

평행판 도파관 THz 분광을 이용한 폭발물 RDX 검출

Detection of Explosive RDX using Parallel Plate Waveguide THz-TDS

유 병 화[†] · 정 동 철* · 강 승 범** · 콧 민 환*** · 강 광 용[§]

(Byung Hwa Yoo · Dong Chul Chung · Seung Beom Kang · Min Hwan Kwak · Gwang-Yong Kang)

Abstract - In this paper we presented the detection of the explosive material RDX using a parallel plate waveguide (PPWG) THz time domain spectroscopy (TDS). Normally the explosive materials have been characterized through identification of vibrational fingerprint spectra. Until now, most of all THz spectroscopic measurements have been made using pellet samples where disorder effects contribute to line broadening such that individual resonances merge into relatively broad absorption features. In order to avoid such disadvantages we used the technique of PPWG THz-TDS to achieve sensitive characterization of explosive material RDX. The PPWG THz-TDS used in this work well established ultrafast optoelectronic techniques to generate and detect sub-picosecond THz pulses. The explosive material was analyzed as powder layers in 112 μm gap of metal PPWG. The thin later mass was estimated to be about 700 μg . Finally, we showed spectra of explosives from 0.2 to 2.4 THz measured using PPWG THz-TDS.

Key Words : Terahertz, Waveguide, Spectroscopy, THz-TDS, RDX

1. 서 론

테라헤르츠 (Terahertz, THz)파는 마이크로파와 적외선 사이의 주파수 대역으로 0.1 ~ 10 THz의 주파수 범위를 가지며 1 THz는 1 ps 진동수를 가진다. 또한 테라헤르츠 파는 30 μm 의 파장, 33 cm^{-1} 의 파수, 에너지로는 4.1 meV에 해당하고 등가온도는 47.6 K를 가지는 원 적외선 영역의 전자파이다. 더불어 테라헤르츠 파는 전자와 광파의 중간 성질을 가지며 일반적으로 사용되는 전자 및 광학기술로 테라헤르츠 파의 발생과 측정이 어려워 1990년대 초반까지 "THz Gap"이라 알려져 왔다. 그러나 최근에 반도체 재료 기술의 발전과 광, 나노 기술의 발전으로 테라헤르츠 파 영역에서 많은 진전이 이루어졌다. 테라헤르츠 파 기술은 마이크로파와 광파가 투과 할 수 없는 물질을 쉽게 투과하고, 광파가 가지는 직진성을 동시에 지니고 있어 시간영역 분광학 (THz Time Domain Spectroscopy : THz-TDS) 및 THz-Imaging 등의 기술과 더불어 의료, 물리, 화학, 생물, 보안, 국방, 환경, 신물질 개발, 통신 분야 등 다양한 분야로 그 응용범위가 확대되고 있다 [1-2].

THz-TDS는 THz 주파수 대역의 물질 분석을 위해 사용되는 기술로 물질의 진동 스펙트럼과 구조변화 측정, THz pulse E-field 측정을 통해 위상정보를 직접적으로 얻을 수 있어 복소 굴절률, 복소 유전특성 및 복소 전도특성 측정이 가능하다.

최근 공항, 항만, 지하철 등 주요 공공시설물에 대한 보안 검색에서의 금지약물, 폭발물 감지가 문제가 되고 있는 현실에서 THz-TDS 중요한 응용기술 중 한 분야로 THz 대역에서 미지 물질의 진동 지문(fingerprint) 스펙트럼 확인을 통한 금지약물, 폭발물 감지하는 연구가 활발히 진행되고 있다 [3-6].

본 논문에서는 평행판 도파관 (Parallel plate waveguide : PPWG)을 이용하여 분말 가루 형태의 폭발물인 RDX의 고유 흡수 스펙트럼을 분석하였다. 실험결과, 평행판 도파관을 이용한 THz TDS 분석은 기존의 Teflon sample을 이용한 THz TDS 분석에 비해 극히 미량만으로도 폭발물질을 분석할 수 있었다. 이러한 결과는 추후 평행판 도파관 이용한 THz TDS 분석이 극미량의 생화학 물질 분석 등으로도 활용범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다 [7-8].

2. 실험 장치의 구성

그림 1은 THz-TDS 시스템의 구성도를 보여준다. 이 시스템은 Ti:Sapphire 펄스 레이저, 광학적 시간지연장치, 광전도 안테나방식의 테라헤르츠 발진/검출기, 테라헤르츠 파를 집광시키기 위한 포물면 거울 및 Lock-in amplifier, Optical chopper 등으로 구성되어 있다. 모드 잠금 방식의 Ti:Sapphire 펄스 레이저는 15 ~ 30 fs의 펄스폭과 80 MHz의 반복률로 중심 파장 795 nm, 펄스폭 62 nm의 펄스파를 방사한다. 테라헤르츠 파의 발진 및 검출하기 위한 광전도안테나는 Low-Temperature-Grown GaAs (LT-GaAs)로 제작하여 사용했다. 발진 및 검출 안테나에 입력되는 펄스 레이저의 파워는 각각 40 및 20 mW, 발진기에 가해지는 바이어스 전압은 15 ~ 21 V였다. 또한 수분에 의한 THz 파의 흡수감쇠를 방지하기 위하여, THz 진행경로에

* Dept. of EE Woosuk Univ.

** SE heavy industry central Lab.

*** Dept. of EE, Changwon Moonsung Univ.

§ THz electronics team, ETRI.

† Corresponding Author : Dept of EE, Woosuk Univ.

E-mail : dchung@woosuk.ac.kr

Received : November 10, 2012; Accepted : November 19, 2012

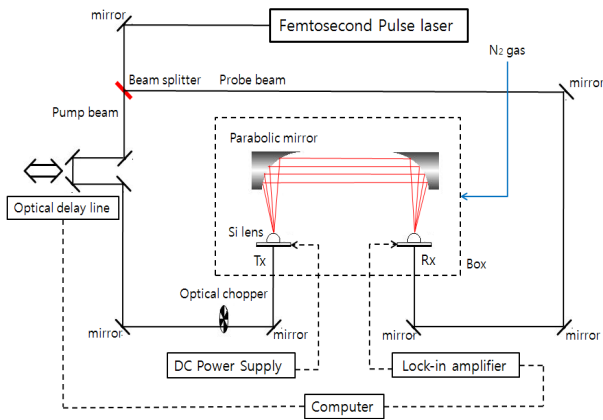


그림 1 THz-TDS 시스템 구성도.
Fig. 1 Schematic diagram of the THz-TDS system.

습기제거용 box를 설치하고 질소를 불어 넣어 주면서 내부 습도를 1% 이하로 유지하였다 [9-10].

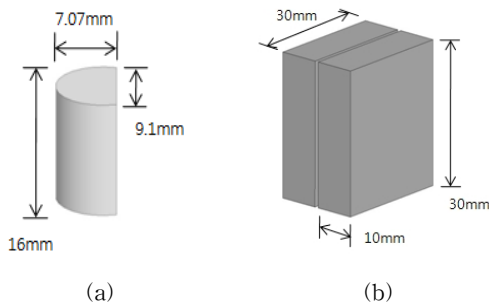
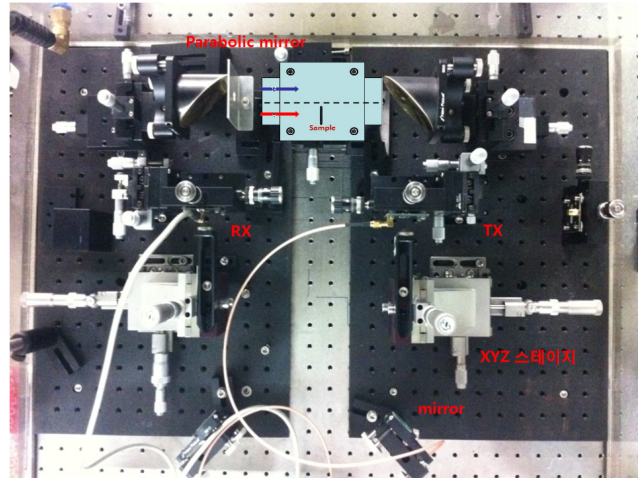


그림 2 (a) 실리콘렌즈 (b) 평행판 도파관.
Fig. 2 (a) Silicon lens (b) PPWG.

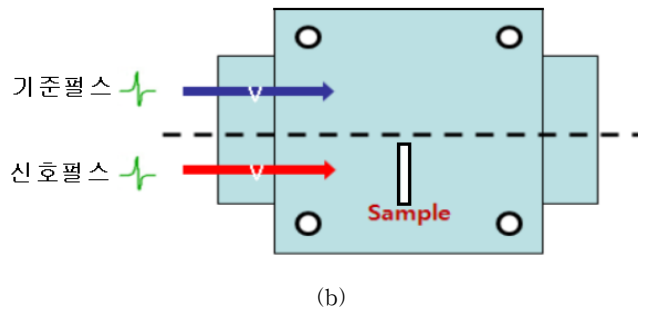
그림 2에 RDX 폭발 물질을 분광하기 위해 제작한 실리콘 렌즈와 평행판 도파관을 제시하였다. 평행판 도파관은 군속도 분산이 거의 없는 TEM 단일 모드에서 전파가 가능하며 평행판 도파관 사이에 THz 파를 직접 집속시킬 수 있어서 분광학에 활용도가 높고 다양한 응용이 가능하다.

THz-TDS 시스템을 이용하여 THz 대역에서의 폭발물질 RDX의 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해 그림 3과 같이 평행판 도파관을 이용해 폭발 물질인 RDX를 측정하는 시스템을 구축하였다. 그림 3의 (a)는 미량 (700 μg)의 RDX 폭발물질을 넣은 평행판 도파관을 THz 빔 경로상에 위치시킨 사진이며 그림 3의 (b)는 도파관 안의 아래쪽에는 폭발 물질을 넣고 위쪽에는 빈공간으로 남겨놓은 평행판 도파관의 구조를 제시한 것이다. 따라서 기준펄스의 측정은 도파관 위쪽의 빈 공간에 테라헤르츠 파를 입사시켜서 실시하였으며 신호펄스의 측정은 폭발 물질이 탑재된 도파관의 아래쪽에 테라헤르츠파를 입사시켜 실시하였다.

이 실험 장치를 이용하여 평행판 도파관을 통해 전송되어진 시간영역의 테라헤르츠 파 펄스와 푸리에 변환에 의하여 해당하는 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다. 폭발물질의 고유 흡수 스펙트럼은 식 (1)에 의해 계산되어진다.



(a)



(b)

그림 3 (a) THz 빔 경로상의 평행판 도파관 (b) 평행판 분광 모식도.

Fig. 3 (a) PPWG in the THz beam path (c) PPWG THz spectroscopy.

$$a(w) = \frac{[\ln(\frac{I_R(w)}{I_S(w)})]}{m} \quad (1)$$

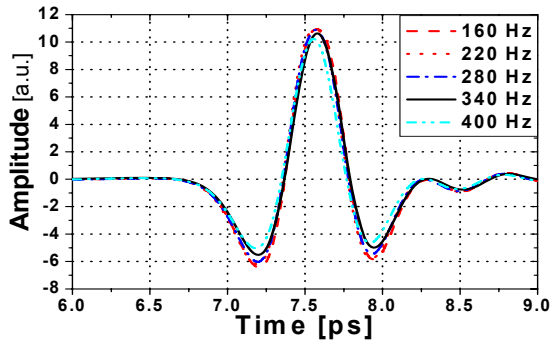
여기서 I_R 은 테라헤르츠 파의 기준펄스 크기, I_S 은 Sample를 통해 전송된 테라헤르츠 파의 신호펄스 크기, m 은 폭발물질의 질량이다 [1]. 폭발물질은 평행판 도파관 겹 112 μm에 분말가루로 위치되어 있다 [10].

4. 실험 결과

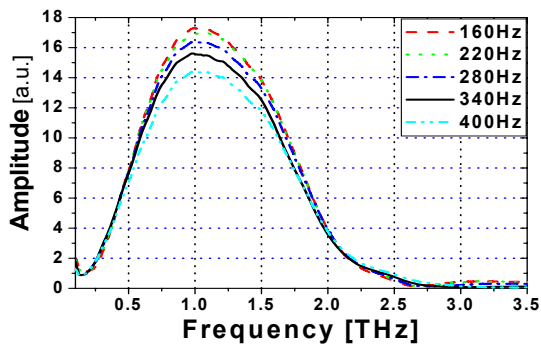
실험을 실시하기에 앞서 광 초퍼와 수분에 의한 영향을 조사하였다. 광 초퍼의 경우, 실험 시스템의 진동을 야기할 수 있으며 수분의 경우 결과 분석에 잡음으로 작용할 수 있다.

4.1 광 초퍼에 따른 변화

광 초퍼 (Optical Chopper)는 기준 주파수를 제외한 다른 모든 잡음을 제거할 수 있어 아주 미세한 신호도 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 광 초퍼는 주파수가 높을수록



(a)



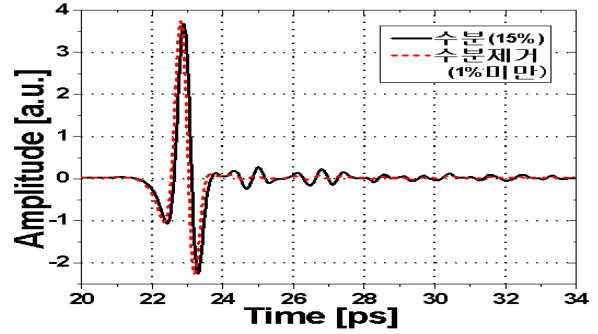
(b)

그림 4 (a) Chopper 속도에 따른 시간 영역 응답.
 (b) Chopper 속도에 따른 주파수 영역 응답.
 Fig. 4 (a) Chopper velocity in the time-domain region.
 (b) Chopper velocity in the frequency-domain region.

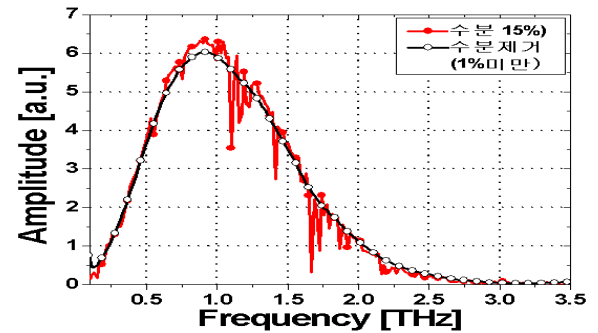
신호대 잡음비가 좋아 잡음을 줄이는 데 기여할 수 있다. 그림 4는 구동 주파수 160 Hz, 220 Hz, 280 Hz, 340 Hz, 400 Hz에서 측정된 시간영역과 주파수영역 응답은 제시한 것이다. 시간영역 (그림 4(a))에서 각 주파수에 따른 크기는 7.2 ps에서 최소 - 6.3 ~ - 5 사이였으며 7.6 ps에서 최대 10 ~ 11의 편차를 보여주었다. 또한 주파수 영역 (그림 4(b))에서는 1 THz의 주파수에서 14.3 ~ 17.1의 편차를 보여주었다. 따라서 본 실험실 환경에서 광 초퍼의 주파수에 의한 편차는 심각하지 않은 것으로 확인되었다. 또한 400 Hz 경우 작은 진동과 소리가 발생하였는데 이는 완충판의 설치로 인해 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단되고 속도가 낮을수록 스펙트럼의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 수분에 의한 흡수

그림 5(a)는 기준펄스를 시간영역에서 분석한 실험결과로 약 20 ps 이후에 수분을 제거하지 않는 경우와 수분을 제거한 경우의 결과를 제시한 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 시간영역에서 수분에 의한 편차는 미세하게 관찰되어 큰 문제가 없는 것으로 보여지나 이 결과를 주파수 영역에서 관찰할 경우 확연한 차이를 보여주었다. 그림 5(b)의 결과로부터 수분에 의한 흡수 피크가 주파수 영역 스펙트럼에서 뚜렷한 특성을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다. 그림



(a)



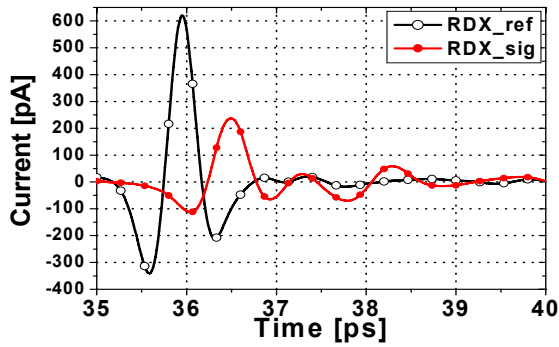
(b)

그림 5 (a) 수분에 의한 시간 영역 응답.
 (b) 수분에 의한 주파수 영역 응답.
 Fig. 5 (a) Responses with and without moisture in time-domain region (b) Responses with and without moisture in frequency-domain region.

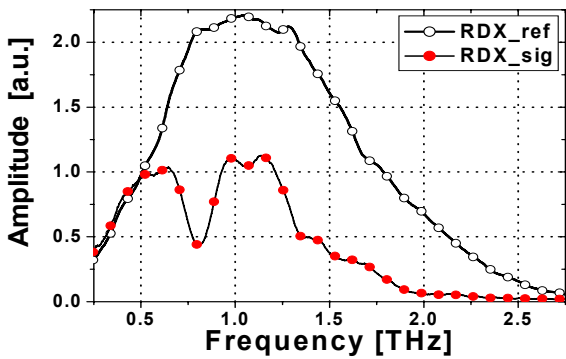
5(b)에 제시한 주파수 영역 스펙트럼을 보게 되면 1.1 THz, 1.14 THz, 1.41 THz, 1.66 THz, 1.72 THz의 주파수에서 수분에 의한 흡수가 관찰되었다. 또한 수분을 1 %미만으로 제거하면 수분(15%)에 의한 스펙트럼보다 선명한 스펙트럼 결과를 얻을 수 있었으며 이로부터 실험 장치 내의 수분 제거가 중요한 실험 요소임을 확인할 수 있었다.

4.3 RDX 흡수 스펙트럼

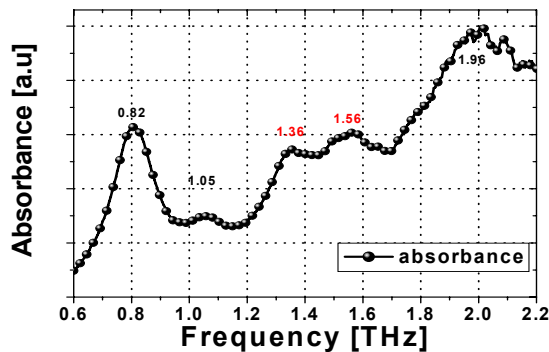
그림 6(a)에 평행판 도파관을 이용, THz-TDS에 의해 측정된 RDX의 기준펄스와 신호펄스를 제시하였다. 기준펄스는 35 psec ~ 36.9 psec에서 관찰되었으며, 신호펄스는 34 psec ~ 40 psec에서 관찰되었다. 신호펄스는 기준펄스에 비해 RDX 흡수로 인해 약 1/3의 크기 변화가 관찰됨을 알 수 있었다. 그림 6(b)에서 제시된 평행판 도파관에 의한 주파수 범위는 기준펄스의 경우 0 ~ 2.75 THz, 신호펄스의 경우 0 ~ 2.5 THz였다. 또한 RDX에 의한 에너지 흡수가 특정한 주파수 대역에서 보이는 것을 주파수 스펙트럼으로 확인할 수 있었다. 그림 6(c)는 RDX 고유 흡수 스펙트럼을 나타내었으며 약 0.82 THz, 1.05 THz, 1.36 THz 1.56 THz, 1.96 THz에서 0.82, 1.05, 1.36, 1.56, 1.96의 주파수에서 흡수 스펙트럼을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 PPWG에 의한 분석이 참고문헌 [10]에 제시된 Teflon sample cell을 이용한



(a)



(b)



(c)

그림 6 (a) 평행판 도파관에 의한 RDX 시간영역 응답. 기준 펄스(흑선), 신호 펄스(적선).
 (b) 평행판 도파관에 의한 RDX 주파수영역 응답.
 (c) 평행판 도파관에서의 RDX 흡수 스펙트럼.

Fig. 6 (a) Time-domain response to RDX in PPWG ; a reference pulse and a signal pulse.
 (b) Frequency-domain response to RDX in PPWG.
 (c) Absorption spectrum of RDX in PPWG.

THz-TDS 분석에 비해 현격하게 적은 RDX 시료를 사용했음에도 불구하고 정확하고 분명한 흡수 스펙트럼 값을 얻을 수 있음을 의미한다. 여기서 주목할 수 있는 중요한 점은 Teflon sample cell에 의한 측정에서 관찰되지 않았던 1.5 THz대역에서 1.36 THz, 1.56 THz로 구분되어 흡수 스펙트럼을 확인할 수 있었다는 점이다 [10].

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 분야에서 물질 분석에 관한 연구가 진행되고 있는 THz-TDS 시스템을 이용하여 폭발물질 RDX의 시간지연과 에너지 흡수를 비롯한 흡수 스펙트럼을 분석하였다. THz-TDS 시스템에 평행판 도파관을 제작하여 RDX를 분광, 물질의 고유 흡수 스펙트럼을 확인하였다. 평행판 도파관을 이용한 경우 물질의 특성을 나타내는 흡수 스펙트럼에서의 침투깊이 기존의 방법에 비해 매우 선명하게 관찰할 수 있음도 확인하였다.

따라서 본 논문에 제시된 평행판 도파관을 이용한 THz-TDS 시스템을 이용할 경우, 실험된 폭발 물질 이외의 다양한 폭발물 검출이 용이할 것으로 생각되며 이를 통한 지뢰 감지, 폭발물 장치 발견, 폭발물 검색기술이 한층 발전할 것으로 기대된다. 또한 공항과 주요 시설물에서의 보안 검색에서 폭발물에 대한 테라헤르츠 파 영역의 진동지문을 제곱함으로써 인체에 유해한 X-ray 검사 방법을 대체할 수 있는 새로운 검색 시스템으로의 발전가능성이 매우 높다고 보여 진다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 링크사업단 학술연구비 지원을 일부 받았습니다

참 고 문 헌

- [1] X-C.Zhang and Jingzhou Xu, "Introduction to THz Wave Photonics", Springer, July 2009.
- [2] B.B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves", *Optics Letters.*, vol. 20, pp. 1716-1718, 1995.
- [3] M C Kemp et. al., "Security applications of terahertz technology", *Pro. of SPIE*, vol. 5070, pp. 44-52, 2003.
- [4] J. Chen et. al., "Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1 - 2.8 THz", *Opt. Exp.*, vol. 5, pp. 12060-12067, 2007.
- [5] N. Laman et. al., "High resolution waveguide THz spectroscopy of biological molecules", *Biophysics J.*, vol. 94, pp. 1010-1020, 2008.
- [6] Joseph Melinger et. al., "Guided wave terahertz characterization of fingerprint lines in threat materials", *Proc. of SPIE*, vol. 7671, pp. 767-772, 2010.
- [7] G. Gallot. S. P. Jamison, R. W. McGowan, and D. Grischkowsky, "Terahertz waveguides", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 17, pp. 851-863, 2000.
- [8] A. Bingham, Y. Zhao, and D. Grischkowsky, "THz parallel plate photonic waveguide", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, pp. 5110-5117, 2005.
- [9] Seung Beom Kang et. al., "Optical and Dielectric Properties of Chalcogenide Glasses at Terahertz Frequencies", *ETRI Journal*, vol. 31, pp. 667-674, 2009.

[10] Byung Hwa Yoo et. al., "Guided wave spectroscopy of explosive materials", *J. of Korean Institute of Electromagnetic Eng. and Sci.* vol. 11, no. 1 pp. 42-50, 2011.

저 자 소 개



강 광 용 (姜 光 鏞)

1975년 2월 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업. 1988년 부산대학교 물리학과 졸업(이학박사), 1989년 1월 ~ 현재, 전자통신연구원 테라헤르츠 연구팀 팀장.
관심분야 : 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 강상관전자계 소자 설계, 테라헤르츠 분광 및 이미징 시스템.



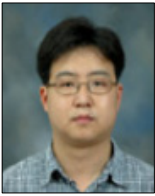
유 병 화 (愈 炳 和)

1983년 5월 17일생. 2009년 우석대학교 정보통신공학과 졸업. 2012 ~ 현재, 동대학원 전기전자공학과 석사
관심분야 : 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송, 테라헤르츠 분광 및 이미징 시스템.



정 동 철 (鄭 東 哲)

1967년 8월 20일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2012년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수.
관심분야 : 초전도 한류기, 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송, 테라헤르츠 도파관



강 승 범 (姜 昇 範)

1995년 충북대학교 물리학과 졸업. 1998년 동대학원 물리학 석사. 2008년 동대학원 의용생체공학 박사. 2008년 ~ 2012, 전자통신연구원 테라헤르츠연구팀 선임연구원. SE중공업 중앙연구소 소장
관심분야 : fiber laser 제작/응용, THz 분광 이미징 시스템 및 Bio 응용.



곽 민 환 (郭 玟 煥)

1970년 1월 25일생. 1995년 경상대학교 전자재료공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년 ~ 2012, 전자통신연구원 테라헤르츠연구팀 선임 연구원. 2012 ~ 현재, 창원문성대 학 전기과 조교수, 관심분야 : 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 초전도 전자소자 설계, 테라헤르츠 분광 및 이미징 시스템.