

최근까지 개발된 THz 파를 발생시키는 방법으로는 free electron laser, Gunn oscillators, photoconductive antenna, electro-optic crystal, air plasma 등을 이용하는 방법이 있다. 이중 photoconductive antenna에 의한 THz 파 발생이 가장 큰 THz power를 발생시킨다. 그리고 발생된 THz 파를 검출하는 방법으로는 bolometer, pyroelectric detector, photoconductive antenna, electro-optic crystal, air plasma 등을 이용하는 방법이 있으며, 이중 photoconductive antenna에 의한 THz 검출이 가장 좋은 민감도(sensitivity)를 가지고 있다. 따라서 이러한 장점으로 현시점에서도 THz를 발생시키고 검출하는 방법으로 photoconductive antenna를 널리 사용하고 있다. Photoconductive antenna는 미국의 Grischkowsky 교수에 의해 최초로 제안되고 실현되어 Grischkowsky antenna라고 불리어지기도 한다. 1986년

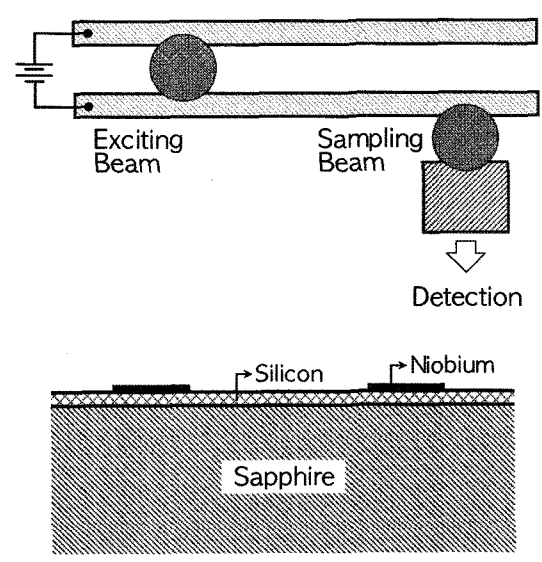


그림 1. Top and cross-sectional view of the transmission line geometry (1)

특집 ─ 테라헤르츠파 발생기술

Photoconductive Antenna

전태인*

silicon on sapphire (SOS) 기판위에 금속선으로 이루어진 THz photoconductive 스위치를 이용하여 그림 1과 같이 THz를 발생시키고 검출한 이래(1) 여러 종류의 THz용 기판과 photoconductive antenna가 소개 되었다.

본 기고에서는 photoconductive antenna와 관계된 1) 기판(substrate) 2) THz 파의 발생(generation) 3) THz 파의 검출(detection) 4) THz 파의 측정(measurement) 순으로 소개 하고자 한다.

1) Photoconductive antenna 기판

먼저 photoconductive antenna가 있는 THz용 transmitter 및 receiver chip을 제작하기 위해 특성에 맞는 기판을 선택 하여야 한다. 일반적으로 transmitter용 기판은 펨토초 레이저 펄스(femtosecond laser pulse)에 의해 발생된 photo 캐리어(carrier)의 속도가 빠른 즉, 이동도(mobility)가 높은 기판을 사용하여야 아주 짧은 THz pulse을 만들 수 있으며 receiver용 기판은 photoconductive dipole antenna의 스위치 응답속도를 높이기 위해 캐리어 수명(lifetime)이 짧은 기판을 사용하여야 한다.

지금까지, 이러한 기판의 물질들은 아래 테이블과 같은

* 한국해양대학교 전기전자공학부

Table 1. Characteristics of ultrafast photoconductive materials (2)

Photoconductive materials	Carrier lifetime (ps)	Mobility (cm ² /V · s)	Resistivity (Ω · cm) (Breakdown field, V/cm)	Band gap (eV at R. T.)
Cr-doped Si-GaAs	50-100.0	≈ 1000	10 ⁷	1.43
LT-GaAs	0.3	150-200	10 ⁶ (5×10 ⁶)	1.43
Si-InP	50-100.0	≈ 1000	4×10 ⁷	1.34
Ion-implanted InP	2- 4.0	200	>10 ⁶	1.34
RD-SOS	0.6	30		1.10
Amorphous Si	0.8- 20.0	1	10 ⁷	1.10
MOCVD CdTe	0.5	180		1.49
LT-In _{0.52} Al _{0.48} AS	0.4	5		1.45
Ion-implanted Ge	0.6	100		0.66

것들이 사용되어 왔으며, 이러한 것들 가운데, transmitter용 기판은 Si-GaAs 그리고 receiver용 기판은 RD-SOS(Radiation Damaged-Silicon On Sapphire)와 LT-GaAs(Low-Temperature GaAs)이 가장 많이 사용되고 있다.

일반적으로 RD-SOS는 그림 1과 같이 320 μm 두께의 sapphire 기판 위에 1 μm 두께의 50Ω · cm(100) silicon 박막(film)으로 되어 있으며 argon, silicon, oxygen ion 등

을 주입(implanting)하여 제작 하게 된다. 앞서 주입한 이온에 의한 이온들의 공간적 불균형(dislocation)은 캐리어 수명을 짧게 형성 하는데 영향을 미치게 된다. 따라서 RD-SOS의 캐리어 수명은 주입한 이온의 양에 상당히 의존하게 되며, 아래 그림2는 pump-and-probe 방법으로 측정된, 이온 주입 양에 따른 RD-SOS의 응답 변화율 즉 캐리어 수명과 이온 주입 양과의 관계를 보여준다. 캐리어의 평균수명은 O⁺ 이온의 농도가 약 2x10¹⁴/cm²일 때

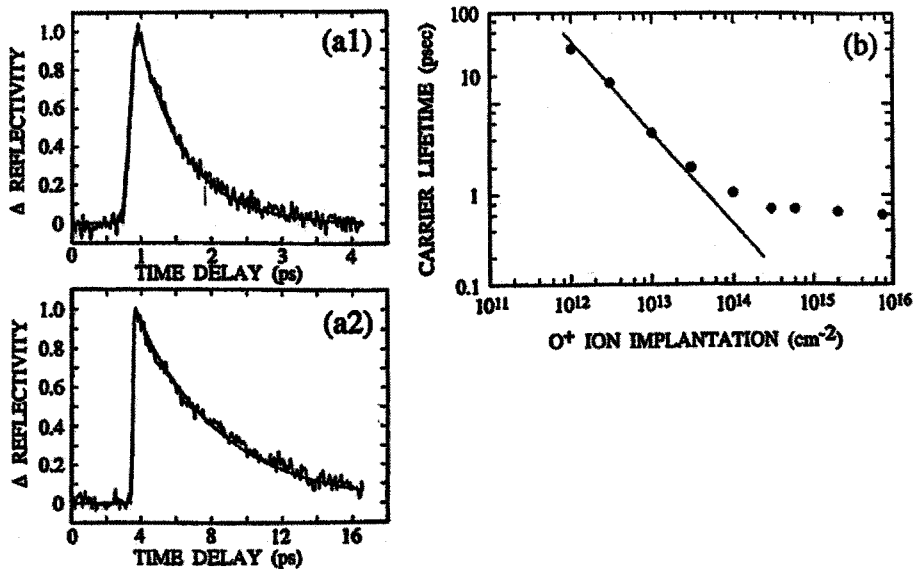
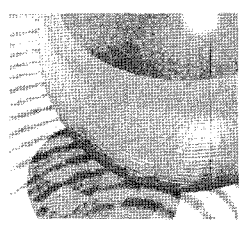


그림 2. (a) measured change in reflectivity for RD-SOS samples ion implanted at doses of 2×10¹⁵cm⁻² (a1) and 1×10¹³ cm⁻² (a2). Smooth curves are fits obtained using a 140 fs instrument response convolution with 0.65ps (a1) and 4.8ps (a2) exponential decays, (b) Carrier lifetimes vs. ion-implantation dose. Lifetimes are derived from individual reflectivity data at each dose. The solid line shown has a slope of unity (3)



포화됨을 알 수 있다.

LT-GaAs는 향상된 sub-피코초(picosecond, pico=10⁻¹²)의 캐리어 수명과 상대적으로 높은 캐리어 이동도, 높은 파괴 전압 특성을 가짐에 따라 초고속 광전자 응용(ultrafast optoelectronic applications)에 광범위하게 연구되어 왔다. LT-GaAs의 특성은 MBE 과정 중의 성장 조건(growth condition)과 후-성장 어닐링(post-growth annealing)에 의존한다. 성장 단계 중, 과잉의 아세닉(As)은 AsGa의 높은 밀도(10¹⁷~10²⁰cm⁻³)의 포인트 결점(point defects)을 형성하게 되며 이러한 결점은 중간 밴드 갭(midgap band)을 형성하여 캐리어 수명을 단축시키는 비방사 재결합 밴드갭 센터(nonradiative recombination centers)로 행동하게 된다. 성장 온도가 더 낮으면, 더 많은 결점이 형성되어 캐리어 수명은 더 짧아지게 된다. 이때, 저항을 증가시키기 위해서 LT-GaAs 샘플을 그 자리에서(in situ) 어닐링하게 된다. 높은 압력의 아세닉 상태에서 600 °C 보다 낮은 온도에서의 어닐링은 과잉의 아세닉 축진체(As-rich precipitates)가 형성된다. 비록 성장한 LT-GaAs는 실내 온도(room temperature)에서 상대적으로 도전성($\rho \approx 10 \Omega \cdot \text{cm}$)을 띠지만, 어닐링된 LT-GaAs는 반부도체(semi-insulating, $\rho \approx 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$)의 성질을 가지게 된다. 높은 밀도의 결점과 아세닉 축진체에도 불구하고, 어닐링된 LT-GaAs의 홀 이동도(Hall mobility) ($\mu = 1000 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)는 실내 온도에서 짧은 캐리어 수명을 유지하면서 상대적으로 높다. 그 결과 1.5 μm 두께의 LT-GaAs 박막(film)을 400 μm 두께의 반부도체 GaAs 기판 위에서 성장시킨다. 아래 왼쪽 그림 3은 다양한 기판 온도에서 성장하고 그 자리에서(in situ) 어닐링한 LT-GaAs의 시간 영역에서의 반사 변화를 나타낸 그래프이고, 오른쪽 그림은 캐리어 수명과 성장 온도 간의 관계를 보여준다. 성장 온도가 낮을수록, 캐리어 수명이 짧아짐을 알 수 있다.

일반적으로 receiver chip에 사용되는 RD-SOS 기판은 넓은 THz spectrum 대역폭(bandwidth)을 가지며 LT-GaAs 기판은 intensity가 큰 THz pulse를 얻을 수 있다.

2) Photoconductive antenna에 의한 THz 발생

THz transmitter 시스템의 물리적인 특성은 헤르짜인

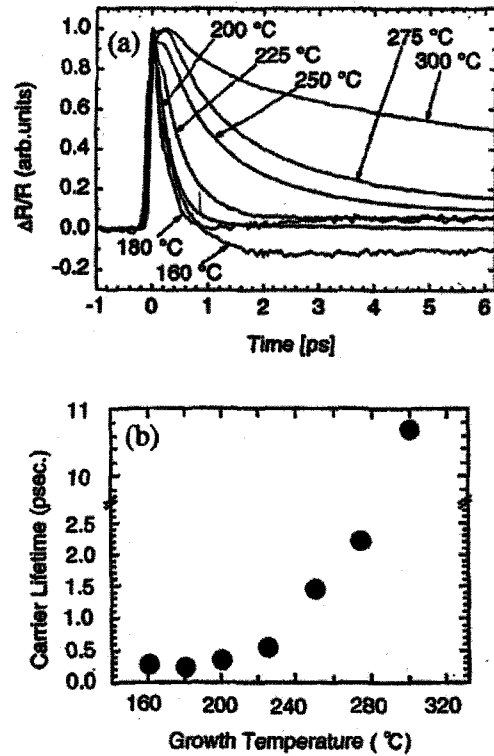


그림 3. (a) Time-resolved reflectance changes for LT-GaAs grown at temperatures 160 °C, 180 °C, 200 °C, 225 °C, 275 °C and 300 °C measured at $\lambda=835\text{nm}$. The peak values are normalized to unity. The inversion between the 160 °C and 180 °C curves is attributed to the crystallinity of the film. Each film above 180 °C is single-crystalline-like and the film of 160 °C is polycrystalline like, (b) Growth-temperature dependence of the carrier lifetime for LT-GaAs layers (4)

다이폴(Hertzian dipole)로서 행동하는 그림 4에서 보인 photoconductive antenna에 기초를 두고 설명된다. Photoconductive antenna 갭 사이에 반도체의 밴드 갭(실온에서 GaAs의 $E_g=1.43\text{eV}$)보다 더 큰 에너지를 가진 펨토초의 광 펄스로 펌핑 할 때, 자유 전자(홀)가 전도대(가전도대)에서 발생된다. 이 때, 전압 V가 두 전극 패드에 연결되어 있고, 가해진 전압에 의해 형성되는 바이어스(bias) 필드에 의해 광 펄스가 존재하는 동안 캐리어들은 동위상으로 가속되어 지고, 캐리어 수명에 의해서 결정되는 시정수(time constant)에 따라 감소되어 진다. 그 결과, photoconductive antenna에서 피코초 보다 더 짧은 시간 내에 펄스 형태의 광전류가 발생하게 되어, 피코초 보다 더 짧은 전자기 과도(EM transient), 즉 THz 펄스가 방사되게 되는 것이다. 자유 공간에서의 기본적인 헤르짜인 다이폴 안테나는(Hertzian dipole antenna) 거리

Photoconductive Antenna

r(방사 파장보다 더 먼거리)과 시간 t에서의 방사된 전계 필드,

$$E(r,t) = \frac{l_e}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \frac{\partial J(t)}{\partial t} \sin\theta \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t}$$

와 같이 표현된다. (이 때, J(t)는 다이폴에서의 전류, l_e는 다이폴의 유효(effective)길이, ε₀는 진공의 유전상수, c는 진공에서의 빛의 속도, θ는 다이폴 방향으로 부터의 각도이다.)

위 식에서 방사 크기는 과도 광전류(transient photocurrent)의 시간 변화율, 과 유효 안테나 길이 에 비례하게 된다. 광전류 밀도는(photo current density)는

$$j(t) \propto I(t) \otimes [n(t)qv(t)]$$

와 같이 표현된다. (⊗는 콘볼루션 곱(convolution product)을 표시하고 I(t)는 광 세기 프로파일(optical intensity profile)이며 q, n(t), m, v(t)는 광 캐리어의 전하, 밀도, 속도이다.) 반도체에서 광에 의해 발생된 자유 전자의 동역학(dynamics)은 고전적 Drude 모델(classical Drude model)에 의해서 잘 설명되어 진다. 이 모델에 따르면, 자유 캐리어(free carriers)의 평균 속도는 미분 방정식, $\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{\tau} + \frac{q}{m} E(t)$ 에 따르며, 이 때, τ는 운동량 완화 시간(momentum relaxation time), m은 캐리어의 유효 질량이다. 전류 밀도 n(t)qv(t)는 PC 안테나의 임펄스 응답(impulse response)으로 나타내며, 따라서 광학적 펄핑의 델타 함수처럼 반응하게 된다.

아래 그림 5는 방사체(emitter)에서의 광전류 밀도와 방사와 관련된 THz far 필드의 전형적인 시간에 따른 행동

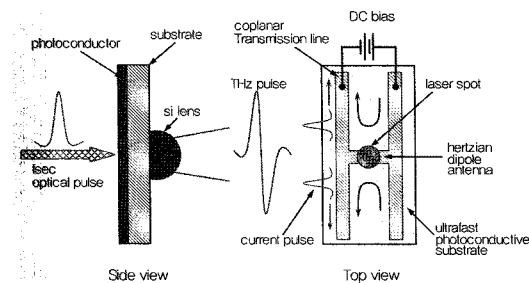


그림 4. Standard THz-pulse generation from a PC antenna pumped with a femtosecond optical pulse. Propagation of current pulses along the coplanar transmission line as shown in the top view (5)

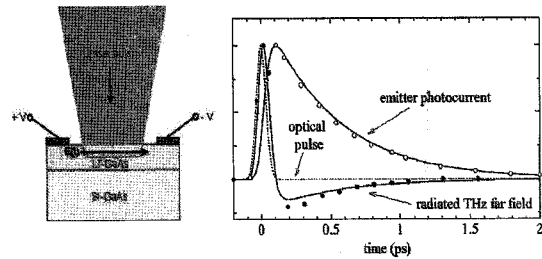


그림 5. Calculated photocurrent in the emitter and amplitude of the radiated field vs. time. The temporal shape of the optical pulse is drawn as a dotted line (6)

을 보여준다. 광 펄스의 모양은 가우시안으로 볼 수 있으며, 발생된 THz pulse는 기판 쪽으로 부터 방사된다. 안테나 이론에 따라, 유전 물질의 표면에 위치하는 다이폴 안테나는 공기 중에서 보다 대략, $\frac{\epsilon^{3/2}}{2}$ 배 더 많은 힘(power)으로 방사된다. (ε는 기판의 비유전율)

1991년 dipole antenna 구조의 THz transmitter와 달리 coplanar transmission line은 라인에 60V DC bias를 인가 한 후 양극(positive) line의 경계면에 펨토초 laser 빔을 인가하여 THz pulse의 크기를 약 4배 그리고 spectrum bandwidth가 약간 개선된 THz pulse를 발생시켰다 [7]. 이는 dipole antenna의 단락을 방지하기 위해 10V 미만의 전압을 인가해야만 하는 것과 달리 멀리 떨어진 coplanar transmission line에 높은 전압을 인가하여 더 큰 전기장을 형성 할 수 있다. 그림 6은 80 μm의 간격을 가진 coplanar transmission line에 60V DC 전압을 인가 한 경우 발생된 THz 신호의 크기를 laser beam의 입사 위치에 따라 표시한 그림이다 [8]. 그림과 같이 양극의 transmission line의 경계 부분 근처에서 아주 큰 THz 신호가 존재함을 알 수 있는데 이는 그림 6과 같이 강력한 전기장이 존재 하여 여기된 photo 캐리어를 보다 빨리 가속 시킬 수 있기 때문이다. 이러한 구조의 THz transmitter는 오늘날 널리 사용되고 있다.

3) Photoconductive antenna에 의한 THz 검출

THz 수신부(receiver)인 경우는 두 전극 패드에 transmitter의 전압 V 대신, 전류 증폭기가 연결되어 있다. 앞서 설명한 바와 같이 photoconductive antenna 기판의 캐리어 수명은 THz 펄스 보다 더 짧다. 따라서 펨토

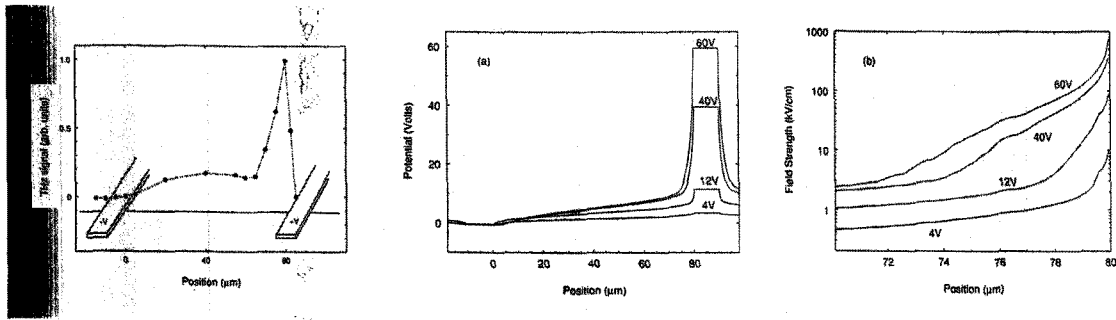
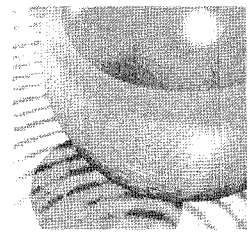


그림 6. Measured THz signal as a function of illumination position for an electrode bias of 67 V. (a) Potential distribution, (b) Electric field near the anode (8)

초의 레이저 펄스는 THz 펄스의 파형을 샘플링 (sampling)하는 샘플링 게이트로서 동작한다. 이를 photoconductive antenna 샘플링이라고 한다. THz 방사체와 같이 광 펄스가 입사되는 동안 캐리어가 여기 되고, 이 때 시간 영역에서 전계를 가지는 THz pulse가 다이폴 안테나 갭에 입사되어 이 전계에 의해서 캐리어들이 가속되어지고, 이것은 외부 회로에서 측정할 수 있는 전류 신호를 가지게 된다.

그림 7은 photoconductivity antenna를 이용한 THz system 그림이다. 수신부의 dipole antenna에 입사되는 펄트초 레이저 펄스에 의해 생성된 캐리어는 dipole

antenna를 도통(short)시켜 THz pulse에 의해 생성된 전류를 흐르게 한다. 하지만 발생된 캐리어의 수명이 아주 짧아 도통된 dipole antenna는 다시 단락(open) 된다. 이것은 그림 7과 같이 dipole antenna가 마치 레이저 펄스에 의해 on 과 off가 되는 스위치 역할을 하게 된다. 따라서 laser beam이 진행하는 경로의 일부분을 변화 시켜 dipole antenna에 도달하는 레이저 펄스와 THz pulse 사이에 시간차를 두어 THz pulse의 전 영역에 해당하는 전류를 그림 8과 같이 sampling 방식으로 측정할 수 있다.

4) Photoconductivity dipole antenna 길이에 따른 THz pulse의 측정

그림 9와 같이 transmitter chip은 Si-GaAs 기판위에 Ohmic 접촉을 위해 100 nm 와 500 nm 두께의 티타늄 금속과 알루미늄 금속으로 증착된 transmission line을 사용하였으며 각각의 line간격은 80 μm 그리고 한 line의 폭은 10 μm 이다 (SI-GaAs 10-80-10). Receiver chip은 RD-SOS chip을 사용하여 그림 9와 같이 dipole antenna 구조의 chip을 사용하였다. Antenna 사이의 간격은 5 μm 으로 고정하고 line의 폭은 5 μm 또는 10 μm 이며 두 line 사이의 간격(dipole 의 길이)은 200 μm , 30 μm , 10 μm 로 달리 하여 측정된 THz pulse 및 그 spectrum은 아래 그림 10에 각각 나타나 있다. 그림 10(a)는 SOS 기판에 폭 10 μm , line 사이의 간격이 200 μm 인 dipole antenna를 transmitter chip (SOS 10-200-10) 으로 사용하였으며 receiver chip은 같은 구조의 RD-SOS chip을 (RS-SOS 10-200-10) 사용하였다. 시간 영역에서의 THz pulse는 아주 broad 하며 spectrum의 대역폭은 약 0.5 THz로 저

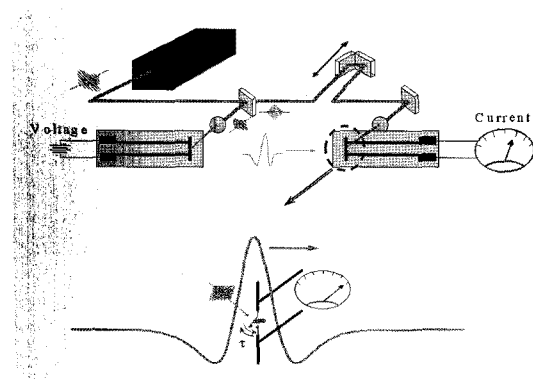


그림 7. THz system and photoconductive switch

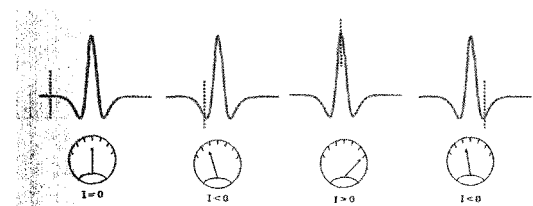


그림 8. THz sampling method

Photoconductive Antenna

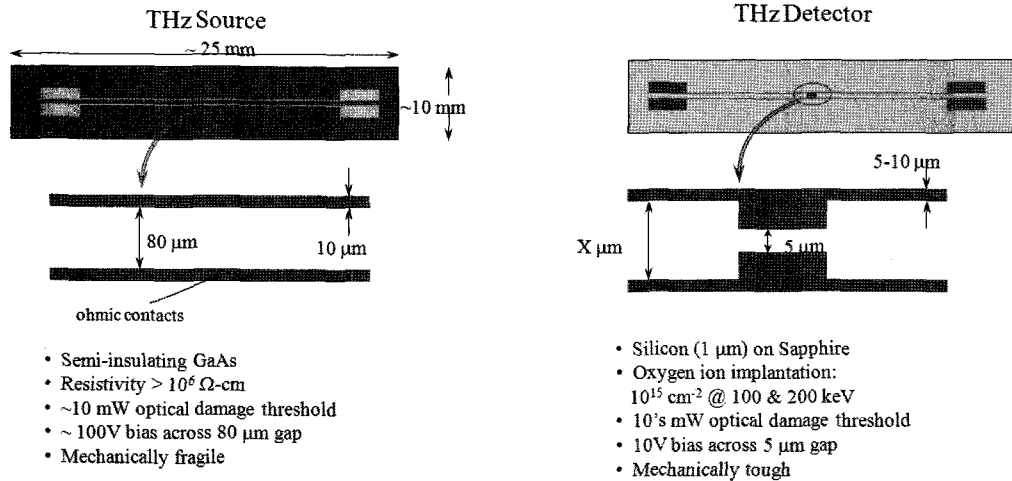


그림 9. THz transmitter(source) chip and THz receiver(detector) chip with dipole antenna

주파 영역의 spectrum 특성을 가진다. 그림 10(b)의 transmitter chip은 SI-GaAs 기판에 폭 10 μm, line 사이의 간격 80 μm인 coplanar transmission line을 (SI-GaAs 10-80-10) 사용하였으며 receiver chip은 RD-SOS 기판에 폭 10 μm, line 사이의 간격이 30 μm인 dipole antenna를 (RD-SOS 10-30-10) 사용하였다. Spectrum 대역폭은 약 3.5 THz까지 확대되었음을 알 수 있다. 마지막으로 그림 10(c)는 그림 10(b)의 transmitter chip과 같

으며 receiver chip은 RD-SOS 기판에 폭 5 μm, line 사이의 간격 10 μm인 dipole antenna를 (RD-SOS 5-10-5) 사용하였다. 이때 측정된 대역폭은 약 4.5 THz까지 확대되었음을 확인 할 수 있다. 그림에서 와 같이 dipole antenna의 길이가 길수록 장파장의 THz pulse 성분을 검출 할 수 있으며 dipole antenna의 길이가 짧을수록 단파장의 THz pulse를 측정하여 넓은 THz 대역폭을 가진 THz spectrum을 얻을 수 있다.

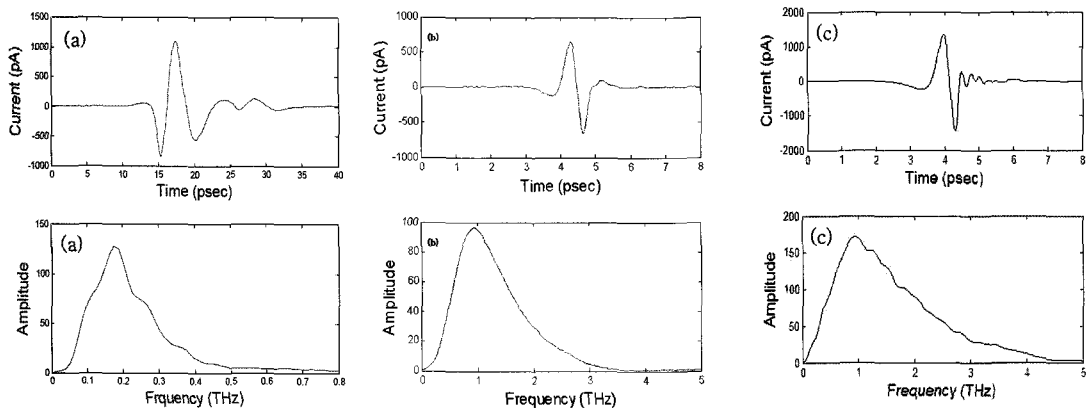
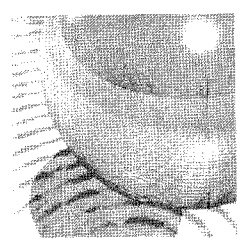


그림 10. Measured THz pulses and spectra.

(a) Tx: SOS 10-200-10 & Rx: RD-SOS 10-200-10
 (b) Tx: SI-GaAs 10-80-10 & Rx: RD-SOS 10-30-10
 (c) Tx: SI-GaAs 10-80-10 & Rx: RD-SOS 5-10-5



Reference

- [1] W. J. Gallagher, C-C. Chi, I. N. Dulin, III, D. Grischkowsky, N. J. Halas, M. B. Ketchen and A. W. Kleinsasser, "Subpicosecond Optoelectronic Study of Resistive and Superconductive Transmission Lines," *Appl. Phys. Lett.* 50, 350-352 (1987).
- [2] K. Sakai, *Terahertz Optoelectronics* (Springer, Berlin, and Heidelberg, 2005), pp. 7
- [3] F. E. Doany, D. Grischkowsky and C-C. Chi, "Carrier Lifetime vs Ion-implantation Dose in Silicon on Sapphire," *Appl. Phys. Lett.* 50, 460-462 (1987).
- [4] H. Abe, M. Tani, K. Sakai, S. Nakashima: in T. Parker, S. Smith (Eds.): (Conf. Dig. 23rd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, Colchester, UK 1998) pp.137
- [5] K. Sakai, *Terahertz Optoelectronics* (Springer, Berlin, and Heidelberg, 2005), pp. 6
- [6] L. Duvillaret, F. -F. Garet, J. -F. Roux and J. -L. Coutaz, "Analytical modeling and optimization of terahertz time-domain spectroscopy experiments, using photoswitches as antennas," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 7, 615-623 (2001).
- [7] D. Grischkowsky and N. Katzenellenbogen, "Femtosecond pulses of terahertz radiation: Physics and applications," in *Picosecond Electronics and Optoelectronics*, T. C. L. G. Sollner and J. Shah, eds. Vol. 9 of OSA Proceedings Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 1991) pp. 9-14.
- [8] S. E. Ralph and D. Grischkowsky, "Trap Enhanced Electric Fields in Semi-Insulators: The Role of Electrical and Optical Carrier Injection," *Appl. Phys. Lett.* 59, 1972-1974 (1991).

약 력

전태인



동아대학교에서 물리학 학사와 전자공학 석사를 그리고 Oklahoma state university의 Electrical engineering에서 "New applications of THz time-domain spectroscopy" 제목으로 박사학위(1997)를 취득하였다. 박사학위 취득 후 1년간 동 기관에서 박사후 과정을 거쳐 현재 한국해양대학교 전자전자공학 부에 교수로 재직 중이다. 주요관심분야는 THz를 이용한 분광법, waveguide, plasmon, 그리고 내시경 제작에 대한 연구를 수행하고 있다.