

Photonics 기반 THz Vacuum Electron Devices

소진규 · 장규하 · 박건식 (서울대학교)

I. 서론

밀리미터파와 원적외선 사이에 위치한 테라헤르츠파(0.1-10 THz)는 그 응용 가능성의 풍부함에도 불구하고 전자기파 스펙트럼 상에서 광파와 전파의 경계에 위치해 있어 두 영역의 전통적인 발생 방식을 통한 접근 방식으로는 광원 개발에 있어 한계에 직면해 있었다. 또한, 이러한 한계로 인한 고출력의 전자기파 발생과 검출의 어려움은 이 주파수 대역에 대한 관심을 천체물리학과 같은 극히 제한된 분야에만 머물게 해왔다. 하지만, 90년대 들어 나노 기술과 광 기술의 비약적으로 발전함에 따라 펄스와 연속 광원의 지속적인 발전이 이루어졌으며 이는 테라헤르츠파의 뛰어난 물질 분별성과 고주파수의 정보 전달 능력을 바탕으로 이 영역에 대한 관심을 이화학, 의료, 바이오, 통신, 안전 등 다양한 분야로 꾸준히 확장시켜 가고 있다.^[1,2]

이러한 관심의 확장을 가능하게 한 테라헤르츠 광원은 그 발생방식에 따라 크게 펌프초 레이저에 기반한 시간영역 분광법(THz-TDS)으로 대표되는 펄스형 광원과 반도체 양자우물 구조에 기반한 양자폭포레이저(Quantum Cascade

Laser) 및 진공 전자를 이용한 진공전자소자(Vacuum Electron Device)와 자유전자레이저(Free Electron Laser)와 같은 연속형 광원으로 나뉜다. 펄스 방식의 광대역에 비하면 연속 광원의 대역폭은 상대적으로 작다고 볼 수 있으나, 펄스 광원에서 얻을 수 없는 고분해능의 스펙트럼을 얻을 수 있으며 그 출력 또한 펄스 광원에 비할 수 없을 정도로 높다. 한편, 고출력 광원은 스펙트럼 분석 및 이미징 등의 일반적 테라헤르츠 응용 외에도 비선형 상호작용 연구, 생체의 안정성 검증 및 실시간 이미징 기술 등의 응용이 기대되고 있다. 또한, 펄스 광원은 소형화에 일정한 제약이 있는 데 비해 연속 광원은 소형화 및 휴대화가 가능하다.

본 원고에서는 테라헤르츠파 고출력 연속 광원 중에서도 소형화가 가능한 진공전자소자(vacuum electron devices)의 개발 현황 및 그 응용에 대해 소개하고자 한다.

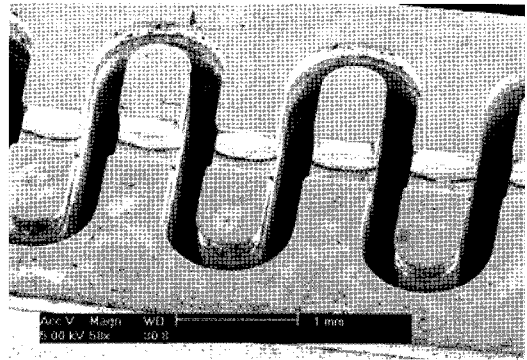
II. MEMS 기반 소형 테라헤르츠파원

최근 MEMS가공기술의 발전에 힘입어 고출력

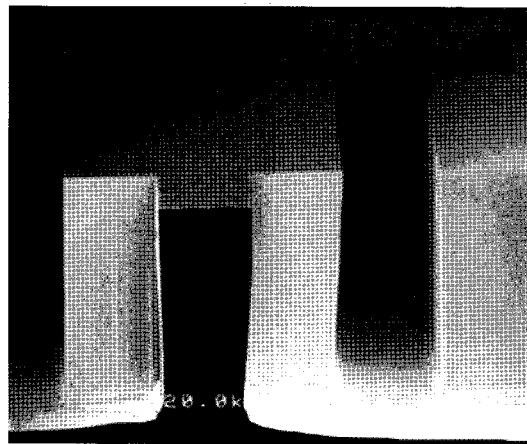
테라헤르츠 연속 광원의 하나로 체렌코프 방사에 기반한 진공전자소자(Vacuum Electron Devices)가 주목받고 있다. 이러한 진공전자소자는 선형적으로 진공내를 진행하는 전자빔과 상호작용해서 체렌코프 방사를 내기 위해 저속파 구조(slow-wave structure)가 필요하며, 저속파 구조로는 유전물질 대신에 나선형 구조(helical structure)나 접혀진 도파관 구조(folded-waveguide)와 같이 주기적인 구조가 사용된다. 소자의 작동 주파수가 높아지면 소자를 구성하는 cavity, coupling 구조, waveguide, beam tunnel과 같은 구조물 또한 그에 비례해서 작아져야 하는데, 0.1~1.0 THz 대역에서는 이들의 형상이 보통 수백 μm 의 높이와 매우 높은 고폭비(aspect ratio)를 띄게 된다.

기존의 기계적인 가공기술로는 이러한 수백 μm 에 상당하는 주기적인 3차원 구조물의 제작이 힘들었으나, 최근에는 반도체 가공 기술에 기반한 LIGA (Lithographie, Galvanofornung, Abformung) 및 DRIE (Deep Reactive Ion Etching)와 같은 방법을 통해 이런 구조물의 제작이 가능해졌다^{[10]~[14]}. <그림 1>은 LIGA 및 DRIE 방법을 통해 가공된 수백 μm 높이의 cavity 구조들을 보여준다. 또한, 진공전자소자가 테라헤르츠 대역에서 사용되려면 최종 가공된 구조물의 형상 뿐만 아니라 표면 거칠기 또한 중요해지는데, 표면 전류에 의한 열손실을 줄이기 위해 표면 거칠기가 고려하는 과장에 비해 일정 수준 이하로 유지되어야 한다. LIGA 방법으로 가공된 결과물의 표면 거칠기는 테라헤르츠 대역에서도 적용이 가능함이 검증된 바 있다^[6].

최종 회로는 보통 coupler와 함께 가공되며, 한 예로 0.1 THz 주파수 대역에서 저속파구조로 여러 개의 연결된 공진기를 사용한 후방파발전



(a)

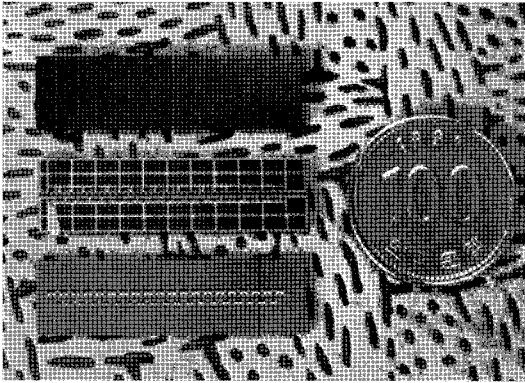


(b)

<그림 1> (a) LIGA 및 (b) DRIE 방법으로 가공된 구리 및 실리콘 구조물

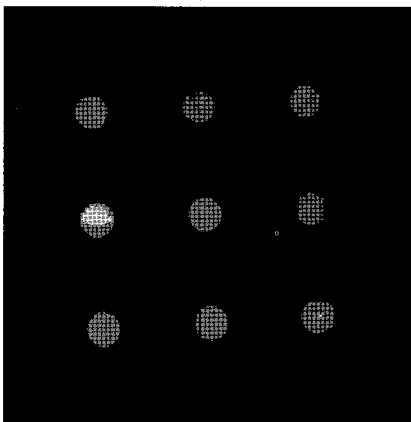
기(CCBWO: coupled-cavity backward-wave oscillator)의 제작된 모습을 <그림 2>에 나타내었다. 3차원 구조의 CCBWO 회로 제작을 위해 3장의 실리콘 웨이퍼를 각각 DRIE 에칭한 후 이들 웨이퍼를 Au-Sn eutectic bonding을 하여 제작하게 되는데, <그림 2>에서 보듯이 DRIE와 eutectic bonding 공정을 적용하여 매우 정밀한 3차원 구조의 테라헤르츠 구조물의 제작이 가능하다.^[16,17]

한편, 체렌코프 방사에 기반한 진공소자의 경우 테라헤르츠 대역에 진입하면 앞서 언급한 회



<그림 2> DRIE와 eutectic bonding을 통해 제작된 0.1THz CCBWO 회로

로의 소형화 외에도 전류밀도 문제가 해결되어야 한다. 작동 주파수가 높아지면 소자의 발진을 일으키기 위해서 요구되는 전자빔의 전류밀도는 거의 제곱에 비례해서 높아지게 되며, 테라헤르츠 대역에서는 수백 A/cm²의 전류밀도가 요구된다.^[3] 따라서, 기존의 널리 사용되는 열음극 전자총 대신에 탄소나노튜브(CNT: carbon nanotube) 등의 전계방출 냉음극을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 냉음극은 집적이 용이해 소자의 출력을 높이기 위해서 <그림 3>과 같



<그림 3> CNT 냉음극의 다중전자빔 방출 이미지

이 여러 개의 전자빔을 사용하는 경우에도 적합하다.

III. 테라헤르츠 포토닉스와의 결합

MEMS가공은 회로의 소형화를 가능케해 체렌코프 방사에 기반한 테라헤르츠 연속광원의 길을 열어주었다. 더 나아가, 새롭게 소개되고 있는 광학 개념의 적용을 통해 전자빔과 회로의 상호작용을 개선시키고자 하는 노력이 계속되고 있으며, 광결정(photonic crystal) 및 플라즈몬 결정(plasmonic crystal) 등이 기존의 공진기, 도파관 및 저속과 구조를 대체해 나가고 있다^{[10]-[13]}.

소형 고효율 연속광원을 구현하는 하나의 방법으로 리플렉스 클라이스트론(reflex klystron)과 같이 그 구조가 간단해서 MEMS가공에 적합한 소자를 기본모드가 아닌 고차모드에서 작동시키는 방법이 있다. 이 경우 고차모드와 상호작용하는 각각의 전자빔을 마치 하나의 개별적인 소자와 같이 생각할 수 있게 된다. 하지만, 고차모드를 기존의 금속 공진기에 여기할 경우 원하지 않는 다른 근접한 모드들이 같이 여기되기 쉽고, 원치 않는 모드들과의 경쟁으로 소자의 효율이 떨어지는 일이 발생하게 된다. 따라서, 고차모드로 소자를 작동시키려고 할 경우 이러한 원치 않는 모드들이 발진되는 것을 막아야 하는데, 이를 위해 기존의 금속 공진기를 광결정 공진기(photonic crystal resonator)로 대체하는 방법이 있다. 이 경우, 광결정 공진기를 설계할 때 밴드갭 안에 애초에 여기하려고 하는 모드만 존재하도록 광결정을 설계하게 된다.^[10,11] <그림 4> (a)는 TM₃₃₀ 모드로 동작하도록 설계된 광결정 공진기에 여기된 전기장의 분포를 보여주며



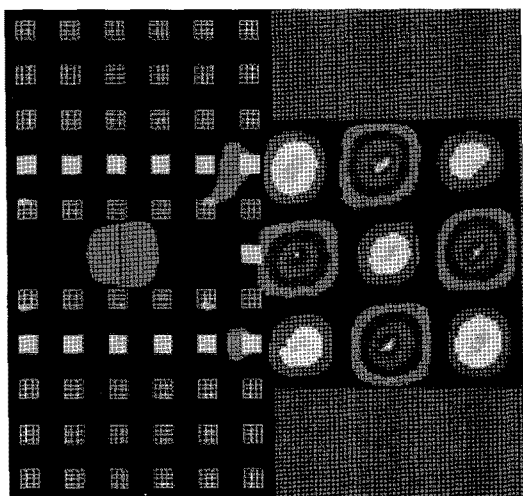
설계한 대로 광결정 공진기가 작동함을 확인할 수 있다. 또한, 광결정 공진기를 사용하면 일반 금속 공진기를 사용하는 경우에 비해 공진기 안에 여가된 모드를 바깥으로 결합(coupling)하는 것이 훨씬 간단해 지는데, <그림 4> (a) 처럼 광결정에 선결함(line defect)을 적용하는 것만으로 출력단으로의 결합이 이뤄지게 된다. <그림 4> (b)는 이 개념을 X-band에서 구현하기 위해

제작된 광결정 리플렉스 클라이스트론의 모습이며, 다중전자빔의 발생을 위해 CNT 냉음극이 적용되었다.

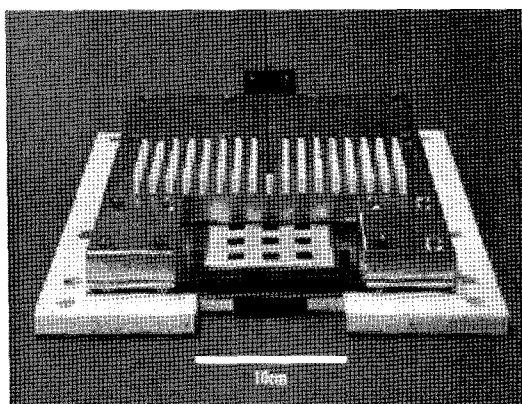
체렌코프 방사에 기반한 소형 진공소자의 경우 전자빔과 회로의 상호작용이 전자빔이 밀폐된 빔터널을 진행하면서 일어나게 된다. 따라서, 테라헤르츠 대역에서 요구하는 고전류밀도의 전자빔이 이러한 빔터널 및 회로에 부딪히지 않으면서 진행할 수 있도록 정교한 자기장 설계가 필요하다. 이에 전자기파 발생을 위해 전자빔과 상호작용하는 회로가 빔터널에서 자유로운 개방형 구조가 그 대안으로 주목된다. 대표적인 예로 회절격자 위를 전자빔과 같은 대전입자가 지날 때 발생하는 스미스-퍼셀 방사를 들 수 있다.

스미스-퍼셀 방사(Smith-Purcell Radiation)는 1953년에 최초로 발견된 이후로 방사 메커니즘이 간단해서 전자기복사 스펙트럼의 거의 전 영역을 커버하는 방사원으로 채택되어왔다.^[14] 최근에 증가하고 있는 테라헤르츠 영역에 대한 관심과 이 영역에서의 주파수 조절이 가능한 초소형 방사원의 부재는 스미스-퍼셀 방사를 이 영역에서의 방사원으로서 부각시키고 있다. 하지만, 방사 메커니즘이 간단하고 전자빔과 상호작용하는 구조가 개방형면서 소형화에 적합하는 등 여러 장점에도 불구하고, 방사가 회절현상에 바탕하고 있기 때문에 그 출력이 낮은 것이 단점으로 지적되어 왔다. 이를 극복하기 위해 공진기, 광결정, 기변조된(pre-modulated) 전자빔, 상대론적 전자빔 등을 사용함으로써 해결하려는 시도가 있어왔다.^{[15]-[18]}

낮은 출력을 극복하기 위한 또 하나의 방법으로 <그림 5>와 같이 두 개의 교차하는 전자빔과 1차원 플라즈몬 결정(plasmonic crystal)을 통한 스미스-퍼셀 방사의 개념이 제안되었다. 이



(a)



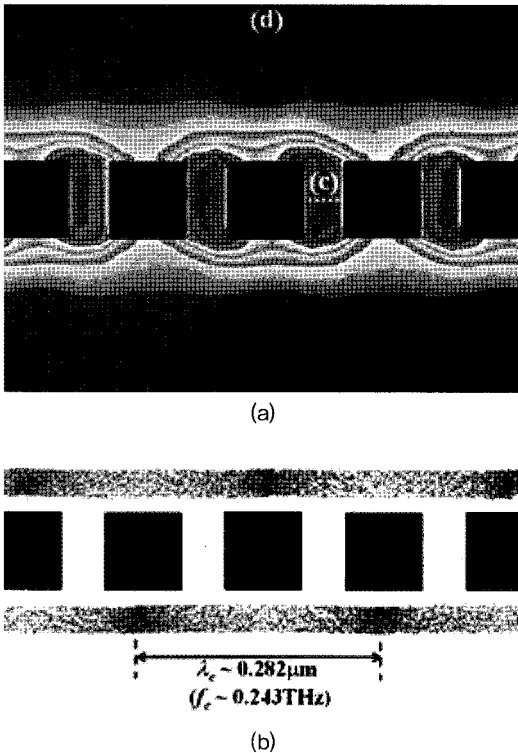
(b)

<그림 4> (a) 광결정 공진기에 형성된 TM330 모드의 전기장 분포 (b) X-band 광결정 리플렉스 클라이스트론

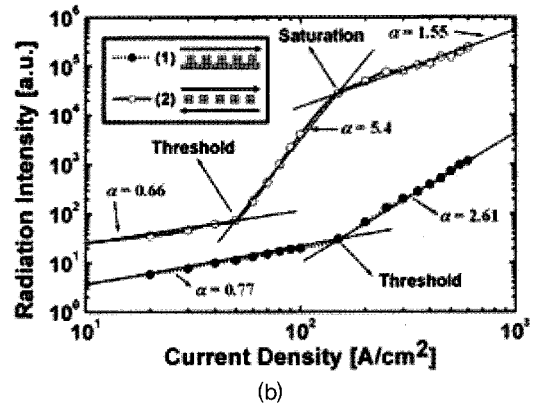
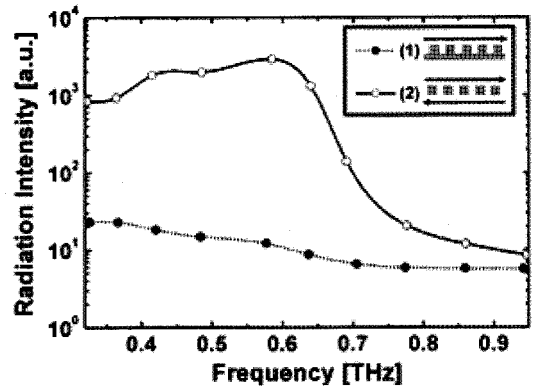
는 교차해서 진행되는 두 개의 전자빔으로 이루어진 발진기가 그 둘 사이의 피드백을 통해 소자의 발진에 필요한 최소발진전류를 낮출 수 있다는 연구결과^[19]와 테라헤르츠 대역에서도 광파 영역의 표면 플라즈몬과 같은 강한 근접장을 띄는 유효 플라즈몬(effective plasmon)^[20]이라는 개념을 적용한 것이다. 기존의 스미스-퍼셀 회절격자를 사각형 구멍이 주기적으로 배열된 1차원 플라즈몬 결정으로 대체하고 여기에 교차 전자빔을 적용하게 되면 다음의 두 가지 효과를 기대할 수 있다. 첫째, 사각형 구멍이 주기적으로 배열되었을 때 생기는 유효 플라즈몬(effective plasmon)의 강한 근접장<그림 5> (a)과 전자빔의 상호작용에 의해 고출력 발진에 필요한 전자

빔 뭉치(bunch)가 <그림 5> (b)와 같이 형성된다. 둘째, 생성된 유효 플라즈몬은 플라즈몬 결정 위 아래의 교차 전자빔을 결합(coupling)하는 역할을 해서 피드백을 제공한다.^[12,13]

이 같이 플라즈몬 결정과 교차 전자빔을 사용할 경우 스미스-퍼셀 방사의 세기를 일반적인 회절격자를 사용하는 경우와 시뮬레이션(MAGIC3D)을 통해 비교한 결과를 <그림 6> (a)에 보였는데, 플라즈몬 결정과 교차 전자빔을 사용하는 경우 그 세기가 약 100배 이상 강화되는 것을 볼 수 있다.^[12] 또한, <그림 5> (b)에서와 같이 전



<그림 5> (a) 플라즈몬 결정 근처에 형성된 강력한 근접장 (b) 교차 전자빔에 형성된 전자빔 뭉치



<그림 6> 일반 회절격자와 1차원 플라즈몬 결정에 의한 스미스-퍼셀 방사의 (a) 출력 비교 (b) 발진시작전류 비교

자빔 뭉치가 형성되면 스미스-퍼셀 방사가 자발 방출(spontaneous emission)에서 유도방출(stimulated emission)로 전이되어 그 세기가 현저히 증가하게 되는데, 이 전이가 일어나는 문턱전류값을 발진시작전류(start-oscillation current)라고 한다. 플라즈몬 결정과 교차 전자빔의 경우 이 값이 일반 회절격자의 경우와 비교했을 때 <그림 6> (b)와 같이 상당히 감소하게 됨을 알 수 있으며, 이는 테라헤르츠 대역에서 진공전자 소자가 겪는 전자빔의 전류밀도 문제 측면에서 상당한 장점이 된다.

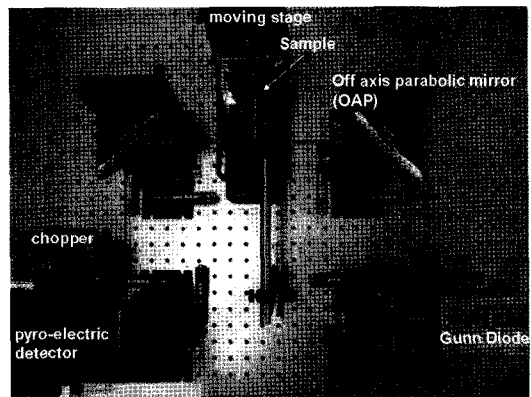
IV. CW 테라헤르츠파 이미징

테라헤르츠파를 이용한 이미징은 펨토초 레이저와 광전도 안테나(photoconductive antenna)를 이용한 TDS (Time-domain spectroscopy)와^[21] 나노초 레이저를 이용하여 비선형 광학으로 발생시킨 TPO(Terahertz parametric oscillator)^[22] 등의 펄스 작동과, BWO(backward-wave oscillator)와^[23] 같은 진공 디바이스 또는 Gunn diode 및 양자폭포레이저를 이용한 CW(continuous wave) 작동의^[24] 두가지로 크게 구분할 수 있다. 이 중에서 CW 작동은 pulse 에 비해 고풍력 테라헤르츠 광을 안정적으로 얻을 수 있고 복잡한 광학 시스템 없이 비교적 간단하게 소형으로 이미징 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있다. 이러한 CW 광원은 보통 0.1 ~ 1.5 THz 대역까지 다양하게 개발되어있으며, 일반적으로 CW 광원의 출력은 주파수가 커지면서 급격히 감소하게 된다. CW 광원을 사용한 테라헤르츠 이미징 시스템은 거의 대동소이하며 여기서는 Gunn Diode를 사용한 테라헤르츠 이미징 시스템을 예로 소개

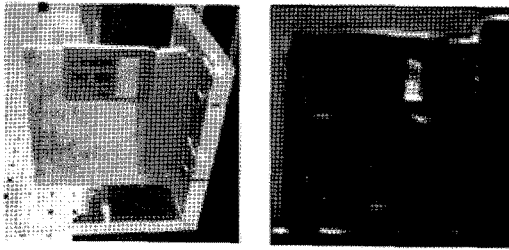
하겠다.

<그림 7>은 0.2 THz 광원을 사용한 테라헤르츠 투과이미징 시스템의 모습이며, 보이는 것처럼 펄스 방식에 비해 차지하는 면적이 그리 크지 않다. 광원에서 방사된 테라헤르츠파는 파라볼라 거울을 통해 XY stage에 고정된 샘플에 조사되며 그 투과 또는 흡수된 양을 schottky diode detector로 검출한다. 또한, 보통 lock-in amplifier를 사용하여 S/N 비를 개선하게 된다. 최종 이미지는 stage를 XY 축으로 스캔하면서 테라헤르츠 광의 투과 및 흡수 정도의 데이터를 취하여 얻게 된다.

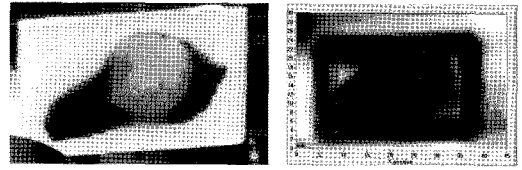
<그림 8>은 소개한 테라헤르츠파 이미징 시스템을 이용하여 얻은 3.5 인치 플로피 디스켓의 테라헤르츠 투과 이미지(110x110 pixel)이다. 흔히 쓰이는 3.5 인치 디스켓은 외부에 플라스틱이 있고 내부에 스프링과 정보를 기억시키는 자기물질이 입혀 있는 판이 있다. 측정에 사용한 3.5인치 플로피 디스켓을 분해한 내부 모습과 비교해 보았을 때, 테라헤르츠 이미지로부터 디스켓 외곽, 금속부분, 중심의 자기 디스크 부분과 디스켓 상하면의 접합 부분이 선명하게 나타남



<그림 7> Gunn diode를 이용한 테라헤르츠파 이미징 시스템



(a)



〈그림 9〉 종양이 이식된 쥐의 상피세포의 육안 이미지와 0.2THz 이미지



투명필름의 접혀진 부분

(b)

〈그림 8〉 3.5인치 플로피 디스켓의 테라헤르츠 투과 영상이미지 (0.2THz)

을 볼 수 있다. 또한 내부에 방사 방향으로 선이 두개 있는 것을 볼 수 있는데 이는 <그림 8> (b)에서 보이는 플라스틱 조각이 접혀진 부분이다. 표면에서의 반사 및 시스템 상에서 일어나는 공진 그리고 외부 환경변화와 스캔 작동 시 발생할 수 있는 오차 등등을 고려한 측정을 통해 이미지 개선을 할 수 있다.

한편, 암세포나 종양세포를 주변세포와 육안으로 구별할 수 없을 경우에도, 암세포의 수분 함량이 주변세포와 다르므로 암세포를 테라헤르츠 이미지로 구분하는 것이 가능하다. <그림 9>에 종양이 이식된 쥐의 상피세포의 육안 이미지와

테라헤르츠 이미지를 비교해 보았다. 이 경우, 샘플은 파라핀 처리가 된 상태인데, 파라핀은 테라헤르츠파에 거의 투명하며, 세포는 이미 포르말린에 담가놓아 고정되었으며 수분이 제거된 상태여서 테라헤르츠 이미지를 얻어내는 것이 가능하다.

이와 같이 테라헤르츠 광은 비파괴 영상이미지에서 매우 훌륭하게 쓰일 수 있다. 이러한 연구를 바탕으로 테라헤르츠파를 통해 의료 영상 및 다양한 물질 분석 그리고 분광분석까지 그 응용 범위를 확대할 수 있을 것이다.

V. 결론

본 고에서는 소형 고출력 테라헤르츠 연속광원으로써 진공전자소자의 개발 및 응용 현황에 대해 국내 사례를 중심으로 알아보았다. 이러한 고출력 연속 테라헤르츠 광원의 개발은 기존의 테라헤르츠파 응용과 더불어 물질 혹은 생체와의 비선형 상호작용 연구나 생체의 안정성 검증, 또는 실시간 이미징 기술 등의 연구에 유용하리라 기대된다.

***** 참고문헌 *****

- [1] Carlo Sirtori, "Bridge for the terahertz gap," *Nature* 417, pp.132-133, May, 2002.
- [2] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nature photonics* 1, pp.97-105, Feb., 2007.
- [3] S.T. Han, S.G. Jeon, Y.M. Shin, K.H. Jang, J.K. So, J.H. Kim, S.S. Chang, and G.S. Park, "Experimental Investigations on Miniaturized High Frequency Vacuum Electron Devices," *IEEE Trans. Plasma Sci.* 33, pp.679-684, Apr., 2005.
- [4] S.T.Han, K.H.Jang, J.K.So, J.I.Kim, Y.M.Shin, N.M. Ryskin, S.S.Chang, and G.S.Park, "Low-Voltage Operation of Ka-Band Folded Waveguide Traveling-Wave Tube," *IEEE Trans. Plas. Sci.*, Vol.32, pp.60-66, Feb., 2004.
- [5] Y. M. Shin, et al., "Novel coupled-cavity TWT structure using two-step LIGA fabrication," *IEEE Trans. Plas. Sci.* 31, pp.1317-1324, Dec., 2003.
- [6] Y. M. Shin, J. K. So, J. H. Kim, S. T. Han, K. H. Jang, S. S. Chang, and G. S. Park, "Microfabrication of millimeter wave vacuum electron devices by two-step deep-etch x-ray lithography," *Appl. Phys. Lett.*, 88, 091916 Mar., 2006.
- [7] P. A. George, C. Manolatu, F. Rana, A. L. Bingham and D.I R. Grischkowsky, "Integrated waveguide-coupled terahertz microcavity resonators," *Appl. Phys. Lett.* 91, 191122, Nov., 2007.
- [8] C. H. Tsau, S. M. Spearing, and M. A. Schmidt, "Fabrication of wafer-level thermocompression bonds," *J. Microelectromech. Syst.* 11, pp.641-647, Dec., 2002.
- [9] Q. Y. Tong, Q. Gan, G. Hudson, G. Fountain, P. Enquist, R. Scholz, and U. Gosele, "Low-temperature hydrophobic silicon wafer bonding," *Appl. Phys. Lett.* 83, pp.4767-4769, Dec., 2003.
- [10] S. G. Jeon, Y. M. Shin, K. H. Jang, S. T. Han, J. K. So and G. S. Park, "High Order Mode Formation of Externally Coupled Hybrid Photonic-Band-Gap (PBG) Cavity," *Appl. Phys. Lett.* 90, 021112, Jan., 2007.
- [11] Kyu-Ha Jang, Seok-Gy Jeon, Jung-Il Kim, Jong-Hyo Won, Jin-Kyu So, Seung-Ho Bak, Anurag Srivastava, Sun-Shin Jung, and Gun-Sik Park, "High order mode oscillation in a terahertz photonic-band-gap multibeam reflex klystron," *Appl. Phys. Lett.* 93, 211104 Nov., 2008.
- [12] Young-Min Shin, Jin-Kyu So, Kyu-Ha Jang, Jong-Hyo Won, Jung-Il Kim, Anurag Srivastava, and Gun-Sik Park, "Superradiant Terahertz Smith-Purcell Radiation from Surface-Plasmon Excited by Counter-Streaming Electron Beams," *Appl. Phys. Lett.* 90, 031502, Jan., 2007.
- [13] Young-Min Shin, Jin-Kyu So, Kyu-Ha Jang, Jong-Hyo Won, Anurag Srivastava, and Gun-Sik Park, "Evanescent Tunneling of an Effective Surface Plasmon Excited

- by Convection Electrons,” *Phys. Rev. Lett.* 99, 147402, Oct., 2007.
- [14] S. J. Smith and E. M. Purcell, “Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating,” *Phys. Rev.* 92, 1069, Nov., 1953.
- [15] Yu. A. Grishin, M. R. Fuchs, A. Schnegg, A. A. Dubinskii, B. S. Dumesh, F. S. Rusin, V. L. Bratman, and K. Mobius, “Pulsed Orotron—A new microwave source for submillimeter pulse high-field electron paramagnetic resonance spectroscopy,” *Rev. Sci. Instrum.* 75, 2926, Sep., 2004.
- [16] S. Yamaguti, J. Inoue, O. Haeberle, and K. Ohtaka, “Photonic crystals versus diffraction gratings in Smith-Purcell radiation,” *Phys. Rev. B* 66, 085209, Nov., 2002.
- [17] S. E. Korbly, A. S. Kesar, J. R. Sirigiri, and R. J. Temkin, “Observation of Frequency-Locked Coherent Terahertz Smith-Purcell Radiation”, *Phys. Rev. Lett.* 94, 054803, Feb., 2005.
- [18] G. Doucas, J. H. Mulvey, M. Omori, J. Walsh, and M. F. Kimmitt, “First observation of Smith-Purcell radiation from relativistic electrons,” *Phys. Rev. Lett.* 69, 1761, Sep., 1992
- [19] Y. M. Shin, N. M. Ryskin, J. H. Won, S. T. Han, and G. S. Park, “Theoretical analysis of cross-talking signals between counter-streaming electron beams in a vacuum tube oscillator,” *Phys. Plasmas* 13, 033104, Mar., 2006.
- [20] J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, “Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces,” *Science* 305, 847, Aug., 2004.
- [21] K. L. Nguyen, T. Friscic, G. M. Day, L. F. Gladden, and W. Jones, “Terahertz time-domain spectroscopy and the quantitative monitoring of mechanochemical cocystal formation,” *Nature Materials* 6, pp.206-209, Mar., 2007.
- [22] K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata, and H. Ito, “Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability,” *Appl. Phys. Lett.* 80, pp.195-197, Jan., 2002.
- [23] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, “Terahertz Imaging System Based on a Backward-Wave Oscillator,” *Appl. Optics*, 43, pp.5637-5646, Oct., 2004.
- [24] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. I. Lin, J. S. Hwang, J. Xu, and X. C. Zhang, “Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications,” *Appl. Phys. Lett.* 86, 054105 Jan., 2005.

저자소개

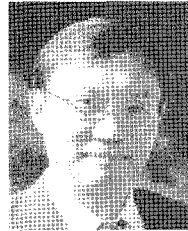


소진규

2001년 2월 한국과학기술원 물리학과(이학사)
 2003년 2월 서울대학교 물리학과(이학석사)
 2009년 2월 서울대학교 물리천문학부(이학박사)

주관심 분야 : THz generation using metamaterial

저자소개



박건식

1978년 2월 서울대학교 물리교육과 (이학사)
 1989년 2월 Univ. of Maryland 물리학 (이학석사)
 1989년 2월 Univ. of Maryland 물리학 (이학박사)
 2004년 10월~현재 서울대학교 물리천문학부 교수
 1987년 5월~1995년 8월 Naval Research Laboratory
 Research Scientist
 1984년 1월~1987년 4월 University of Maryland
 Teaching Assistant

주관심 분야 : MEMS-based vacuum electron devices, terahertz metamaterial, surface plasmon, photonic crystal, terahertz imaging, thermionic and field emission electrons



장규하

2001년 2월 건국대학교 물리학과(이학사)
 2009년 2월 서울대학교 물리천문학부(이학박사)

주관심 분야 : THz generation using high-order mode photonic crystal cavity and cold cathode