

1. 머리말

광적인 성질과 전파의 성질을 동시에 갖는 테라헤르츠 파 (terahertz wave, 0.1-10 THz)는, 우주배경복사나 단 백질 접힘과 같은 기초과학 연구에서부터, 보안 검색 및 의료 응용과 같은 실용 기술에 이르기까지 다양한 분야에서 활용이 가능한 주파수 자원이다. 그러나 마이크로웨이브 대역의 각종 발전이나 광학 영역의 레이저 등과 비견될 만한 고출력 소자를 구현하기 위한 기술이 미흡하여 테라헤르츠 공백(gap)이라고 불리어 왔다. 이러한 공백을 메워 나가기 위하여 지난 수 십 년간 다양한 배경의 연구자들 사이의 협력을 통한 다학제적(interdisciplinary) 연구가 진행되어왔으며, 전세계적으로 관심과 투자가 집중되고 있다.

2. 국제 연구동향

미국과 일본을 비롯한 세계 여러 나라에서는 테라헤르츠 과학기술이 향후 세상을 변화시켜 나갈 주요 기술의 하나라는 인식하에 국가적인 관심을 기울이고 있다. 현재 진행되고 있는 고출력 연속파 테라헤르츠 관련 프로젝트를 연구 목적과 투자규모 등에 초점을 맞추어 간략히 개관해보면 다음과 같다.

2.1. 미국

미국은 의료응용과 국방응용을 위해 각각 NIH (National Institute of Health)와 DoD (Department of defense)를 중심으로 고출력 T-ray에 대한 연구개발 프로젝트를 지원하고 있다. NIH 산하의 National Institute of

특집 ■ 테라헤르츠파 발생기술

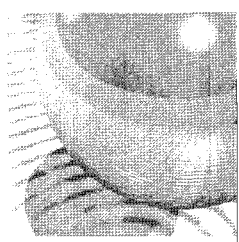
고출력 연속파 테라헤르츠 기술

한성태*, 전석기*, 김정일*, 김근주*

본 원고에서는 다양한 테라헤르츠 연구 중에서 고출력, 고효율 특성에도 불구하고 그동안 상대적으로 소홀하게 다루어져 왔던 진공 전자공학(vacuum electronics) 기반의 결맞는(coherent) 고출력 연속파 T-ray 기술을 중점적으로 소개하고자 한다. 아울러 고출력 연속파 테라헤르츠 응용기술로서 한국전기연구원에서 적극적으로 추진 중인 실시간 테라헤르츠 능동 영상기술 및 동적과분극(dynamic nuclear polarization; DNP) 기술 등에 대한 소개를 통하여, 국내 테라헤르츠 연구의 다양성을 환기시키고 이중기술 전문가간의 융합형 연구협력을 확대시키는 계기로 삼고자 한다.

Biomedical Imaging and Bioengineering (NIBIB)에서는 대표적인 고출력 연속파 테라헤르츠 소자인 gyrotron 연구개발을 지원하여 기존 NMR장비의 미약한 신호를 획기적으로 증폭하고 이를 통해 거대 생체분자의 동적구조 정보를 얻는 시간을 획기적으로 단축하기 위한 이중기술 융합형 프로젝트를 지속적으로 지원해오고 있다. 한편 DoD에서는 비살상 무기체계의 일환으로 0.1 THz 근방의 고출력 T-ray를 활용하는 Active Denial System (ADS) 기술개발을 촉진하기 위하여 동부와 서부 2개의 경쟁 컨소시엄 대한 지원을 동시에 진행하고 있다. 아울러, DoD 산하의 Defense Advanced Research Projects Agency

* 한국전기연구원



(DARPA)를 통해서도 테라헤르츠 보안검색 시스템을 개발하기 위한 진공전자소자 기반의 고효율 테라헤르츠 증폭기 연구를 지원하고 있다.

2.2. 일본

정부가 적극적으로 나서서 국가 차원의 연구개발 주체로 테라헤르츠 연구를 지원하는 대표적인 국가로서 일본을 꼽을 수 있다. 정부 산하의 이화학연구소(RIKEN)와 일본산업기술총합연구소(AIST) 등을 통해 이루어지는 집중적인 연구개발이외에도 MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology)가 직접 지원하는 연구센터 사업을 통해 고효율 연속파 테라헤르츠 소자 개발 및 응용 연구를 추진하고 있다. 일례로 Fukui대학에 소재한 FIR (Far Infrared Research) center는 MEXT의 지원으로 10여 기 이상의 고효율 테라헤르츠 gyrotron을 개발하여 ESR (electron spin resonance) 분광, NMR 신호향상을 위한 DNP, 세라믹 sintering, 핵융합 플라즈마 진단, 의료응용 등에 적용하기 위한 대규모 연구를 진행하고 있으며, 유럽연합의 NMR 신호향상 연구 지원 및 테라헤르츠 국제 저널 (International Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves) 편집국 유치 등의 직간접적인 활동을 통하여 국제적인 연구 리더로서 자리매김 되고 있다.

2.3. 유럽연합

미국, 일본 등이 개별 국가 중심의 테라헤르츠 프로젝트를 진행하고 있는 것과는 달리, 유럽연합은 일찍 부터 영내의 여러 국가간 협력을 통한 공동연구를 활발히 진행해 오고 있다. 현재는 OPTHER (optically driven terahertz amplifiers)라고 불리는 고효율 연속파 테라헤르츠 소자개발 프로젝트를 진행하고 있으며, 이태리 (2개 기관), 덴마

크(1개 기관), 프랑스(2개 기관)를 중심으로 총 4백만 유로 규모의 연구를 진행하고 있다. 연구개발의 주목적은 초정밀 가공기술과 나노기술을 접목하여 증폭기 형태의 신개념 진공소자를 개발하는 것으로서, 출력이 약한 QCL (Quantum Cascade laser) 이나 photo mixing system 등에서 발생된 약한 T-ray를 강하게 증폭함으로써 테라헤르츠 대역에서 100 mW 이상의 출력을 얻는 것을 목표로 한다.

그림 1은 OPTHER 프로젝트에서 제안된 THz 증폭기의 개념도이다. 2-5 V/μm의 낮은 전기장에서 전계방출이 가능한 탄소나노튜브의 특성을 활용함으로써, THz 주파수로 변조된 전자빔을 방출하는 냉음극 전자총을 개발하고 있다. 전자빔의 에너지를 전자기와 에너지로 변화시키는 회로는 DRIE, SU-8 등의 초정밀 MEMS 가공 기술을 적용한다.

2.4. 호주 CSIRO

호주는 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)를 중심으로 연속파 테라헤르츠 기반의 응용연구를 활발하게 진행하고 있다. 최근에는 다중 giga-bit 무선 통신 및 안테나 시스템과 보안검색 및 의료응용을 위한 고속 영상 시스템을 중심으로 연구개발을 진행하고 있다.

2001년부터 시작한 190 GHz 영상시스템 개발 프로젝트를 통하여 실시간 영상획득을 위한 고속 프레임 처리기술이나 원거리 대상의 고속 스캔 기술 등을 중점적으로 개발하고 있다. 최근 Northrop Grumman Space Technology와의 전략적 협력을 체결할 정도로 연속파 테라헤르츠 응용 연구에 박차를 가하고 있으며 상업적 시제품까지 개발하고 있다.

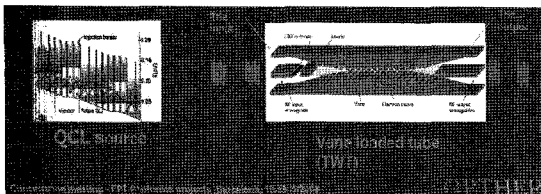


그림 1. 탄소나노튜브 전자총을 이용한 THz 증폭기 개념도, 출처: OPTHER

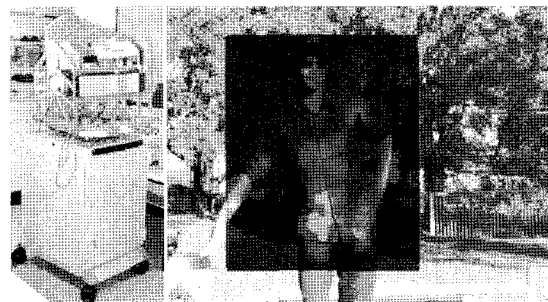


그림 2. 0.2 THz 영상 시스템 및 concealed knife imaging, 출처: CSIRO

2.5. 유라시아

구 소련 시절부터 우크라이나 IRE (Institute of Radio Physics and Electronics)와 IRA (Institute of Radio Astronomy)를 중심으로 국방 분야의 응용을 위해 진공전자소자 기반의 테라헤르츠 소자 및 응용시스템에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 기술을 바탕으로 최근에는 고출력 테라헤르츠 발생 소자와 의료 및 보안 분야에서의 응용시스템에 관한 연구를 진행하고 있다. 회로에 비스듬히 진행하는 전자빔과 BWO (Backward wave oscillator)의 발진원리를 이용하여 고출력 테라헤르츠를 발생시키는 클리노트론 (Clinotron) 기술을 세계 최초로 개발하였으며, MEMS로 제작된 grating 회로와 고전류밀도를 갖는 열음극 기술을 적용하여 1 THz 동작주파수에서 CW 동작 시 2 W, pulsed 동작 시 70 W의 출력을 내는 Clinotron 개발을 진행하고 있다 [1]. 또한, 고정밀 장거리 테라헤르츠 레이더 응용을 위하여 0.1 THz 동작주파수에서 펄스 동작 시 15 kW의 출력을 내는 spatial-harmonic magnetron 개발을 위한 연구 등을 위한 정부 지원과 한국과의 협력을 통하여 진행하고 있다.

3. 응용연구 영역

고출력 연속파 T-ray 기술을 활용하기 위한 이종기술간 융합형 응용연구가 다양하게 시도되고 있다. 현재까지 괄목할만한 성과나 큰 잠재성을 보이고 있는 사례를 중심으로 응용연구 영역을 고찰해 보면 다음과 같다.

3.1. 초고감도 자기공명 기술

자기공명 기술은 거대분자의 동적구조와 기능을 이해하기 위한 첨단 연구장비로서 뿐만 아니라 생체의 해부학적 구조 및 기능영상을 구현하기 위한 의료영상 장비로서 혁신적인 발전을 거듭하고 있다. 그러나 기존의 핵자기 공명 기법은 근본적으로 신호의 세기가 매우 약하여 신호대 잡음비가 낮다는 문제가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 높은 자기장을 이용하거나 장시간 여러 번의 스캔을 통해 신호대 잡음비를 개선해야 하기 때문에 실제적 활용성에 제약이 따른다.

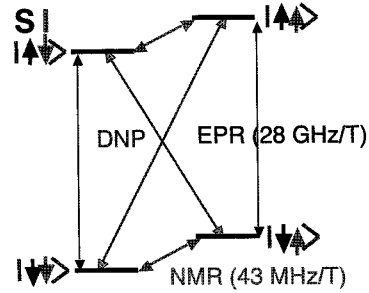


그림 3. DNP/NMR 개념도

동적과분극을 활용한 핵자기공명(NMR) 기술은, 전자스핀 공명 (electron spin resonance, 28 GHz/T)에 해당하는 고출력 연속파 테라헤르츠 신호원을 이용하여 여기(excited)된 전자의 분극을 원자핵의 분극상태로 전이시킴으로써, 해당 핵종의 신호대 잡음비를 획기적으로 증폭시키는 기법이다. 따라서 기존의 핵자기공명 영상/분광에서 기술적 한계로 간주되었던 계측의 정밀도와 속도를 혁신적으로 향상시킬 수 있음이 밝혀졌다[2]. 또한, ¹³C, ¹⁵N, ³¹P 등의 핵종을 포함한 생체 대사물질을 고출력 연속파 테라헤르츠를 이용하여 과분극 시킨 뒤, 이를 MRI 영상화제(agent)로 활용하면, 기존의 MRI 장치가 지닌 한계(미약한 신호)를 극복하고 다양한 핵종에 대한 기능성 분광영상을 구현할 수 있음이 보고되었다 [3]. 이는 고출력 연속파 테라헤르츠를 이용하여 생체대사 영상과 같은 기능성 MRI를 구현할 수 있음을 의미하는 것으로서, 각종 질병 및 생체대사과정에 대한 인간의 이해를 획기적으로 확장하고, 향후 의료산업 발전에 결정적인 역할을 하게 될 것으로 기대되고 있다.

3.2. 투시영상시스템

우주선 단열재의 내부결함을 비파괴적으로 검사하는 시연을 통하여 테라헤르츠 전자파가 건조한 유전체에 적용 가능한 비파괴 투시 영상기술로서 주목받게 되었다. 그러나 대부분의 테라헤르츠 발생장치는 출력이 약하기 때문에, 에너지를 한 곳에 집중하여 출력 밀도를 높인 뒤 피사체에 주사(scan)해야 하므로 2차원 능동 (active) 영상을 구현하기 위한 소요 시간이 길다는 문제가 있다.

따라서 테라헤르츠 능동 영상을 실시간으로 구현하기 위해서는, 준 광학적 테라헤르츠 빔을 넓은 면적의 2차원

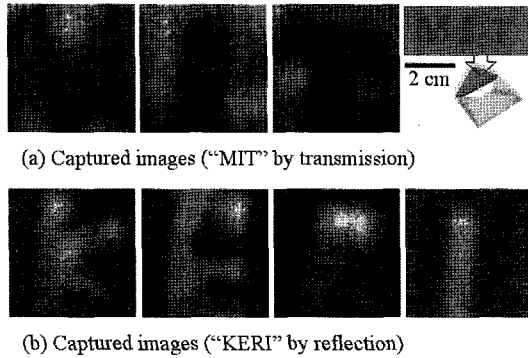
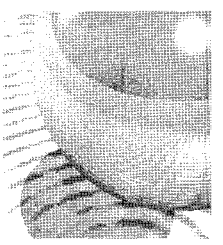


그림 4. 0.46 THz 실시간 능동 영상 시스템에서 획득한 정지영상 (2-3 mm 가량의 두께를 갖는 금속 격자를 우편봉투 속에 숨겨두고 반사, 투과 영상을 찍은 모습)

어레이 검출기에 한 번에 조사하되, 각 pixel에서 검지 가능할 만큼의 충분한 출력밀도를 유지할 수 있어야 한다. 고출력 연속파 테라헤르츠 발생장치는 이러한 응용에 최적화된 소자로서 검출기의 반응시간 이상의 duration과 video-rate 이상의 반복 주기를 갖도록 신호를 chopping 하거나 on/off를 할 수 있는 보조적인 조치만 적용하면 된다.

그림 4는 0.46 THz gyrotron을 고출력 T-ray 발생장치로 활용하고 열화상소자인 pyroelectric array camera를 2차원 검출기로 활용하여, 우편봉투 속에 은닉된 금속 글자에 대한 실시간 투시 영상을 구현한 것으로서, 보안 검색 및 냉동/건조 식품내의 이물질 검사 등에 활용하기 위한 연구가 진행 중이다.

3.3 핵융합 발전

인류의 영원한 숙제인 에너지 문제를 해결하기 위해서도 고출력 테라헤르츠 기술이 활용된다. 핵융합 에너지를 얻기 위해서는 높은 온도와 밀도 상태의 플라즈마를 생성해야 하는데, 플라즈마의 전자온도를 1억도 이상 가열하기 위하여 토카막의 내부 자장에 의해 형성되는 전자 회전 공명 (electron cyclotron resonance) 주파수 혹은 그 조화파에 해당하는 고출력 테라헤르츠 전자파의 발생 및 전송 관련 기술이 반드시 확보되어야 한다. ITER (국제핵융합실험로)에서는 24 MW급 170 GHz ECH/CD (electron cyclotron heating / current drive) 시스템이 사용될 예정이다.

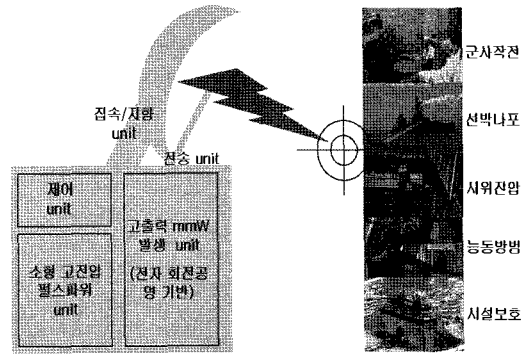


그림 5. ADS 개념도 및 활용범위

ECRH 가열장치는 국부적으로 플라즈마 전류를 유도하여 플라즈마의 불안정성을 제어하는 목적으로도 사용된다. 그밖에 핵융합 플라즈마의 전자온도 분포를 측정하기 위한 CTS (collective Thomson scattering) 등의 진단기술을 구현하기 위해서도 고출력 연속파 테라헤르츠 기술이 필수적이다.

3.4 ADS (Active Denial System)

0.1 THz 근방의 초고출력 T-ray는 인체에 대한 침투깊이가 대략 0.4 mm 정도로서, 신경 말단이 위치한 부위(피부 통점)에 고출력의 에너지가 아주 짧은 시간동안만 집중되도록 할 수 있다. 피노출자의 신경 말단에 화상의 고통에 해당하는 가상의 통증을 유발하여, 외상으로 인한 후유증이나 장애와 같은 실질적인 피해 없이 피노출자로부터 저항할 수 없는 본능적/자발적/즉각적 회피반응(active denial)을 유도할 수 있으므로, 인도주의적인 비살상 무기 기술로서 고출력 테라헤르츠 전자파 기술에 대한 연구개발이 진행되고 있다.

3.5 테라헤르츠 통신

최근에 다양한 정보통신기술의 응용분야에서 데이터 전송속도의 증가와 새로운 전파자원의 확대 및 응용이 요구되고 있고, 이를 위해 THz파를 이용한 차세대 정보통신기술의 개발이 진행되고 있다. THz파를 이용한 10 Gbps 이상의 무선통신 기술의 개발은 그림 1에서 보이는 것과 같

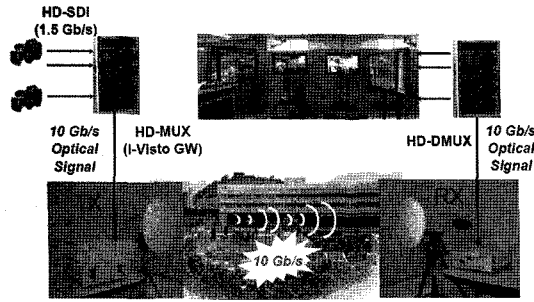


그림 6. 일본 NTT의 THz파를 이용한 HDTV용 신호 전송

은 고선명 HDTV용 신호 전송과 스토리지 에어리어 네트워크 (SAN), WLAN (Wireless Local Area Network) 등의 응용을 가능하게 한다.

이를 위해 광학적 기술로 0.12 THz 신호를 발생하여 10 Gbps 이상의 데이터 전송기술을 개발하였고, 0.3 THz GUNN 발진기와 mixer, antenna, waveguide 등의 소자를 이용하여 video 신호를 전송하는 연구가 진행되었다 [4-5]. 이외에, THz파의 투과성과 직진성을 이용하여 국방, 보안 분야의 대인 및 대물용 검색시스템에 적용 가능한 테라헤르츠 레이더 (radar)에 대한 연구도 진행되고 있다.

3.6. 기타: 의료 및 재료 산업 응용

3.6.1 Hyperthermia

정상세포와 암세포는 수분 함유율과 혈관의 기능적 측면에서 차이가 나기 때문에 발암 부위에 썩씨 42~45도 정도의 열을 가해 정상세포에 대한 피해를 최소화 하면서 암세포를 선택적으로 파괴(암세포는 41.8℃에서 괴사)할 수 있다. 특히, 항암제나 방사선 치료와 온열치료를 병행하게 되면 reoxygenation을 통해 기존의 암 치료술의 효과를 급상승시킬 수 있다. 원적외선에 해당하는 T-ray는 준 광학적 방법으로 집속 및 전송이 가능하기 때문에 국소적인 상피암의 온열치료 수단으로 고려되고 있으며, 고출력 T-ray의 의료 응용을 위한 연구방향의 하나로서 관심을 끌고 있다.

3.6.2 Ceramic Sintering

세라믹의 전자기적, 광학적, 기계적 성질 등은 미세조질

및 조성과 밀접한 연관을 가지고 있으며 분말의 소결 방식에 따라 미세구조의 배열과 화학성분의 분포가 달라진다. 따라서, 원자로 제어봉(B₄C), 기계부품, 환경소재, 생체, 연료전지 부품 등 여러 산업분야에서 요구하는 나노미터 크기의 알갱이 (grain)를 갖는 고밀도, 초미정질 (nanocrystalline), 고기능 (high-performance: 초고온, 초고압, 초고내식성 등) 세라믹 소재를 생산하기 위해서는 고도로 제어된 소결기술이 필수적이다.

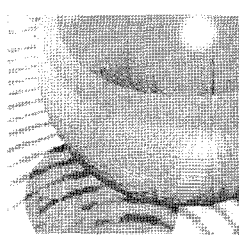
전통적인 소결방식(저항체 가열, 가스분사 소결로)을 이용하면 적외선의 침투깊이가 1 mm 이내로 제한되기 때문에 내부와 외부의 온도분포차이를 극복하기 위해 장시간의 열전도 과정이 필요하고, 이러한 온도분포 차이에 의해 세라믹 내부의 열적 스트레스가 가해지고 균열의 원인이 되기도 한다. 고출력 연속파 테라헤르츠는 균일한 체적에 대한 급속가열과 열제어가 가능하기 때문에 소결과정에서 발생하는 물리/화학적 변화를 최소화할 수 있는 원천기술로서 연구개발이 진행되고 있다.

3.6.3 유리산업

고출력 연속파 테라헤르츠는 자동차 유리, 건물 유리 등의 판유리 (flat glass) 제작 시 요구되는 구부림, 강화, 템퍼링, 코팅 공정 등에 적용되어 열처리 기술의 에너지 효율을 향상시키는데 사용 될 수 있다. 고출력 테라헤르츠 기반의 열처리 기술은, 기존에 사용되던 마이크로파, 적외선, hot air 열처리 기술에 비해 두께가 얇은 판유리 공정에 적합하고, 80-90%의 효율과, 1000 °C/sec 정도의 heating rate을 가지므로 공정 속도, 에너지 효율, 생산단가 측면에서 우수하다.

4. 한국전기연구원의 연구개발

한국전기연구원은 국내 출연연 중에서 최초로 테라헤르츠 전문연구랩 사업(2004-2008년 5년 간 30억 투자)을 수행하면서 이동형 TDS (time-domain system) 장치를 개발하였고, 이를 기반으로 다양한 분광, 영상 응용연구를 수행하고 있다. 현재는 연구원 고유의 전기 기반기술을 바탕으로 새로운 의료원천기술을 확보하기 위하여, X-ray, beta-ray (전자선) 등에 비견되는 새로운 안심 방사선으로서 진공 전자소자 기반의 고출력 연속파 T-ray를 개발하기 위한 연구를 중점적으로 추진하고 있다. 아울러, 3장



에서 상술한 바와 같은 고출력 연속파 테라헤르츠 소자의 다양한 응용분야 개척을 병행하고 있다.

4.1. 신개념 THz 진공 전자소자 연구

4.1.1 Photonic Crystal

광결정 (photonic crystal)은 특정 물질을 주기적인 구조로 배열함으로써 만들 수 있다. 광결정의 구조적 특성과 물질의 특성에 따라, 특정 주파수 대역의 빛(전자기파)이 광결정을 투과하지 못하는 현상이 나타나는데, 이와 같은 주파수 대역을 광밴드갭 (photonic band gap)이라고 부른다. 이와 같은 광결정의 내부에 주기성을 깨뜨리는 결합을 삽입하면 결합의 형태에 따라 공진기나 도파관과 같은 회로를 만들 수 있다는 사실이 잘 알려져 있다. 최초 광결정 실험이 10 GHz 정도의 마이크로웨이브 대역에서 진행되었던 것을 통해서 알 수 있듯이, 광밴드갭은 나노미터급의 파장 영역은 물론 센티미터 또는 그 이하의 파장 대역에서도 동일하게 나타난다.

광결정 회로의 고유한 특성을 이용하면 THz 주파수 대역에서 차별적인 소자를 구현하는 것이 가능할 것으로 기대된다. 그림 7은 알루미늄 나막대를 이용해 만든 이차원 광결정을 공진기의 한쪽 벽으로 이용해 TM₅₅₀ 모드 공진기를 만들고 광결정 내 선결합을 도파관으로 이용해 공진기를 외부회로와 결합한 회로의 개략도와 측정결과를 보여준다

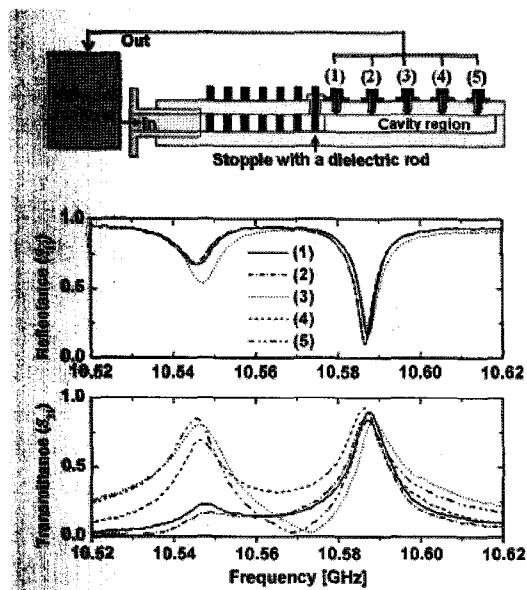


그림 7. TM550 모드 광결정 공진기

[6]. 공진기가 외부와 결합되어 있음에도 불구하고 TM₅₅₀ 모드의 패턴이 거의 달라지지 않은 것을 볼 수가 있는데, 이는 전통적인 공진기에서는 찾아보기 힘든 현상이다. 클라이트론과 같은 선형 전자빔을 이용한 진공소자의 공진기에 이와 같은 광결정 공진기를 이용하면 다중전자빔과 고차공진모드를 사용하기가 수월해 THz파의 출력을 획기적으로 높일 수가 있을 것으로 예상된다[7]. 그러나 THz 광결정은 가공이 용이하지 않거나 가공비가 고가라는 단점이 있다. 대략 수백 마이크로미터 정도의 크기를 가공해야 하기 때문에, THz 주파수 대역은 전통적인 기계 가공이나 MEMS 회로등에 적용되는 첨단 정밀가공 모두에서 기술적인 한계 상황에 놓이게 된다. 이 문제를 극복하기 위한 한국전기연구원의 연구에 대해서 4.3절에서 좀 더 자세히 다루었다.

4.1.2 Grating-Based Device

진공 내 미세 가공된 회로 속에서 운동하는 전자빔의 에너지를 전자파의 에너지로 변환시키는 진공 전자 소자는 고효율, 초소형, 고출력 등의 장점을 가지고 있어 많은 관심을 받고 있다. 이러한 여러 장점에도 불구하고, 테라헤르츠 대역의 진공 전자 소자를 구현하기 위해서는 고밀도 전자빔 발생과 집속 및 미세 가공에 사용되는 MEMS 공정에 적합한 회로 구조를 갖는 새로운 개념의 소자개발이 필요하다 [8]. 이를 위해 grating 구조를 갖는 회로를 적용한 광대역 SP(Smith-Purcell)-BWO와 협대역의 spatial harmonic magnetron 소자를 연구하고 있다.

그림 8은 0.7 THz 동작주파수를 갖는 SP-BWO 소자의 Particle-In-Cell (PIC) 시뮬레이션을 통해 계산한 전자빔 분포를 보이고 있다. 테라헤르츠를 발생시키기 위한 grating 회로로 실리콘 (silicon) 웨이퍼를 이용하여

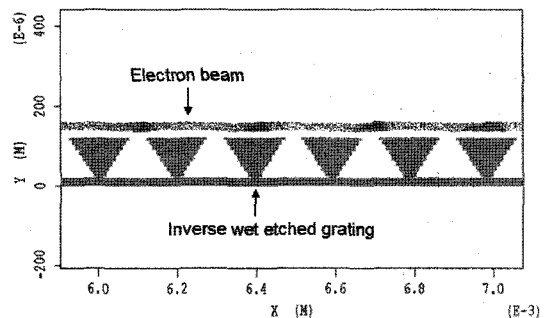


그림 8. 0.7 THz 동작주파수를 갖는 SP-BWO 소자의 PIC 시뮬레이션을 통한 전자빔 분포

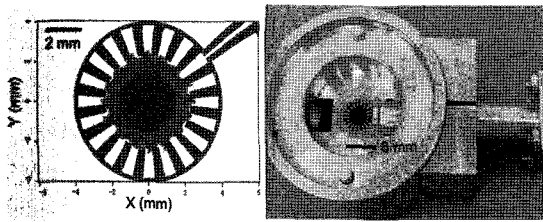


그림 9. SH-Magnetron 소자의 PIC 시뮬레이션을 통한 전자빔 분포와 미세 가공된 회로

MEMS 가공된 inverse wet etched grating을 이용함으로써, grating 회로의 표면 전기장 세기를 증폭시키고, 증폭된 전기장과 grating 위를 진행하는 전자빔의 상호작용을 통해 공간적으로 전자 밀도가 큰 전자빔 bunching을 만들어 테라헤르츠의 세기를 증가시킬 수 있는 구조이다 [9]. Spatial harmonic magnetron은 일반적으로 magnetron 동작에 사용하는 π -mode 대신에 spatial harmonic (SH) 모드를 사용하여 밀리미터파 대역 뿐만 아니라, 테라헤르츠 대역에서도 고효율, 고출력 동작이 가능하도록 한 소자이다 [10]. SH-모드를 사용하면 magnetron 동작 시 필요한 축 방향 외부 자기장 세기를 줄일 수 있고, 원형의 grating 구조로 형성된 공간회로의 크기를 증가시킬 수 있어 테라헤르츠 대역에서 미세 가공이 필요한 회로를 용이하게 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이외에, 테라헤르츠 대역에서 동작 시 필요한 고밀도 전자빔을 안정적으로 발생시키기 위해 이차전자 (secondary electron)를 이용한 냉음극 (cold cathode) 연구도 진행 중이다.

그림 9는 SH-magnetron 소자의 PIC 시뮬레이션을 통한 전자빔 분포와 방전 가공 (wire-EDM)을 이용하여 제작한 미세 가공된 회로를 보여주고 있다. 총 20개의 side 공간기로 구성된 35 GHz 동작주파수를 갖는 회로에서 SH-모드인 $p=16$ 인 동작모드로 안정적으로 소자가 동작되고 있음을 전자빔 spokes 통해 확인 할 수 있다.

4.2. THz 진공 전자소자 적용을 위한 신개념 전자빔 방출 기술

4.2.1 Multipactor

전자가 어떤 물질에 충돌하면 전자가 가지고 있던 운동 에너지가 물질에 흡수되어 이차전자를 외부로 방출하게

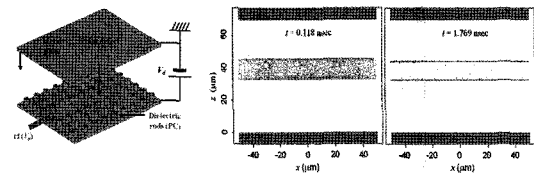
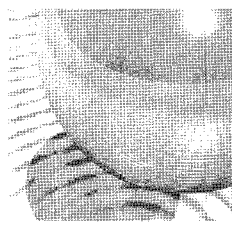


그림 10. 광결정 공진기를 이용한 이차전자 펄스 전자총 개념도. 이차전자에 의한 펄스 전자빔 형성과정 시뮬레이션

된다. 하나의 전자가 물질에 흡수되어 몇 개의 이차전자가 방출되는가는 물질의 특성, 충돌하는 전자의 에너지, 입사 각도 등에 따라 달라진다. 이와 같은 이차전자 방출 현상은 진공 속 특히, 시간에 따라 주기적으로 변하는 전기장, 또는 자기장이 있어서 이차전자의 운동에 주기적으로 영향을 주는 환경에서 주로 관심의 대상이 된다. 왜냐하면, 하나의 전자가 하나 이상의 전자를 방출하는 경우 이차전자가 주기적으로 변하는 전자기장 환경에서 다시 하나 이상의 또 다른 이차전자를 방출할 수 있기 때문이다. 결국, 충분한 시간이 흐른 후 공간상에 다수의 전자들로 구성된 전자구름이 형성되고, 전자구름의 밀도가 지나치게 높아지는 경우 순간적으로 고전류밀도의 전자빔이 회로를 파괴하거나 시스템의 정상작동을 저해하는 방전현상이 (multipactor) 일어나게 된다.

이와 같은 multipactor 현상은 고에너지 가속기 관련 시스템에서 많이 나타나는데, 주된 연구는 이 현상을 제거하는 방향으로 진행되어 왔다. 그러나 적절한 전류밀도로 이차전자빔을 제어하면 고주파수이면서 고전류밀도인 펄스 전자총을 얻을 수 있다는 가능성이 있어 최근에는 냉음극 펄스 전자총으로 활용하고자 하는 시도들이 있다.

그림 10은 테라헤르츠 진공 전자 소자 응용을 위한 광결정 공진기 기반의 이차전자 펄스 전자총 개념도와 컴퓨터 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션은 시간이 지남에 따라 이차전자에 의한 전자빔 뭉침 현상이 나타남을 보여준다. 이차원 유전체를 이용한 광결정 공진기의 특징을 활용하면 직류전압이 인가된 상황에서의 multipactor 현상을 유도하기가 더 용이하다. 더불어 입력되는 신호의 출력이 작아도 수십 GHz 이상에서 원활히 이차전자 증폭현상을 유도할 수 있는데, 이는 이론과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 증명되었고[11], 실험적 검증을 위한 연구가 진행 되고 있다.



4.2.2 Modulated Field Emission

신개념 전자방출원으로서 CNT(carbon nano tubes)와 같은 전계방출 냉음극을 적용한 고효율 테라헤르츠 진공 전자 소자에 대한 연구를 진행하고 있다. 전계방출 음극을 활용함으로써 기대되는 가장 큰 장점은 rf 주파수로 직접 변조된 전자방출을 얻을 수 있다는 것이다 [12]. 변조된 전계방출을 활용하면 단순히 기존 진공전자소자 입력단의 크기를 줄이는 것뿐만 아니라, 음극의 가열을 위한 추가적인 전력소모나 고온의 음극에 의한 구조의 변형 없이 MEMS가공된 신개념 회로와 결합하여 고효율 테라헤르츠 증폭 및 발진이 가능할 것으로 기대된다.

그러나 기존의 다이오드 구조나 전통적인 공진구조를 변형한 냉음극 전자총으로는 전자의 천이시간 효과(transit-time effect)를 극복하는데 한계가 있기 때문에, 변조가능한 주파수가 제한된다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 주기적인 유전체 막대 구조물 양단에 그리드를 가진 양극판과 전계방출 소자를 갖는 음극판이 위치한 2차원 광결정 다이오드 공진기 구조를 제안하고, 이러한 구조에서 발생하는 변조된 전계방출의 특성과 활용방안에 대한 연구를 진행하고 있다 [13]. CNT 나노기술과 같은 앞선 국내 연구역량과 전자빔 변조기술과 같은 신개념을 결합하여, 기술 융합형 신산업 응용영역에서 미래시장을 선점할 수 있는 핵심 기반기술로 발전시켜 나갈 계획이다.

4.3. 테라헤르츠 회로가공 기술

진공 내 발생된 전자빔의 에너지를 테라헤르츠 전자파의 에너지로 변환시키기 위해서는 수십 um에서 수백 um의 크기를 갖는 공진회로, grating, 입출력 수동소자 등을 제작하기 위한 가공 기술이 필요하다 [14]. 기존에는 CNC 가공과 wire-EDM (electric discharge machining) 가공을 통해 회로 제작을 하였지만, 테라헤르츠 대역의 소자를 제작하기 위해 필요한 가공의 정밀성, 비용, 표면 거칠기 (surface roughness) 등을 고려하였을 때, 반도체 가공 기술에 기반한 MEMS 가공이 필수적이다 [15].

주기적인 구조를 갖는 광결정 회로나 표면 전기장을 증폭시킬 수 있는 grating 구조를 제작하기 위해서, 상대적으로 가격이 저렴하며, 대량으로 제작할 수 있는 MEMS 습식 (wet) 공정을 적용한 회로 가공에 대한 연구를 진행하고 있다.

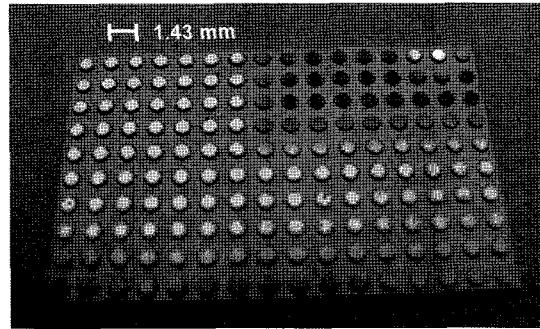


그림 11. MEMS 습식 (Wet) 공정으로 제작된 0.1 THz 대역의 광결정 회로

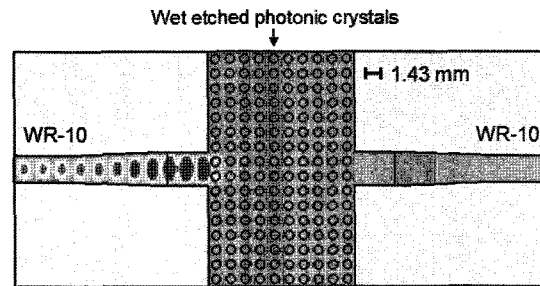


그림 12. MEMS 습식공정으로 제작된 0.1 THz 광결정 회로의 FDTD 시뮬레이션

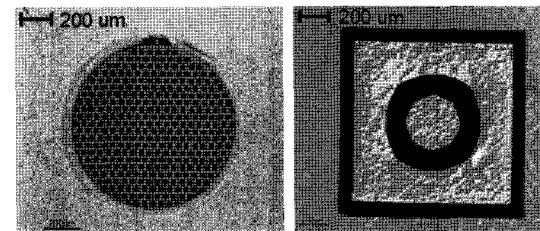


그림 13. MEMS 습식공정으로 제작된 금속 grid와 0.1 THz 공진회로

그림 11은 고저항 실리콘 (Silicon) 웨이퍼를 이용하여 MEMS 습식 (Wet) 공정으로 제작한 0.1 THz 대역의 광결정 회로이다. 실리콘 웨이퍼의 (100) 방향(54.7°)으로 가공이 되는 비등방적 습식공정을 이용하여 높이 150 um, 주기 1430 um, 윗면 반지름 350 um의 구조를 갖는 광결정 회로를 제작하였다.

제작된 광결정 회로는 그림.12에서 보이는 것과 같이 FDTD (finite difference time domain) 시뮬레이션을 이용하여 광 밴드갭 특성을 확인하였고, WR-10 도파관과의 coupler 구조를 제작하여 0.1 THz 대역에서 광 밴드갭 특성이 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것을 실험적으로 검증하였다. 실리콘 웨이퍼를 이용한 비등방적 습식공정을 통한 회로 가공을 grating 회로에 적용하게 되면 회로 표

고출력 연속파 테라헤르츠 기술

면의 전기장 세기를 더욱 증가시킬 수 있으므로, grating 기반의 소자인 SP-FEL(free electron laser), SP-BWO, clinotron 등에서 발생하는 테라헤르츠파의 세기를 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다 [16].

그림 13은 실리콘 웨이퍼를 이용하여 MEMS 습식공정으로 제작한 gold 코팅된 grid와 0.1 THz 대역의 공진회로이다. 금속 grid는 습식공정으로 제작된 공진회로에 bonding되어 공진회로의 특성 향상에 적용되고, 또한 CNT를 이용한 냉음극 전자총에도 적용 될 예정이다.

4.4. 초고출력 테라헤르츠 ECRM 연구

Gyrotron은 강한 자기장 하에서 도플러 편이(shift)된 전자빔의 회전운동이 공진 공동 내부의 주파수와공진하여 고출력의 전자파를 발생시키는 ECRM (electron cyclotron resonance maser)의 일종이다. 자기장의 세기가 주파수를 결정한다는 단점이 있으나, 초전도/고자장 자석 기술의 발달에 힘입어 1 THz까지 동작 주파수를 높여려는 시도를 하고 있다 [17].

한국전기연구원에서는, 공진기의 고차 모드를 활용하여 주파수 증가에 따라 소자의 크기가 축소되는 한계를 극복하고, 전자회전공명 주파수의 고차조화파를 활용하여 상대적으로 낮은 자장의 전도냉각식 초전도 자석기술을 적용하는 gyrotron 개발을 진행하고 있다. 식품내 이물질을 실시간으로 탐지하기 위한 영상 시스템을 구성하는 고출력 연속파 테라헤르츠 소자로서, 상대적으로 낮은 전압(30kV 이하)에서 동작하는 산업용 gyrotron 개발을 추진하고 있다. 동일한 기반기술을 바탕으로 실시간 영상시스템 이외에도 3장에서 소개한 다양한 응용에 적합한 gyrotron 개발을 추진할 예정이다.

4.5. 광대역 테라헤르츠파 기반 계측 기술

테라헤르츠 시간영역 분광법(THz-TDS)은 이미 잘 알려진 바와 같이 펄스형의 테라헤르츠파를 이용하여 기존의 마이크로파나 IR영역에서 측정이 불가능했던 시료에 대한 광학적 특성을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 높은 신호대 잡음비(SNR)로 결과의 정확도가 매우 높다. 최근 이러한 특성을 이용하여 테라헤르츠 회로의 특성을 분석하



그림 14. 펄스초 레이저를 이용한 펄스형 테라헤르츠 분광영상 장치

기 위한 하나의 도구로 사용되어지고 있다. 최근 테라헤르츠 영역에서 측정이 가능한 network analyzer가 개발되었으나 고가일 뿐만 아니라 아직 저주파 영역에 대한 측정만 가능하다. 반면 THz-TDS는 테라헤르츠 회로에 사용되는 재료의 분광학적 특성뿐만 아니라 회로가 가지는 구조적 특성까지 측정이 가능하다. 또한, CW 테라헤르츠 소스를 이용한 보안, 통신, 의학 등 다양한 응용 분야에서도 테라헤르츠 영역에서의 시료에 대한 특성 조사가 필수적으로 수반되어야 한다.

한국전기연구원에서는 테라헤르츠 소자의 특성 및 시료의 분광 특성을 측정하기 위해 펄스형의 레이저를 이용한 THz-TDS를 보유하고 있으며 시료 및 시스템의 특성을 고려한 투과형과 반사형의 두 시스템을 운영하고 있으며 보안 영상, 식품 이물질 검사 등 다양한 연구를 수행 중에 있다.

4.6 영상응용 연구

테라헤르츠를 이용한 다양한 응용 분야 중 보안 및 의료 분야에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. 이는 기존의 마이크로파를 이용한 영상보다 고해상도의 영상을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 X-ray가 가지는 인체에 대한 유해함을 극복할 수 있기 때문이다. 이러한 응용을 위한 핵심기술로서 고출력 테라헤르츠 소자뿐만 아니라 고해상도의 영상처리 기술도 필요하다.

한국전기연구원은 협동 연구사업(한국식품연구원 주관)을 통하여, 식품내의 이물질 탐사를 위한 실시간 영상시스템을 구현하기위한 연구를 진행하고 있으며, 이를 위한 알고리즘 개발 및 신호 처리에 대한 요소 기술을 개발 중에

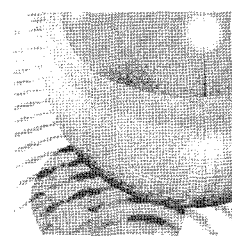


그림 15. 연속파 0.2 THz 소자(Gunn diode)를 이용한 수정테이프 이미지 (2차원 스캔)

있다.

5. 맺음말

다양한 분야에서 고출력 연속파 테라헤르츠 기술의 활용성에 대한 관심이 폭발적으로 증대하고 있으며, 전 세계적으로 이중기술의 효용성을 상승적으로 융합하여 광학적 접근과 전자공학적 접근의 양 극한 사이에 위치한 고출력 T-ray 기술을 확보하기 위하여 투자와 노력을 집중하고 있는 추세이다. 이러한 국제 연구동향을 소개하고 국내 테라헤르츠 연구의 다양성을 환기시키기 위하여 그동안 상대적으로 소홀하게 다루어져 왔던 진공 전자공학 (vacuum electronics) 기반의 결맞는(coherent) 고출력 연속파 T-ray 기술과 관련 응용분야를 간략히 살펴보았다.

한국전기연구원은 미래기반 극한기술로서 초고출력 연속파 테라헤르츠 원천기술을 선점하고, 이를 바탕으로 다양한 분야의 전문가들과 이중 요소기술간 융합형 연구협력을 확대시켜 나갈 계획이다. 특히, 고출력 연속파 테라헤르츠를 이용한 DNP 과분극 핵자기공명 기술과 실시간 능동영상 기술은, 바이오, 반도체, 소재산업 등의 기초과학 연구를 위한 혁신적인 수단을 제공하여 새로운 연구생태계를 형성하고 향후 신산업 영역의 견인차 역할을 하게 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) D. M. Vavriv, V. A. Volkov, and V. G. Chumak, "Clinotron Tubes: High-Power THz Sources," Proc. the 37th European Microwave Conference, 826 (Oct. 2007).
- (2) V.S. Bajaj et al., "250 GHz CW gyrotron oscillator for dynamic nuclear polarization in biological solid state NMR," *J. Magn. Reson.*, vol. 189, 251 (2007).
- (3) K. Golman et al., "Metabolic imaging by hyperpolarized ^{13}C magnetic resonance imaging for in vivo tumor diagnosis," *Cancer Res.* vol. 66, 10855, (2006).
- (4) A. Hirata et al., "120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission", *IEEE Trans. Microwave Theory and Technology*, vol. 54, 1937 (2006).
- (5) C. Jastrow et al., "300 GHz Transmission System", *Electronics Lett.*, vol. 44, (2008).
- (6) S.G. Jeon et al., "High order mode formation of externally coupled hybrid photonic-band-gap cavity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 02112 (2007).
- (7) K.H. Jang et al., "High order mode oscillation in a terahertz photonic-band-gap multibeam reflex klystron," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, 211104 (2008).
- (8) J.I. Kim et al., "Investigation of the 100 GHz Reentrant Linear Magnetron using Particle-in-Cell Simulation," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 27, 687, (2009).
- (9) J. I. Kim et al., "Enhancement of Terahertz Radiation in a Smith-Purcell Backward Wave Oscillator by an Inverse Wet Etched Grating", *Phys. Lett. A*, submitted.
- (10) V.D. Naumenko, K.Schunemann, and D.M. Vavriv, "Miniature 1 kW 95 GHz Magnetrons", *Electronics Lett.*, vol. 35, 1960, (1999).
- (11) S.G. Jeon et al., "Theoretical study of dc-biased single-surface multipactors," *Phys. Plasmas*, 16, 073101 (2009).
- (12) K.B.K. Teo et al., "Carbon nanotubes as cold cathodes," *Nature* 437, 968 (2005)
- (13) 한성태 외, "변조된 전계방출 및 전자기파 발진을 위한 광결정 다이오드 공진기," PCT / KR2009 / 006877.
- (14) R. J. Barker et al., "Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics", IEEE Press (2004).
- (15) Nathan Jukam and M. S. Sherwin, "Two-dimensional Terahertz Photonic Crystal Fabricated by Deep Reactive Ion Etching in Si", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, 21 (2003).
- (16) 김정일 외, "습식공정으로 제작된 광결정 소자 및 그 제조방법," PCT / KR2009 / 003703.
- (17) S.T. Han et al., "Continuous-wave submillimeter-wave gyrotrons," Proc. SPIE, vol. 6373, 63730C (2006).

약 력



한성태

한성태 박사는 서울대학교 사범대학 물리교육과에서 학사과정을 마치고, 서울대학교 자연과학대학 물리학부에서 석사학위(2001년)와 박사학위(2005년)를 취득하였다. 서울대학교 기초과학 연구원에서 박사후 연구원으로 MEMS 기반의 신개념 THz 진공소자에 대한 연구를 수행하였으며, Massachusetts Institute of Technology에서 DNP/NMR응용을 위한 초고출력 연속파 THz electron cyclotron resonance maser와 ITER 응용을 위한 준광학적 고출력 테라헤르츠 transmission line에 대한 연구를 수행하였다. 현재 한국전기연구원에서 선임연구원으로 재직 중이며, 주요 관심분야는 이중기술 융합 기반의 고출력 연속파 T-ray 발생 및 응용연구이다.

약 력



김정일

김정일 박사는 서울시립대학교 자연과학대학 물리학부에서 학사과정(2000년)을 마치고, 서울대학교 자연과학대학 물리학부에서 석사학위(2002년)와 박사학위(2006년)를 각각 취득하였다. 2006년부터 현재까지 한국전기연구원 선임연구원으로 재직 중이며, 냉음극을 적용한 고출력 밀리미터파 소자 개발, MEMS 흡식 공정을 이용한 광결정 회로, Grating 회로 개발 및 이를 적용한 고출력 THz 소자 개발과 THz파를 이용한 응용연구를 수행하고 있다. 주요 관심분야는 고출력 밀리미터파 및 THz 소자 기술과 THz 이미징, 통신, 레이더 기술이다.

약 력



전석기

전석기 박사는 서울대학교 물리교육과 학사 (1999년), 서울대학교 물리학과에서 진공 속 전자빔을 이용한 고출력 마이크로웨이브 및 테라헤르츠파 발생 관련 연구를 통해 석사(2001년), 박사학위(2005년)를 취득하였다. 2005년부터 현재까지 한국전기연구원 선임연구원으로 재직하면서 초소형 고출력 THz 진공소자를 개발하기 위해 MEMS 가공기술과 탄소나노튜브 및 이차전자를 이용한 신개념 냉음극 전자총을 연구하고 있다. 주요 관심분야는 DNP방식의 과분극 기술을 적용한 NMR/MRI 및 실시간 THz 이미징 기술이다.

약 력



김근주

김근주 선임연구원은 한국해양대학교에서 전기공학전공으로 학위를 취득하였다. 주요 분야는 테라헤르츠파를 이용한 분광 분석으로서, 테라헤르츠파를 이용하여 탄소나노튜브의 특성을 세계 최초로 규명하였다. 최근에는 테라헤르츠 고속측정을 위한 고속 광지연기를 개발하고 이를 적용한 이동형 테라헤르츠 시스템을 국내에서 처음으로 개발하였다. 현재 한국전기연구원 선임연구원으로 재직 중이며, 주요 연구 분야는 펄스형 테라헤르츠파를 이용한 분광 분석과 이미징, 연속파 THz를 이용한 이미징 및 응용 연구이다.