

펄스형 및 연속형 테라헤르츠파 소재/소자 기술

김근주 · 김정일 · 전석기

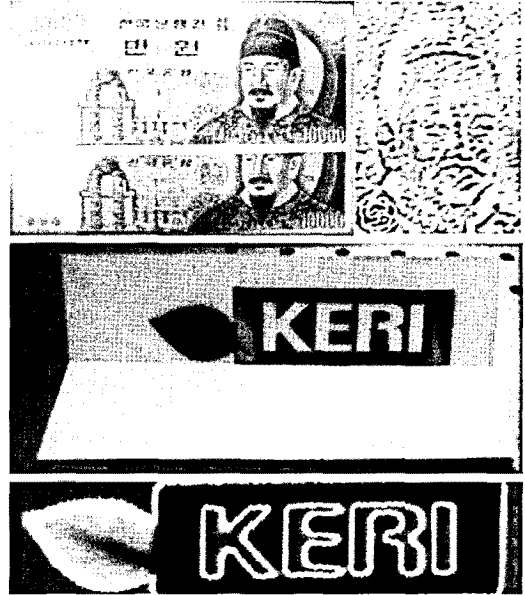
한국전기연구원

I. 서 론

테라헤르츠파(terahertz wave, THz wave)는 마이크로파와 광파의 중간 영역에 해당하는 전자기파로서, 보통 0.1~10 THz(파장: 3 mm~30 um)인 전자기파를 의미한다. THz는 전자기파적 특성상 일반적으로 사용되는 전자기기술과 광학기술로는 발생 및 계측이 어려워 전자기 스펙트럼 상 접근하기 어려운 영역인 "THz Gap"으로 불리어져 왔으며, 상업적으로도 거의 주목을 받지 못했었다^{[1][2]}. 지난 수십 년 동안 THz 기술은 천문학, 지구과학, 화학 분야에서 THz를 이용한 여러 경량 분자들의 회전 및 진동 공진과 열 방출 선의 스펙트럼 특성을 측정하고 목록으로 작성하는 고해상도 분광학과 원격 탐지에 국한되어 왔다^{[3]-[5]}.

최근 들어 새로운 소자의 출현과 재료 기술의 발전, 초미세 공정 기술(MEMS)의 발전과 더불어 소형 저가의 펨토초 레이저(femtosecond laser)의 상용화로 극초단, 고휘도의 THz 발생 및 계측이 가능하게 되었으며, 소형 고효율의 THz 소스까지 개발되고 있다. 이러한 THz 소재/소자의 기술적 발전은 의료, 바이오, 보안, 국방, 우주 및 통신 등과 같은 다양한 고부가가치 서비스 및 첨단 산업 부문에서 관심을 갖고 있을 만큼 매력적인 연구 분야로 성장하고 있으며, 가까운 근래에는 THz 응용 시스템의 기술 수준과 상용화 가능성이 크게 확장될 것으로 전망되고 있다^{[6]-[12]}.

본 논문에서는 이러한 THz의 발생 및 검출과 관련된 소재 및 이를 이용한 다양한 소자 기술에 대하여 전반적인 동향과 한국전기연구원에서의 개발 중

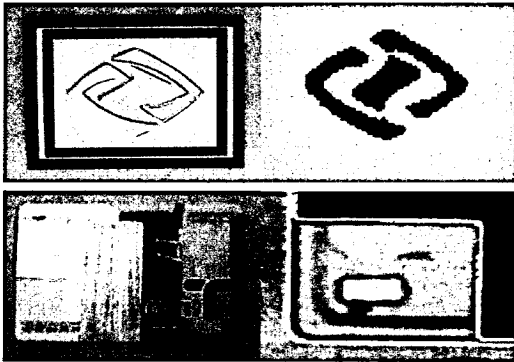


[그림 1] THz 이미징(상: 지폐의 워터마크, 하: 은닉(hidden) 시료(나뭇잎+KERI logo)) [출처: 한국전기연구원]

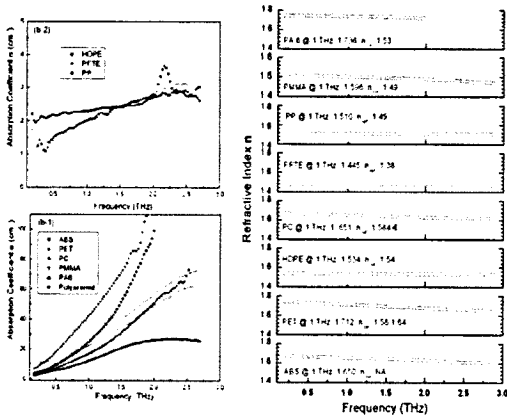
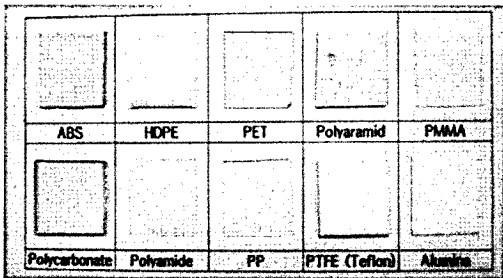
인 THz 기술에 대해 소개하고자 한다. THz 기술은 현재 크게 펄스형(pulse)과 연속형(CW)의 두 부류로 구분하여 연구가 진행되고 있으며, 각각의 특성에 따라 그 응용 분야도 크게 나뉘어져 가고 있다. 최근에는 일부 분야에서는 융합 형태의 연구도 진행되고 있으나, 아직까지는 소재 및 소자의 특성상 구분되어 있다. 따라서 본 논문에서도 각각의 분야에서 사용되고 있는 기술에 대해 구분하여 기술하려 한다.

II. 펄스형 THz파 발생 소재 및 소자

펄스형 THz의 발생 방법은 대부분 초고속 전류의



[그림 2] 분광 정보를 포함한 THz 이미징(상: KERI 마크, 하: 교통카드 IC) [출처: 한국전기연구원]



[그림 3] 폴리머류에 대한 THz 분광 [출처: 한국전기연구원]

순시 변화에 의한 THz를 생성시키는 방법으로서 특성 상 광대역의 특성을 가진다. 이러한 광대역 특성을 이용한 재료의 분광 분석 연구에 가장 많이 사용

하고 있으며, 이미징(THz Imaging, T-ray) 응용에도 활용되고 있다. 특히 이미징 연구에서는 시료의 광대역 특성을 통한 분광 정보를 함께 얻을 수 있어 그 활용 가치가 매우 높다.

2-1 광전도 안테나를 이용한 THz 발생

광전도 안테나(Photoconductive Antenna, PCA)를 이용한 THz 발생 방법은 일반적으로 펄드초 레이저를 이용한 광대역의 THz파 발생에서 가장 많이 사용되는 방법으로 주요 소재로는 SI-GaAs(Semi-Insulated GaAs), Ion-implanted GaAs, LT-GaAs(Low Temperature Grown GaAs), InGaAs 등이 있으며, 대부분의 소재들은 높은 절연 파괴 전압(breakdown voltage), 낮은 광 굴절율, 낮은 밴드 갭, 짧은 캐리어 수명(carrier lifetime), 높은 광 흡수 그리고 큰 캐리어 이동도(mobility)의 특성을 가진다^{[13]~[15]}. 광전도 안테나 구조는 [그림 4]와 같이 반도체 표면에 금속으로 안테나 전극을 형성하고, 전극 양단에 전압을 인가한 상태에서 펄드초 레이저를 전극 사이에 조사하면 레이저 광에 의해 여기(excitation)된 전자와 정공이 반도체 표면에서 바이어스 된 전극으로 이동하면서 빠른 썬지(surge) 전류가 흐르고, 이 전류의 시간 미분에 비례하는 전자파가 안테나로부터 방사된다.

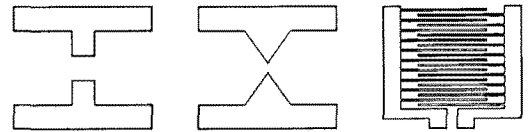
이 방법은 다른 펄스형 THz 발생법과 비교할 때 비교적 큰 출력을 얻을 수 있으며, 레이저 출력과 바이어스 전압을 조절함으로써 출력 가변이 용이한 반면, 발생하는 THz파의 주파수 영역은 반도체의 특성과 안테나의 구조에 의해 비교적 저주파 영역으로 제한되는 특징이 있다.

주파수 특성을 향상시키기 위해 최근에는 LT-GaAs 소재가 가장 많이 사용되고 있다. LT-GaAs는 높은 캐리어 이동도를 가질 뿐만 아니라 저항이 높아 높은 바이어스 전압을 인가할 수 있어 기존의 SI-GaAs 보다 큰 THz파 신호를 만들 수 있으며, 캐리어의 수명이 수백 펄드초 정도로 매우 짧고 넓은 주파수 영

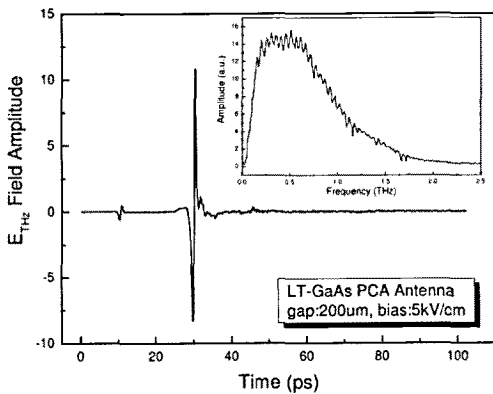
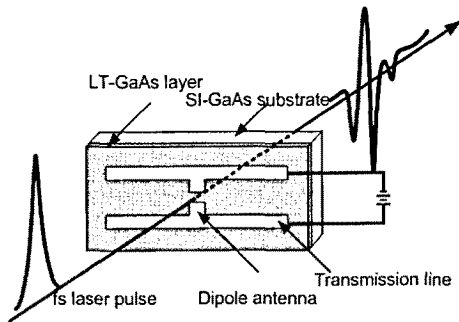
역의 THz를 발생시키는데 이용되고 있다. 광전도 안테나 기술은 소재, 안테나 구조, 전계에 따른 THz파의 출력, 밴드 폭, 방사 패턴 그리고 펄스 특성 등을 개선하기 위해 꾸준히 연구가 진행되고 있다.

특히 THz파 출력과 밴드 폭을 결정하는 안테나 형상에 대한 연구가 보고되었으며, [그림 5]는 이와 관련된 다양한 구조의 안테나에 대한 개략도이다. 일반적으로는 dipole, bow-tai, spiral 등이 사용되고 있으며, 최근에는 coplanar strip line, large aperture, interdigital photoconductive antenna(iPCA)를 이용한 수백 μW 이상의 THz파 발생이 가능하게 되었다^{[16]~[18]}. 또한, 안테나 뒷면에 고저항 실리콘(high resistivity silicon) 소재를 이용한 반구형 렌즈(hemispherical lens)를 부착하여 안테나로부터 방사된 THz파를 집속함

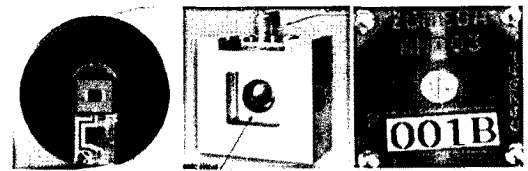
으로써 방사 패턴을 좋게 하거나 THz 영역에서 사용이 가능한 재료들을 이용하여 반사율 또는 투과율이 높은 다양한 광학 부품에 대한 연구도 진행 중에 있다^[19]. 최근에는 이러한 소재 및 부품들을 이용하여 [그림 6]과 같이 모듈 형태의 THz 소자들이 개발 판매되고 있다. 대부분 렌즈 일체형의 구조를 가지고 있으며, 다소 차이가 있으나 수 THz 정도의 주파수 특성을 가진다. 최근에는 [그림 7]과 같이 광과이버를 접목하여 내시경 응용을 위한 소자까지 연구되고 있다^[20].



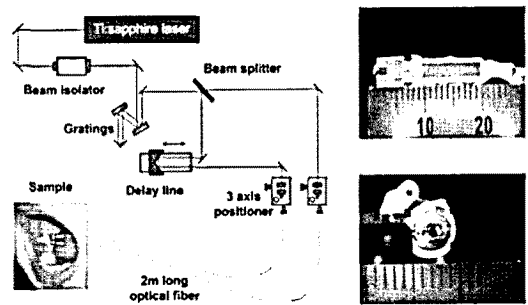
[그림 5] 광전도 안테나 형상(좌: Dipole, 중: Bow-tai, 우: iPCA)



[그림 4] 광전도 안테나 구조 및 THz 파형 [출처: 한국 전기연구원]



[그림 6] 광전도 안테나 소자(좌: Batop, 중: Hamamatsu, 우: Z-Omega)



[그림 7] 광과이버를 접목한 THz 내시경 [출처: 한국해양대학교]

2-2 광정류 방법을 이용한 THz 발생

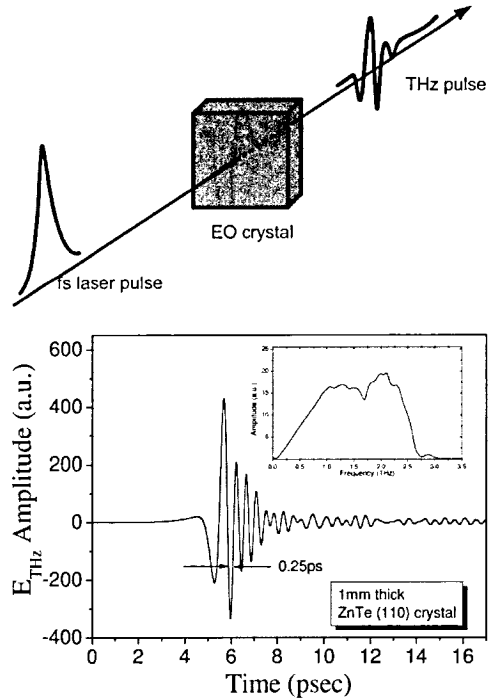
광정류(optical rectification) 방법은 초고속 광 펄스로부터 매우 큰 밴드 폭을 가진 THz파를 발생시킬 수 있는 비선형(nonlinear) 광학 현상이다. 1962년 고강도 레이저 펄스에 의하여 처음으로 발견된 이라 ps, fs 레이저 시스템의 발전과 더불어 더욱 빠른 순시분극이 유도되었고, 밴드 폭은 THz 주파수에 이르게 되었다. 광정류 방법에 의해 발생된 THz파의 밴드 폭은 구동하는 광 펄스, 결정의 비선형 $\chi^{(2)}$ 계수, 결정 손상 문턱치(threshold), 출력 합 제약 조건들과 위상 정합 등에 의해 결정된다.

광전도 안테나 방법과 달리 발생되는 THz 출력은 단지 조사되는 레이저 출력에만 기인하며, 최대 광 출력은 이용 가능한 초고속 레이저 소스와 매개체의 손상에 의해 제약을 받는다. 가장 많이 사용되는 EO 결정은 ZnTe로서 물리적으로 견고하며 우수한 위상 정합 특성을 가지고 있으며, 수 μW 의 출력까지 얻을 수 있다^{[21],[22]}. 앞서 말한 바와 같이 특히 광정류 방법은 레이저 파워에 비례하므로 높은 출력의 THz파 발생이 가능하다. 그 밖에도 LiTaO₃, LiNbO₃ 그리고 DAST 등 다양한 소재들이 사용되고 있으며, 대기 중에서도 바이어스된 QW(quantum well), periodically-poled LiNbO₃(PPLN), poled polymer, polymer thin films, 초전도 박막, beating in quantum well 등에 대한 연구도 보고되었다.

광정류 방법은 본질적으로 광 펄스의 펄스폭에 의하여 밴드 폭이 결정된다. 최근 레이저 기술의 발달로 수 펨토초(fs)의 매우 짧은 펄스폭을 가진 초고속 광 펄스를 이용하여 중적외선(수십 THz)까지의 스펙트럼을 가진 THz파 펄스가 발생하는 것이 입증되었다.



[그림 8] EO 결정들(좌: ZnTe, 중: LiNbO₃, 우: DAST)

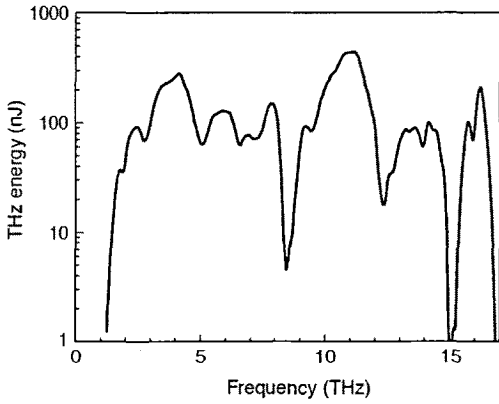


[그림 9] 광정류 방법을 이용한 THz 발생 [출처: 한국 전기연구원]

펙트럼을 가진 THz파 펄스가 발생하는 것이 입증되었다.

2-3 반도체 표면으로부터의 THz 발생

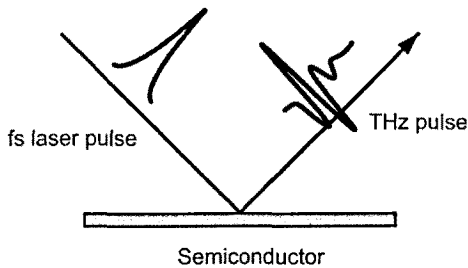
반도체 표면(semiconductor surface)으로부터의 THz 발생은 많은 반도체의 표면 상태들은 완전히 채워져 있다는 사실에 기초하고 있다. 결과적으로 페르미(Fermi) 준위는 속박되어 있고, 전도대와 가전자 밴드는 반도체 표면/공기 접합 부근에서 휘어져 있어 이 공간에 공핍층(depletion layer)을 만들어내고, 이에 따른 강한 표면 전계(전형적으로 $E_b=105 \text{ V/m}$)를 반도체/공기 접합면에 수직으로 만들어낸다. 반도체의 밴드 갭보다 큰 에너지의 광자를 가진 극초단 광 펄스가 반도체 표면에 입사되면 반도체 표면에서 방출된 광 캐리어는 고갈되면서 내재된 전계에 의해 가속된



[그림 10] DAST crystals을 이용한 광대역 THz 발생
[출처: Rainbow Photonics]

다. 결과적으로 극초단의 순시 전류가 형성되고, 그것은 THz 영역의 스펙트럼을 가진 전자파 빔을 발생시킨다. 이 빔은 광 여파의 입사각을 변화시킴으로써 방향을 조절할 수 있다. InP, GaAs, GaSb, CdTe, CdSe, Ge 그리고 $Ga_{1-x}Al_xAs(x < 0.2)$ 와 같은 많은 반도체들이 THz파 발생이 가능함을 보였으며, Au/GaAs Schottky barriers도 표면/공기 접촉면에서 THz 발생이 가능이 보고된 바 있다^{[22]~[25]}.

이전의 방법과 비교해서 인가된 바이어스나 안테나가 없이도 THz 신호가 발생될 뿐만 아니라 높은 주파수의 THz 발생이 가능하다. 또한, 광정류 방법과 동일하게 인가되는 레이저 출력에 비례하는 높은

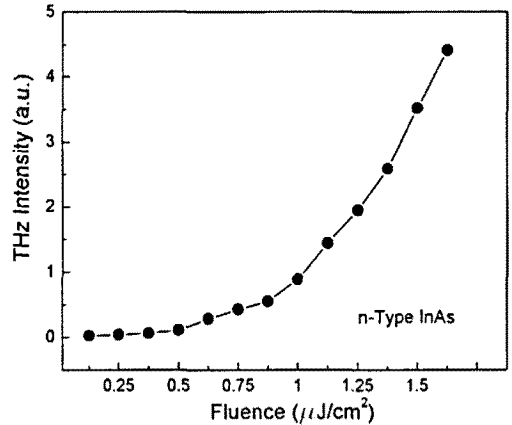


[그림 11] 반도체 표면에서의 THz 발생 [출처: 한국전기연구원]

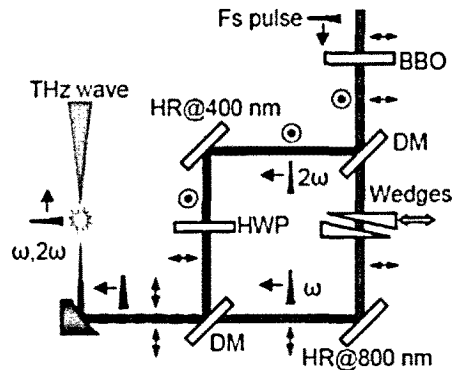
출력의 THz 신호를 얻을 수 있다.

2-4 그 밖의 펄스형 THz 발생

그 밖에도 [그림 13]과 같이 최근 고출력 레이저를 이용한 공기 중에서의 플라즈마(plasma) 상태에서의 THz에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며^[26], inverse Franz-Keldysh effect, coherent control concept 등 다양한 방법이 사용되고 있으며 대부분 앞서 기술한 THz 발생법에 대한 낮은 THz파 출력을 극복하기 위한 방법으로 사용되고 있다.



[그림 12] 레이저 입력에 따른 THz 신호 크기 [출처: 한국전기연구원]



[그림 13] 플라즈마를 이용한 THz파 발생 [출처: Zomega]

III. 연속형 THz파 발생 소재 및 소자

연속형 THz파의 발생 방법으로는 레이저 기반의 포토믹서(photomixers), CO₂ laser pumped molecular gas lasers, THz parametric oscillator(TPO), hot-hole laser 등이 있으며, 진공 속에서의 전자의 이동을 이용한 BWO (Backward Wave Oscillator), nanoklystrons, gyrotrons과 solid state devices인 gunn diode, 전자 가속 기반의 synchrotrons, FEL(Free Electron Laser) 등 다양한 기술이 사용되고 있으며, 최근에는 반도체 기술을 이용한 고출력의 THz 양자 폭포 레이저(Quantum Cascade Laser: QCL)도 개발되고 있다.

3-1 포토믹싱을 이용한 THz 발생

포토믹싱(photomixing)은 두 레이저를 이용하여 연속형 THz파를 발생시키는 방법으로 동일한 편광(polarization)을 가지고 주파수가 각각 ω_1 , ω_2 인 두 개의 CW 레이저를 공간상에 겹쳐지게 한 후 두 레이저의 비팅(beat)에 의하여 THz파를 발생시킨다. 이때 사용되는 레이저들은 대부분 근 적외선 영역의 레이저로서, 최근에는 GaAs와 같은 고속의 반도체 재료를 이용하고 있으며, 사용되는 레이저의 펄스폭은 1 ps 이하의 짧은 펄스폭을 가진 레이저가 사용되어야 한다. 대부분 두 파장의 차가 수 nm 정도의 값을 가진다. 광자 흡수 및 짧은 캐리어의 수명으로부터 원하는 THz 주파수인 $\omega_{THz} = \omega_1 - \omega_2$ 를 얻을 수 있다. 이

기술의 장점은 0.3~3 THz 주파수 영역을 연속적으로 조정할 수 있을 뿐만 아니라 스펙트럼의 해상도도 1 MHz 정도까지 조정이 가능하다^{[27],[28]}.

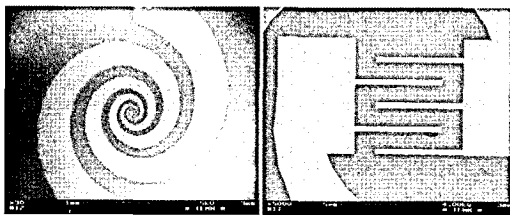
최근에는 LTGaAs 기판에 증착으로 패터닝된 어레이(array) 형태의 전극과 나선형(spiral) 구조의 방사형 안테나 구조를 가진 포토믹서(photomixer)가 가장 많이 사용되고 있다. 구조적으로 간단하면서 매우 작은 형태의 시스템까지 가능하다. 아직까지 낮은 파워와 안테나 기술이 요구되고 있으나, 새로운 THz 발생 방법으로서 그 응용 가능성이 높다.

3-2 BWO 진공 전자 소자

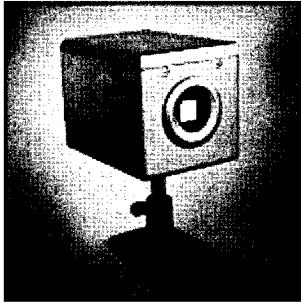
BWO는 대표적인 진공 전자 소자로서, 마이크로파 대역부터 THz 영역까지 사용되고 있으며, 넓은 주파수 영역에 대한 조정이 가능하다^[29]. 저속파(slow wave structure) 회로와의 상호 작용을 통해 전자총으로부터 발생된 전자 빔의 에너지를 THz파의 에너지로 변환하여 THz파를 발생시킨다. 현재 M-type과 O-type의 두 가지 형태가 사용되고 있다. O-type의 BWO는 일반적으로 1 THz에서 1 mW, 200 GHz에서 약 50 mW 정도의 출력을 얻을 수 있다. 또한, BWO는 좋은 파면을 가지고 있어 THz 이미징에 적합하여 이를 이용한 응용 연구가 활발히 진행되고 있다^[30].

3-3 양자 폭포 레이저(Quantum Cascade Laser)

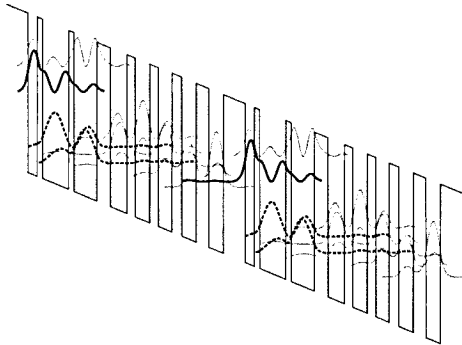
양자 폭포 레이저(Quantum Cascade Laser: QCL)는 1994년 AT&T Bell lab에서 다른 반도체들의 연속적인 적층에 의해 발전이 보고되었다. 양자 폭포 레이저의 구조는 전자를 주입하기 위한 주입부(injector)와 THz파를 발전하는 에미터(emitter)부가 한 주기를 이루고 있으며, 이러한 주기가 수십 번 이상 반복하여 적층된 구조를 가진다. 주입부에서 주입된 전자는 한 주기를 지나면서 여러 개의 다른 광자를 발생시키면서 마치 폭포 모양과 유사하여, 양자 폭포 레이저라고 불린다. 양자 폭포 레이저는 전통적인 다



[그림 14] Photomixing 안테나(좌: Spiral antenna /우: Interdigitated PCA)



[그림 15] Backward wave oscillator [출처: Microtech]



[그림 16] 양자 폭포 레이저의 에너지 밴드

이오드 레이저와 같이 반도체의 밴드 갭을 넘지는 못하지만 넓은 범위에서 조절이 가능하다. 최근 양자 폭포 레이저는 AlGaAs/GaAs의 적층 구조를 기본으로 하고 있으며, 최대 동작 온도는 연속파의 경우에는 90 K, 펄스 모드에서는 140 K이며, 2~4.5 THz 사이의 주파수 특성을 가진다^{[31]~[32]}.

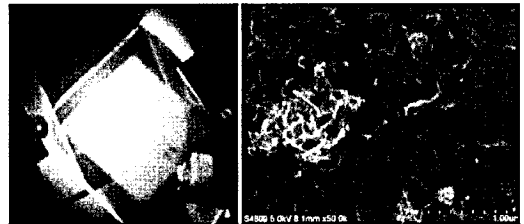
IV. 신기술을 적용한 차세대 진공 전자 소자

진공 전자 소자는 진공 중의 전자 빔에서 THz파의 에너지를 얻기 때문에 열 손실이 적고, 에너지 전환 효율이 상대적으로 높은 장점을 가진다. 그래서 THz 주파수 대역에서 가장 높은 출력과 에너지 변환 효율을 가질 수가 있다^{[33],[34]}. 그러나 일반적으로 크기가 크고, 제작이 용이하지 않으며, 시스템이 복

잡하다는 단점이 있다. 이 문제를 극복하기 위한 연구가 대략 10년 전부터 시작되었는데, 크게 두 가지 기술적인 접근으로 기존 진공 전자 소자의 단점을 극복하고자 하고 있다. 하나는 현대의 초정밀 가공 기술을 사용하는 것이다. 주로 반도체 소자의 제작을 위해 개발된 리소그래피(lithography) 기술, 정밀 식각(etching) 기술을 사용하는데, 주로 RF MEMS 소자에 사용되고 있는 기술이다. 진공 전자 소자용으로는 초기에 X-ray LIGA가 주로 연구되었는데, 현재는 다양한 기술들로 확대되고 있다. 그 중에서 상대적으로 값싸고 기술적인 접근성이 용이한 실리콘 웨이퍼 기반의 MEMS 가공 기술에 대한 관심이 점점 더 커지고 있다. 다른 한 가지 접근 방법은 신물질을 사용하여 기존의 진공 전자 소자와는 확연히 달라진 차세대 소자로 발전시키고자 하는 것이다.

4-1 신물질 기반 전자 빔 발생

대표적으로 탄소 나노튜브(Carbon Nanotube: CNT)를 이용한 냉음극 전자총을 활용하는 것이다. 냉음극이기 때문에 초소형 전자총을 제작하기가 용이할 뿐만 아니라 고주파수의 펄스형 전자 빔을 방출하는 전자총으로서의 가능성이 높다^[35]. 유럽 연합의 OPTHER 프로젝트가 위에서 언급한 신기술을 이용한 차세대 진공 소자 개발을 목표로 하는 대표적인 예이다. 한국에서는 서울대학교에서 비슷한 개념의 기초 연구



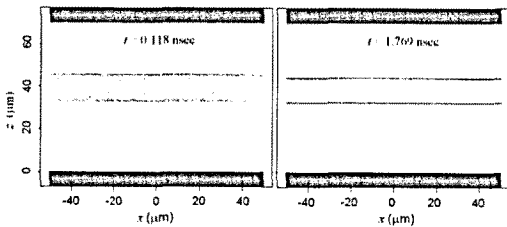
[그림 17] 탄소 나노튜브(CNT) 냉음극, 전계 방출된 전자 빔으로 인한 형광판 발광 실험 [출처: 한국전기연구원]

를 진행하고 있다. 또한 한국전기연구원은 탄소 나노튜브를 이용한 냉음극 전자 총, 이차 전자를 이용한 냉음극 전자 총, 실리콘 웨이퍼 식각을 통한 광결정 회로 제작 등을 통하여 기존의 진공소자의 단점을 극복하는 차세대 THz 진공소자 개발 연구를 진행 중이다. [그림 17]은 금으로 코팅된 실리콘 웨이퍼 위에 올려진 탄소 나노튜브 전극과 그 전극에서 전계 방출된 전자 빔이 형광판에 충돌하여 발광하는 실험 결과이다. 현재 공진기 구조에서 전계 방출하는 냉음극 전자총을 개발 중이다.

[그림 18]은 이차 전자 증폭에 의한 펄스형 전자 빔 방출을 3차원 PIC(Particle In Cell) 시뮬레이션을 통해 모사한 결과이다. 두 금속판 중에서 한 쪽 면에서만 이차전자가 발생하는 구조로 기존의 두 면을 모두 이용한 경우와 달리 펄스 전자 빔의 주파수를 크게 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 이 구조에서는 기존의 경우와 달리 두 개의 전자 구름이 형성될 수 있음을 보여주고 있다^[36].

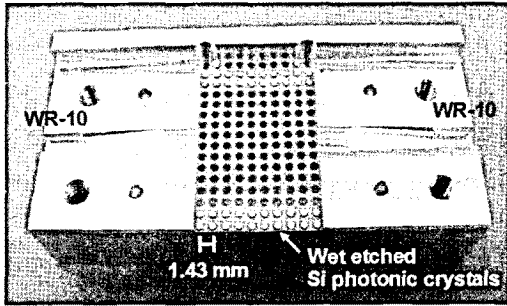
4-2 Photonic Crystal 기반 진공 전자 소자

금속 및 유전체의 주기적인 변화를 이용하는 광결정(photonic crystals)은 일정 반지름을 갖는 광결정의 주기적 구조에 의해 형성된 일정 주파수 대역의 전자기파가 투과하지 못하는 현상이 나타나는데, 이와 같은 주파수 대역을 광 밴드 갭(Photonic Band Gap:

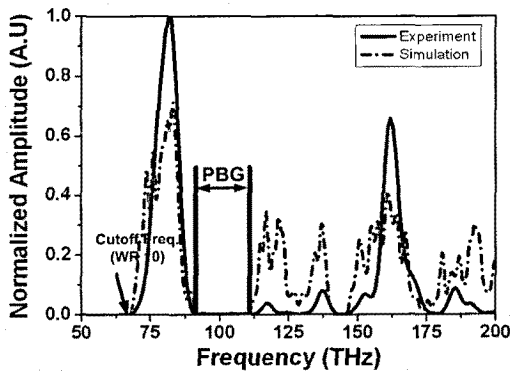


[그림 18] 이차 전자에 의해 두 개의 전자 구름이 제한된 공간에 형성되는 것을 보여주는 3차원 PIC 시뮬레이션 [출처: 한국전기연구원]

PBG)이라고 부른다^{[37],[38]}. 이와 같은 광결정 내부에 주기성을 깨트리는 결함을 삽입하면 결함의 구조에 따라 공진기(resonator)나 도파관(waveguide)과 같은 회로를 만들어 사용할 수 있다. 이와 같은 광결정 회로의 고유한 특성을 이용하면 THz 주파수 대역에서 기존에 사용되고 있는 금속으로 제작된 공진기나 도파관과는 다른 차별적인 소자를 구현하는 것이 가능하다. 특히, 공진기 기반 THz 발생 소자의 출력을 증가시키기 위해서는 단일 모드로 동작하는 공진기 대신 다중 전자 빔을 적용할 수 있는 고차 모드(high order mode) 공진기를 사용해야 하고, 출력부를 포함한 고차 공진 모드 공진기의 모드를 균일하게 형성할 수 있는 광결정 기반 공진기를 개발해야 한다. 그러나, THz 광결정은 가공이 용이하지 않거나 가공비가 고가라는 단점이 있다. 약 수십 μm 에서 수백 μm 의 크기를 갖는 광결정을 가공해야 하기 때문에 가공의 정밀성, 비용, 표면 거칠기(surface roughness) 등을 고려하였을 때, 반도체 가공 기술을 기반으로 한 MEMS 가공이 필수적이다. 이를 위해, 높이가 큰 광결정 구조를 상대적으로 가격이 저렴하며, 대량으로 제작할 수 있는 습식 식각(wet-etching) 공정을 이용하여 0.1 THz 광결정 회로를 제작하였다. [그림 19]는 습식 식각 공정으로 제작된 0.1 THz 2차원 광결정의 사진이다. 실리콘 웨이퍼의 (100) 방향으로 가공되는 비등방적 습식 식각 공정을 이용하여 높이 150 μm , 주기 1,430 μm , 윗면 반지름 350 μm 의 16×10 square lattice 광결정 회로를 제작하였다. 최근 밀리미터파 소자 기술의 진보로 인해 광 밴드 갭의 측정을 위한 네트워크 분석기(network analyzer)가 개발되었으나 고가일 뿐만 아니라 여전히 수백 GHz 이하로 주파수 범위가 제한적이다. 하나의 대안으로 THz-TDS를 이용한 방법이 제안되고 있다. [그림 20]은 [그림 19]의 0.1 THz 광결정 회로에 대한 3차원 FDTD 시뮬레이션과 THz-TDS를 이용하여 측정된 투과 주파수 스펙트럼으로서 거의 동일한 광



[그림 19] 실리콘 웨이퍼의 비등방성 습식 식각 공정을 이용해 제작한 0.1 THz 2차원 광결정 회로 [출처: 한국전기연구원]

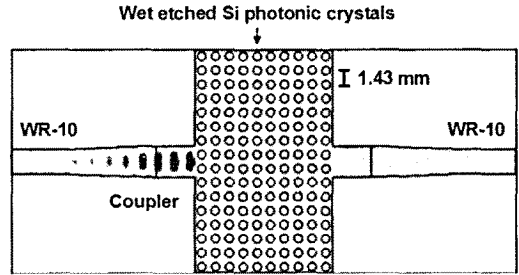


[그림 20] 0.1 THz 광결정 회로에 대한 3차원 FDTD 시뮬레이션과 THz-TDS를 이용한 투과 주파수 스펙트럼 [출처: 한국전기연구원]

밴드 갭 특성을 보이고 있다. 이는 펄스형 THz 시스템을 이용하여 연속형 소자의 특성 분석에 충분히 활용 가능할 뿐만 아니라 낮은 주파수 영역에 대한 측정이 가능함을 확인할 수 있다. [그림 21]은 3D FDTD(Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션 결과이다^[39].

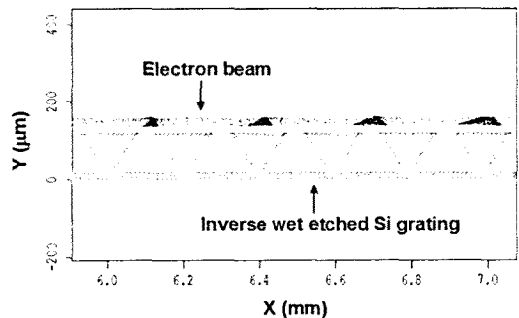
4-3 Grating 기반 진공 전자 소자

THz 대역의 진공 전자 소자를 구현하기 위해서는 고밀도 전자 빔 발생과 MEMS 미세 가공에 적합한



[그림 21] MEMS 습식 식각 공정 기반 0.1 THz 광결정 회로의 3차원 FDTD 시뮬레이션 [출처: 한국전기연구원]

회로 구조를 갖는 새로운 개념이 소자 개발이 필요하다. 이를 위해 실리콘(Si) grating 회로를 적용한 광대역 SP-BWO(Smith-Purcell Backward Wave Oscillator)와 협대역의 spatial harmonic magnetron(마그네트론) 소자가 연구되었다^{[40]~[42]}. [그림 22]는 0.7 THz에서 동작하는 Si grating 회로를 적용한 SP-BWO 소자의 PIC(Particle-In-Cell) 시뮬레이션을 이용해 계산한 전자 빔 분포를 보이고 있다. THz를 발생시키기 위한 회로로 Si-wafer를 이용하여 습식 식각 공정을 사용해서 제작된 Inverse wet etched grating을 이용함으로써, Grating 회로 표면의 전기장 세기를 증폭시키고, 이를 통해 전자 빔 붕침(bunching) 세기를 증가시켜 발생



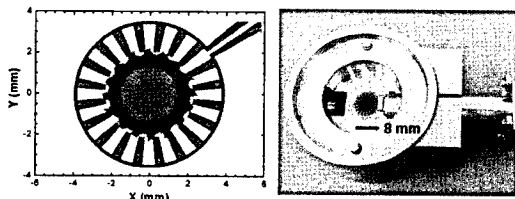
[그림 22] 습식 식각 공정 기반 Si grating 회로를 적용한 0.7 THz SP-BWO 소자의 PIC 시뮬레이션 [출처: 한국전기연구원]

되는 THz파의 세기를 증가시킬 수 있는 소자이다. Spatial harmonic magnetron은 기존 마그네트론 소자에 사용되는 π -mode 대신에 spatial harmonic 모드를 사용하여 밀리미터파 대역뿐만 아니라 THz 대역에서도 compact size, 고효율, 고출력 동작이 가능하도록 한 소자이다. Spatial harmonic 동작 모드를 사용하면 magnetron 동작 시 필요한 축 방향 외부 자기장 세기를 줄일 수 있고, 원형의 grating 구조로 형성된 공진 회로의 크기를 증가시킬 수 있어, THz magnetron에 적합하다. 이외에, THz 대역에서 동작 시 필요한 고밀도 전자 빔을 안정적으로 발생시키기 위해 이차 전자를 이용한 냉음극 연구도 진행 중이다.

[그림 23]은 35 GHz에서 동작하는 spatial harmonic magnetron 소자의 3차원 PIC 시뮬레이션을 이용해서 계산한 전자 빔 분포와 Wire-EDM(Electric Discharge Machining) 방전 가공을 이용하여 제작된 회로를 보여주고 있다. 총 20개의 side resonator로 구성된 magnetron 소자가 spatial harmonic 모드인 동작 모드 $p=16$ 로 안정적으로 동작하고 있음을 총 16개로 형성된 전자 빔 bunching을 통해 확인되었으며, 3차원 시뮬레이션 결과를 바탕으로 magnetron을 제작하여 소자 특성에 관한 연구가 진행 중에 있다.

V. THz파 검출 소재 및 소자

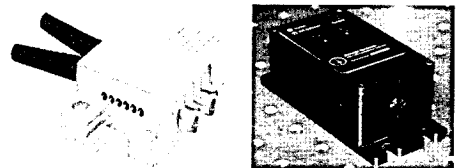
THz 검출 소재 및 소자 또한 펄스형과 연속형



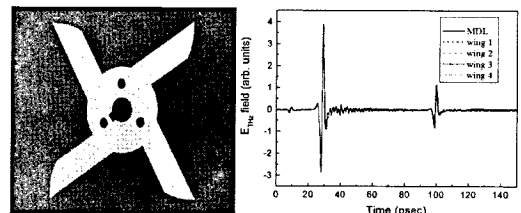
[그림 23] Spatial harmonic magnetron 소자의 3차원 PIC 시뮬레이션을 이용한 전자 빔 분포와 미세 가공된 회로 [출처: 한국전기연구원]

THz파에 맞게 진행되어 왔다. 펄스형 THz파의 검출 소자의 기본 원리는 광전도 안테나 방법을 이용한 것으로 발생부에서 사용하던 바이어스 전압 대신 전류계를 접속하여 측정하는 방법이다. 최근에는 보다 넓은 주파수 영역을 측정하기 위해 전기광학적 효과를 이용한 전광 샘플링(Electro-Optics Sampling: EOS)이 많이 사용되고 있다. 이는 앞선 광정류 방법에서 사용하던 ZnTe와 같은 복굴절 재료를 이용하여 THz파의 전기장에 의한 편광의 변화를 측정하는 방법으로 대부분의 펄스형 THz 검출은 발생에서 사용하던 소재들이 사용되고 있으며, 최근에는 소형의 검출 소자들이 많이 개발되고 있다^[43]. 이외에도, 펄스형 THz파의 검출 속도를 높이기 위해 비선형 곡선([그림 25])이나 평면 반사체([그림 26])를 이용한 회전형 광지연기도 개발되고 있다^{[44]~[45]}.

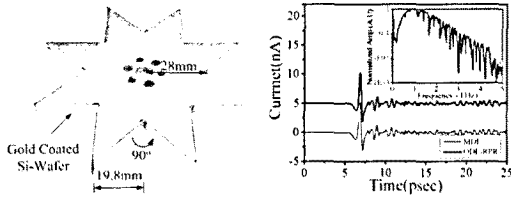
보안, 의료와 같이 THz 이미징에 대한 응용 분야의 확대로 펄스형 THz 소자보다는 연속형 THz 검출 소자들이 보다 다양하게 개발되고 있다. 대표적으로 Schottky barrier diode, pyroelectric, Golay cell, bolometer



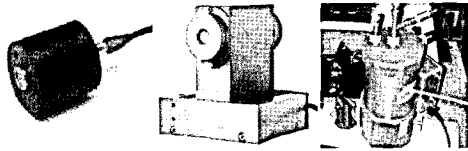
[그림 24] 펄스형 THz파 검출 소자(좌: Picometrix, 우: Z-Omega)



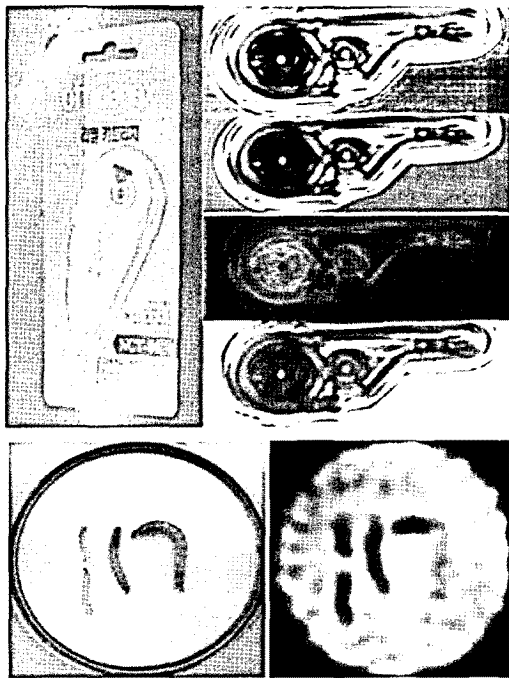
[그림 25] Involute 곡선을 이용한 회전형 광지연기 [출처: 한국전기연구원]



[그림 26] 평면 반도체 회전을 이용한 광지연기 [출처: 한국전기연구원]



[그림 27] 연속형 THz파 검출 소자(좌: Pyroelectric 검출기, 중: Golay cell, 우: Bolometer)



[그림 28] 연속형 검출 소자를 이용한 THz 이미징 (상: 수정테이프, 하: 밀가루 속 벌레 이물) [출처: 한국전기연구원]

등이 있으며, 최근에는 microbolometer, pyrocam 등 2D camera 형태의 소자들도 개발되고 있다^{[46],[47]}. 최근 이러한 소자들을 이용한 비파괴 검사나 보안 검색 등에 활용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 2D 소자를 이용한 실시간(real-time) THz 영상에 대한 연구도 보고되고 있다.

VI. 결 론

THz파의 발생과 검출이 가능한 이래 지난 수십 년의 짧은 기간 임에도 불구하고 매우 빠른 속도로 기술의 진보를 이루고 있다. 이는 THz파가 가지는 무한한 가능성을 이미 잘 알고 있기 때문이다. THz파의 응용 분야는 앞서 말한 바와 같이 의료, 보안 등 우리 삶의 모든 분야에서 그 활용이 가능하다. 그러나, 아직까지 최적화된 소재 및 소자에 대한 기술 개발은 아직 미미한 상태이다. 최근 이종 기술을 접목한 소재 및 소자들이 개발되고 있으나, 소형(compact) 이면서 고출력(high power)의 소스가 부재한 상태이며, 이차원 형태의 어레이 검출기도 대부분 기존의 IR 영역에서 활용하던 것으로 낮은 감도에 의하여 활용 가치가 매우 낮다. 최근 소형의 양자 폭포 레이저 소스나 microbolometer 검출기에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나, 전체 시스템 면에서 아직까지 활용에 많은 제약이 따른다.

최근 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 국가적인 차원에서 지원이 이루어지고 있으며, 이는 미래의 THz 분야를 선점하기 위한 것이다. 최근 국내에서도 산학연을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있어, 향후 고부가가치 신산업을 위한 기술 확보가 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] R. Kleiner, "Filling the terahertz gap", *Science*, vol.

- 318, pp. 1254-1255, 2007.
- [2] T. Globus, R. Parthasarathy, T. Khromova, et al, "Optical characteristics of biological molecules in the terahertz gap", *Proceedings of SPIE*, vol. 5584, pp. 1-10, 2004.
- [3] P. H. Siegel, "Terahertz technology", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, pp. 910-928, 2002.
- [4] R. H. Jacobsen, D. M. Mittleman, and M. C. Nuss, "Chemical recognition of gases and gas mixtures with terahertz waves", *Optics Letters*, vol. 21, pp. 2011-2013, 1996.
- [5] P. H. Siegel, "THz instruments for space", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, pp. 2957-2965, 2007.
- [6] R. Foltynowic, "Applications for terahertz time-domain spectroscopy", *Terahertz Radiation Science & Technology*, pp. 38-39.
- [7] W. R. Tribe, D. A. Newnham, P. F. Taday, and M. C. Kemp, "Hidden object detection: security applications of terahertz technology", *Proc. of SPIE*, vol. 5354, pp. 168-176, 2004.
- [8] A. Redo-Sanchez, N. Karpowicz, J. Xu, and X. C. Zhang, "Damage and defect inspection with terahertz waves", *The 4th Inter'Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, pp. 67-78, 2006.
- [9] P. H. Siegel, "Terahertz technology in biology and medicine", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, pp. 2438-2447, 2004.
- [10] N. Laman, S. S. Harsha, and D. Grischkowsky, "Narrow-line waveguide terahertz time-domain spectroscopy of aspirin and aspirin precursors", *Applied Spectroscopy*, vol. 62, pp. 319-326, 2008.
- [11] M. C. Beard, G. M. Turner, and C. A. Schmuttenmaer, "Progress towards two-dimensional biomedical imaging with THz spectroscopy", *Phys. Med. Biol.*, vol. 47, pp. 3841-3846, 2002.
- [12] Y. S. Jin, G. J. Kim and S. G. Jeon, "Terahertz dielectric properties of polymers", *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 49, pp. 513-517, 2006.
- [13] H. Nemeč, A. Pashkin, P. Kuzela, M. Khazan, S. Schnull, and I. Wilke, "Carrier dynamics in low-temperature grown GaAs studied by terahertz emission spectroscopy", *Journal of Applied Physics*, vol. 90, pp. 1303-1306, 2001.
- [14] J. Lloyd-Hughes, E. Castro-Camus, M. D. Fraser, C. Jagadish, and M. B. Johnston, "Carrier dynamics in ion-implanted GaAs studied by simulation and observation of terahertz emission", *Physical Review B*, vol. 70, pp. 235-330, 2001.
- [15] C. Kadowa, S. B. Fleischer, J. P. Ibbetson, J. E. Bowers, and A. C. Gossard, "Subpicosecond carrier dynamics in low-temperature grown GaAs on Si substrates", *Applied Physics Letters*, vol. 75, pp. 2575-2577, 1999.
- [16] J. A. Deibel, M. D. Escarra, and D. M. Mittleman, "Photoconductive terahertz antenna with radial symmetry", *Electronics Letters*, vol. 41, 2005.
- [17] R. K. Lai, J. Hwang, T. B. Norris, and J. F. Whitaker, "A photoconductive, miniature terahertz source", *Applied Physics Letters*, vol. 72, pp. 3100-3102, 1998.
- [18] T. Hattori, K. Egawa, S. Ookuma, and T. Itatani, "Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 45, pp. L422-L424, 2006.
- [19] J. Van Rudd, Daniel M. Mittleman, "Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spec-

- troscopy", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, pp. 319-328, 2002.
- [20] Y. B. Ji, E. S. Lee, S.-H Kim, J.-H Son, and T.-In Jeon, "A miniaturized fiber-coupled terahertz endoscope system", *Optics Express*, vol. 17, pp. 17082-17087, 2009.
- [21] F. D. J. Brunner, A. Schneider, and P. Günter, "Velocity-matched terahertz generation by optical rectification in an organic nonlinear optical crystal using a Ti:sapphire laser", *Applied Physics Letters*, vol. 94, 061119, 2009.
- [22] Y. S. Lee, W. C. Hurlbut, K. L. Vodopyanov, M. M. Fejer, and V. G. Kozlov, "Generation of multi-cycle terahertz pulses via optical rectification in periodically inverted GaAs structures", *Applied Physics Letters*, vol. 89, 181104, 2006.
- [23] M. B. Johnston, D. M. Whittaker, A. Corchia, A. G. Davies, and E. H. Linfield, "Simulation of terahertz generation at semiconductor surfaces", *Physical Review B*, vol. 65, 165301.
- [24] J. Darmo, G. Strasser, T. Müller, R. Bratschitsch, and K. Unterrainer, "Surface-modified GaAs terahertz plasmon emitter", *Applied Physics Letters*, vol. 81, pp. 871-873, 2002.
- [25] M. Reid, R. Fedosejevs, "Terahertz emission from (100) InAs surfaces at high excitation fluences", *Applied Physics Letters*, vol. 86, pp. 011906, 2005.
- [26] X. Xie, J. Xu, J. Dai, and X.-C. Zhang, "Enhancement of terahertz wave generation from laser induced plasma", *Applied Physics Letters*, vol. 90, pp. 141104, 2007.
- [27] D. Saeedkia, S. Safavi-Naeini, "Theory and design of an edge-coupled terahertz photomixer source", *17th International Symposium on Space Terahertz Technology*, P2-15, pp. 263-266.
- [28] A. J. Deninger, T. Göbel, D. Schönherr, T. Kinder, et al, "Precisely tunable continuous-wave terahertz source with interferometric frequency control", *Review of Scientific Instruments*, vol. 79, pp. 044702, 2008.
- [29] B. Gorshunov, A. Volkov, I. Spektor, A. Prokhorov, et al, "Terahertz bwo-spectroscopy", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 26, pp. 1217-1240, 2005.
- [30] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, et al, "Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator", *Applied Optics*, vol. 43, pp. 5637-5646, 2004.
- [31] L. Sirigu, A. Rudra, E. Kapon, M. I. Amanti, G. Scalari, and J. Faist, "A terahertz quantum cascade laser grown by low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy", *Applied Physics Letters*, vol. 92, pp. 181111, 2008.
- [32] C. Walther, G. Scalari, J. Faist, H. Beere, and D. Ritchie, "Low frequency terahertz quantum cascade laser operating from 1.6 to 1.8 THz", *Applied Physics Letters*, vol. 89, pp. 231121, 2006.
- [33] J. H. Booske, "Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation", *Phys. Plasma*, 15, 055502, 2008.
- [34] V. D. Naumenko et al., "Miniature 1 kW 95 GHz Magnetrons", *Electronics Lett.*, vol. 35, 1960, 1999.
- [35] K. B. K. Teo et al., "Carbon nanotubes as cold cathodes", *Nature* 437, 968, 2005.
- [36] S. G. Jeon et al., "Theoretical study of Dc-biased single-surface multipactors", *Phys. Plasmas*, 16, 073101, 2009.
- [37] S. G. Jeon et al., "High order mode formation of externally coupled hybrid photonic-band gap ca-

- vity", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 02112, 2007.
- [38] 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.
- [39] 김정일 외, "습식공정으로 제작된 광결정 소자 및 그 제조방법", PCT/KR2009/003703.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] J. I. Kim et al., "Three-dimensional particle-in-cell simulation of 35 GHz spatial-harmonic magnetron, *Proc. Conf. IEEE IVEC* (2010).
- [43] A. Nahata, J. T. Yardley, and T. F. Heinz, "Two-dimensional imaging of continuous-wave terahertz radiation using electro-optic detection", *Applied Physics Letters*, vol. 81, pp. 963-965, 2002.
- [44] G. J. Kim, S. G. Jeon, J. I. Kim, and Y. S. Jin, "Terahertz pulse detection using rotary optical delay line", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 7332-7335, 2007.
- [45] G. J. Kim, S. G. Jeon, J. I. Kim, and S. T. Han, "A novel optical delay line using a rotating planar reflector for fast measurement of a terahertz pulse", *JKPS*, vol. 56, pp. 1763-1766, 2010.
- [46] J. Yang, S. Ruan, and M. Zhang, "Real-time, continuous-wave terahertz imaging by a pyroelectric camera", *Chinese Optics Letters*, vol. 6, 2008.
- [47] A. L. Aseev, D. G. Esaev, M. A. Dem'yanenko, I. V. Marchishin, et al, "Terahertz imaging and radioscopy with 160X120 microbolometer 90 FPS camera", *Proceedings of FEL 2007*, Novosibirsk, Russia, MOPPH030.

≡ 필자소개 ≡

김 근 주



2001년 2월: 한국해양대학교 전기공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국해양대학교 전기공학과 (공학석사)
2009년 8월: 한국전기연구원 전문연구원
2009년 8월~현재: 한국전기연구원 선임 연구원

[주 관심분야] 펄스형 THz파 분광/영상, 연속형 THz파 실시간 영상

김 정 일



2000년 2월: 서울시립대학교 물리학과 (이학사)
2002년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학석사)
2006년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학박사)
2006년 7월~현재: 한국전기연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 고출력 밀리미터파 소자, 테라헤르츠파 소자 및 응용 시스템

전 석 기



1998년 8월: 서울대학교 물리교육과 (이학사)
2001년 3월: 서울대학교 물리학과 (이학석사)
2005년 3월: 서울대학교 물리학과 (이학박사)
2005년 1월~현재: 한국전기연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 밀리미터파/테라헤르츠파 소자 개발 및 응용