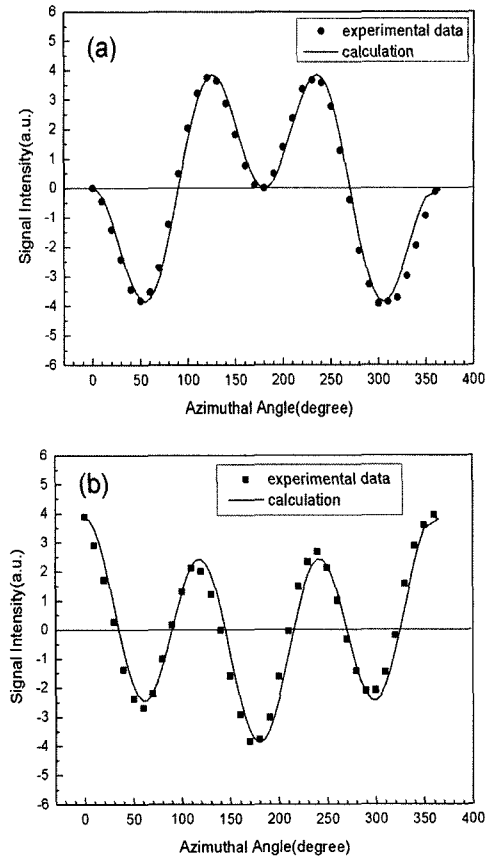


그림 6. ZnTe (110) 결정의 <0,0,1>방향과 펌프광의 편광방향이 이루는 방위각에 따른 테라헤르츠파 신호의 크기변화 (a) 펌프광의 편광방향과 평행인 테라헤르츠파의 성분, (b) 펌프광의 편광방향과 수직인 테라헤르츠파의 성분.

가 광정류 작용의 포화를 일으킬 정도로 강한 반면 8 cm 위치에서의 레이저 펄스 출력 밀도는 약 0.22 MW/cm<sup>2</sup> 로서 포화를 일으키지 않으면서 상대적으로 큰 체적에서 광정류 작용이 일어나므로 큰 테라헤르츠파 신호가 나오는 것으로 추정된다. 이러한 추정을 근거로 초점위치(10 cm)에서와 8 cm에서 펌프 레이저 파워의 변화에 따른 테라헤르츠파 신호의 크기 변화를 관찰하였다 (그림 8). 레이저 파워 400 mW에서 최대로 집속하여도 ZnTe 결정의 손상은 발생하지 않았다. 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 테라헤르츠파 신호의 크기는 8 cm에서 전반적으로 큰 신호를 얻을 수 있었으며, 초점에서는 낮은 파워에서 포화가 나타나기 시작하며 이때의 레이저 펄스 파워밀도는 약 2 MW/cm<sup>2</sup>으로 계산되었다. 거리 8 cm에서는 거의 포화가 관찰되지 않았는데 8 cm에서의 빔 직경의 증가를 고려한 레이저 펄스의 파워 밀도는 400 mW에서 약 0.3 MW/cm<sup>2</sup>으로 포화가 일어나기까지는 많은 여유가 있다. 본 실험의 결과 제한된 레이저 파워로 큰 진폭의 테라헤르츠파 신호를 얻기 위해서는 집속 렌즈의 초점보다는 약간 벗어난 위치에 ZnTe 결정을 위치시키고 레이저

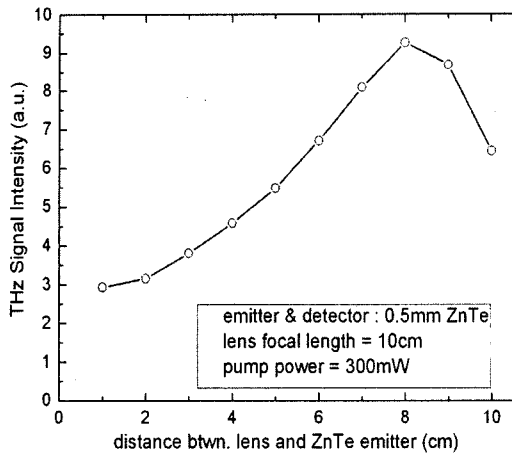


그림 7. 집속렌즈로부터의 거리에 따른 테라헤르츠파 신호의 크기 변화.

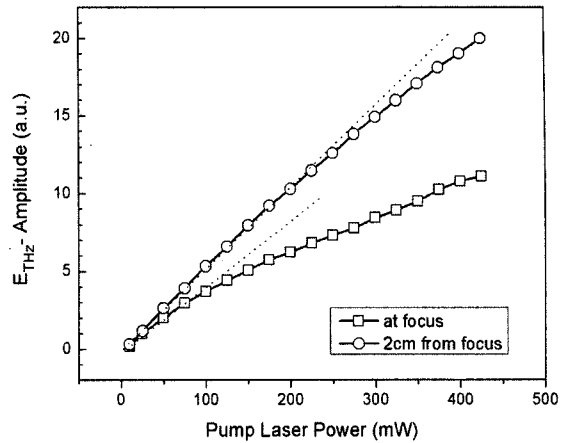


그림 8. 펌프 레이저 파워에 따른 테라헤르츠파 신호의 크기 변화

파워 밀도는  $2 \text{ MW/cm}^2$  이하로 유지하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다. 식 (1)을 이용하여 계산하면 그림 8의 8 cm 위치에서의 테라헤르츠파 전계의 최대값은 약  $4 \text{ V/cm}$  로 계산되었다.

#### IV. 결 론

광정류에 의한 테라헤르츠파의 발생과 전광 샘플링에 의한 계측을 위해 이미터와 검출기에 (110) 방향의 ZnTe 결정을 적용하여 테라헤르츠파의 발생 및 검출특성에 대하여 조사하였다. 결정의 표면에 펌프 및 검출용 레이저 광에 대한 반사를 줄이고, 테라헤르츠파 신호 크기의 증가시키기 위해 결정 표면에 반사방지용 박막을 코팅하는 방법을 제안하였다. 결정의 두께, 결정의 방향성 그리고 펌프용 레이저빔의 집속 렌즈와 결정의 위치에 대한 테라헤르츠파의 발생 및 검출 특성에 대한 체계적인 조사를 하였고 실험결과에 대한 해석을 하였다. 본 연구 실험의 결과가 국내 테라헤르츠파 연구의 발전에 조그만 밑거름이 되길 기대한다.

#### 감사의 글

We would like to deeply appreciate Prof. X.-C. Zhang and his THz laboratory members for their advices and useful discussions.

#### 참고문헌

[1] B. Ferguson and X. -C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology," *Nature Materials*, vol. 1, pp. 26-33. 2002.  
 [2] R. M. Woodward, B. E. Cole, V. P. Wallace, R. J. Pye,

D. D. Arnone, E. H. Linfield and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue," *Phys. Med. Biol.* vol. 47, pp. 3853-3863, 2002.  
 [3] V.M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald, W. R. Tribe, "Security applications of terahertz technology," *Proc. of SPIE*, vol. 5070, pp. 44-51, 2003.  
 [4] 전태인, 김근주, "좁은 간격의 테라헤르츠파 다이폴 안테나를 이용한 이진신호의 발생과 검출", *한국광학회지*, 제 13권, pp. 430-433, 2002.  
 [5] D. Dragoman and M. Dragoman, "Terahertz fields and applications," *Progress in Quantum Electronics*, vol 28, pp. 1-66, 2004.  
 [6] Q. Wu and X. -C. Zhang, "Ultrafast electro-optic field sensors," *Appl. Phys. Lett.* vol. 68, pp. 1604-1606, 1996.  
 [7] G. Zhao, R. N. Schouten, N. van der Valk, W. Th. Wenckebach, and P. C. M. Planken, "Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 73, pp. 1715-1719, 2002.  
 [8] A. Rice, Y. Jin, X. F. Ma, X. -C. Zhang, D. Bliss, J. Larkin, and M. Alexander, "Terahertz optical rectification from <110> zinc-blende crystals," *Appl. Phys. Lett.* vol. 64, pp. 1324-1326, 1994.  
 [9] P. C. M. Planken, H. K. Nienhuys, H. J. Bakker and T. Wenckebath, "Measurement and calculation of the orientation dependence of terahertz pulse detection in ZnTe," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 18, pp. 313-317, 2001.  
 [10] Q. Chen and X. -C. Zhang, "Polarization modulation in optoelectronic generation and detection of terahertz beams," *Appl. Phys. Lett.*, vol 74, pp. 3435-3437, 1999.  
 [11] T. J. Carrig, G. Rodriguez, T. Sharp Clement, A. J. Taylor, and K. R. Stewart, "Scaling of terahertz radiation via optical rectification in electro-optic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol.

66, pp. 121-123, 1995.

[12] F. G. Sun, X. -C. Zhang and W. Ji, "Two-Photon-

Absorption Induced Saturation of THz Radiation in ZnTe,"  
CLEO, *OSA Technical Digest*, p. 479, 2000.

### **Pulsed Terahertz Emission and Detection Properties from ZnTe Crystal**

Yun-Sik Jin, Seuk-Gy Jeon, Keun-Ju Kim, Chae-Hwa Sohn and Sun-Shin Jung

*Applied electro-physics research group, Korea Electrotechnology Research Institute,  
Changwon 641-600, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: ysjin@keri.re.kr*

(Received August 11, 2005, Revised manuscript December 19, 2005)

Pulsed terahertz (THz) radiation was generated by optical rectification and detected by a free space electro-optic sampling (FS-EOS) method. We used ZnTe (110) crystals for both generation and detection. By coating dielectric anti-reflection film on the ZnTe crystal surface, we can reduce the reflectance of a pump laser beam from 30% to 2%, and the terahertz pulse amplitude increased 27% compared with an uncoated crystal. A wider bandwidth of THz radiation was obtained by using a thinner crystal but the signal intensity was decreased in this case. And variations of THz radiation by changing orientation of the ZnTe crystal with respect to the pump (or probe) laser polarization, and by changing the power of the pump laser have also been investigated and discussed.

OCIS Code : 190.7110. 190.4400. 140.7090.