

구리선 도파로를 이용한 THz 전자기파의 결합 특성

전태인[†] · 지영빈

한국해양대학교 전기전자공학부

Ⓣ 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

(2006년 4월 21일 받음, 2006년 4월 21일 수정본 받음)

전기전도도가 높은 구리선 도파로에 THz 전자기파의 결합은 THz 유선방식의 전파에 있어 테라파의 크기 및 주파수 특성을 결정짓는 중요한 요인 중의 하나이다. 본 연구에서는 직경 480 μm , 길이 23 cm의 구리선 도파로에 테라파를 전파시켜 1 THz 주파수 범위를 가진 THz 펄스를 측정하였다. 도파로와 transmitter chip 또는 receiver chip 사이의 공극 간격을 최대 275 μm 까지 확대하여 송신부와 수신부의 결합 특성을 접촉상태와 비교 분석하였다. 실험결과 송신부의 결합민감도가 수신부보다 약 3배 이상 높게 나타났으며 수신부에서 도파로와 receiver 사이의 공극을 통하여 테라파가 공기 중으로 전파됨을 알 수 있었다. 또한 구리선 도파로에 pin hole를 위치시켜 pin hole의 직경에 따른 테라파의 변화를 연구하였으며 대부분의 THz field는 구리선 표면에 분포됨을 확인할 수 있었다.

주제어 : 테라헤르츠, 도파로, 구리선, THz field 분포

I 서 론

최근 들어 도파로를 이용한 THz 펄스의 유도에 많은 연구가 이루어지고 있다. 두개의 평행한 금속을 이용한 도파로는 흡수율과 분산율이 매우 작은 transverse-electromagnetic (TEM) mode로 전송되나 같은 간격의 길이가 긴 금속 도파로의 제작에 한계가 있다.^[1,2] 또한 THz 펄스의 입출력을 위해 반구(hypersphere) 모양의 silicon lens를 이용하였는데 이는 silicon의 높은 굴절률 때문에 입출력시 각각 30%의 반사손실이 발생된다. 한편 silicon lens를 사용하지 않고 silicon on sapphire (SOS) chip을 직접 coaxial cable에 접촉하여 THz 펄스를 발생하고 검출을 시도하였다^[3]. 이러한 연구에서 입출력시 발생하는 coupling 손실을 최소화 하였지만 coaxial cable의 80 μm 내경과 260 μm 외경에 의한 TE₁₁ mode의 차단 주파수가 측정범위 내에 존재하였다. 또한 내경과 외경사이의 절연 물질인 Teflon에 의한 손실이 발생하여 긴 거리를 전파하는데 장애요인으로 작용한다. 최근 들어 순수한 금속선을 이용하여 흡수율과 굴절률이 아주 작은 THz 유도에 관한 연구가 보고 되고 있다.^[4,5] 이러한 연구는 1950년대에 수십 미터의 금속선에 millimeter 파를 이용하여 그 전송 특성을 연구하였으며 매우 낮은 흡수율을 가지고 있음을 실험하였다.^[6,7] 최근의 연구 결과는 특별히 제작된 원형 형태의 transmitter chip을 사용하여 0.4 THz 범위의 주파수대역을 얻었으며 이를 이용하여 테라파의 흡수율 뿐 만 아니라 field 분포 그리고 금속선의 curve에 따른 손실을 측정하였다.^[5]

본 연구에서는 SOS dipole antenna 구조의 transmitter chip 과 receiver chip을 사용하여 이전의 주파수 대역보다 2배 이상 높은 1 THz 범위의 주파수 대역을 얻었다. 또한 silicon lens를 사용하지 않고 직접 dipole antenna로부터 테라파를 coupling 하였기 때문에 silicon에 의한 반사 손실을 제거하였으며 구리선의 위치와 결합 조건에 따라 테라파의 크기가 큰 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 마지막으로 구리선을 따라 전파하는 테라파의 field 분포를 확인하기 위해 구리선의 중앙에 pin hole를 위치시켜 테라파가 통과하는 유효 면적에 대한 테라파의 크기 변화를 연구하였다. 이는 향후 개발될 구리선에 유도된 테라파를 이용한 센서개발에 기초 자료가 될 것으로 생각된다.

II 실험 장치

본 연구에서 사용된 SOS chip은 광학적 영역에서 투명도가 좋아 800 nm의 Ti:Sapphire laser beam이 잘 통과 할 수 있다. 그림1의 실험장치도와 같이 SOS transmitter chip과 receiver chip의 dipole antenna는 모두 구리선과 접하고 있다. 따라서 laser beam이 dipole antenna의 gap에 도달하기 위해 GaAs와 같은 불투명한 chip은 사용할 수 없다. 이러한 시도로 발생된 테라파는 손실이 최소화 되며 구리선 도파로에 직접 coupling 된다.^[5] 사용된 transmitter chip은 10 μm 폭의 transmission line 사이에 5 μm 의 gap을 가진 dipole antenna를 사용하였다. 10 V의 직류전압을 antenna에 인가하였으며 20 mW의 power를 가진 laser beam을 chip의 뒷부분에 있는 광학 lens를 통해 gap에 입사시켰다. Antenna gap에서 발생된 테

[†] E-mail: jeon@mail.hhu.ac.kr

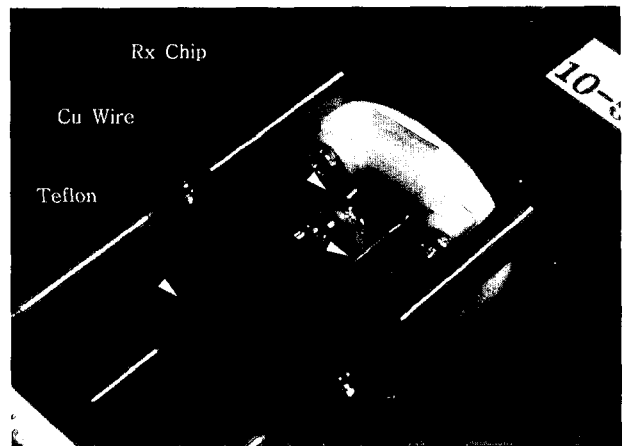
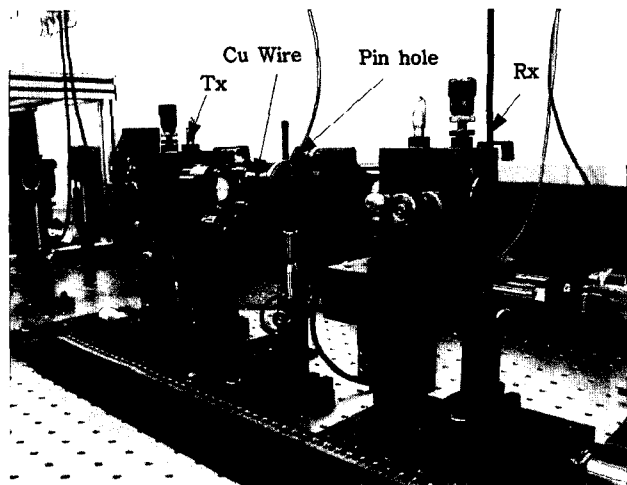
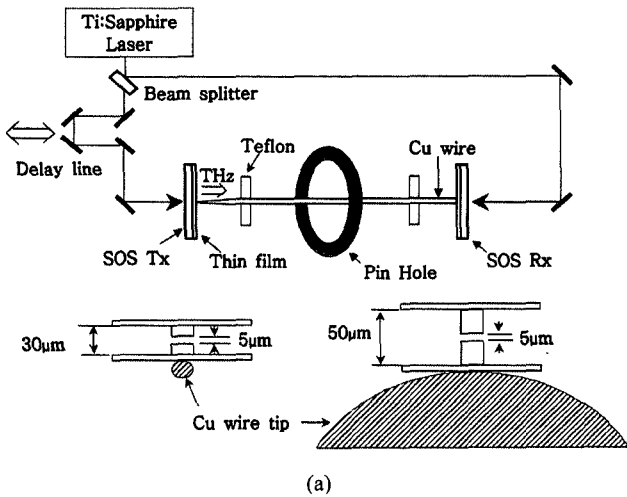


그림 1. (a) THz 구리선 도파로의 실험 장치도. (b) 제작된 THz 구리선 도파로 모습. (c) 구리선과 receiver chip의 모습.

구리선의 끝 부분을 약 30 μm 의 직경을 가진 뾰족한 모양으로 만들었다. 그리고 구리선의 끝을 그림과 같이 dipole antenna 바로 밑에 위치 시켰고 dipole antenna의 보호를 위해 구리선과 chip 사이에 두께 46 μm 의 절연 필름을 두었다. 따라서 transmitter antenna gap에서 발생된 테라파는 구리선의 끝 부분에서 결합되어 구리선을 따라 전파된다. 구리선으로 전파된 테라파는 SOS receiver chip의 50 μm 간격 transmission line 사이의 dipole antenna를 통하여 검출된다. 이때 dipole antenna는 480 μm 직경의 구리선 단면 위에 그림 1(a)와 같이 위치하며 TM_{01} mode의 field 방향과 같은 방향으로 둔다. 만약 THz field의 방향과 dipole antenna의 방향이 수직을 이루면 THz field의 에너지 방향과 금속 antenna의 방향이 달라 THz 펄스를 측정할 수 없다. 측정도중 구리선의 움직임을 제거하고 공기 중에 일직선으로 만들기 위해 양 끝단 앞 약 2 cm 지점에 3 mm 두께의 Teflon plate를 부착 시켰다. Teflon은 굴절률이 아주 낮고 THz에 대한 흡수율이 아주 작아 본 실험에 구리선을 고정 시킬 수 있는 이상적인 물질이라 할 수 있다^[5,8]. 그림 1(b)는 본 실험에 사용된 waveguide system의 사진이다. 구리선을 xyz 방향으로 미세 조절하기 위해 각 방향에 따른 translation stage를 사용하였고 또한 optical lens를 xyz 방향으로 미세조절하기 위해 역시 각 방향에 따른 translation stage를 사용하였다. 그림 1(c)는 Teflon을 관통한 구리선이 절연 필름으로 보호된 receiver chip에 접촉되어 있는 모습의 사진이다.

그림 2의 (a)는 측정된 THz 펄스로 13.1 psec에 있는 THz 펄스는 구리선을 통하여 직접 전파된 펄스이고 22.6 psec, 32.0 psec의 펄스는 chip 내부를 THz 펄스가 다중 반사되어 나타난 펄스들이다. Main THz 펄스의 full width half maximum (FWHM)은 1.0 psec이고 21 psec 까지의 THz 펄스에 대한 주파수 범위는 (b)와 같이 1THz 까지 확장되었다. 이는 같은 구조의 SOS receiver chip을 사용하고 기존의 원형 형태 transmitter chip을 사용한 THz waveguide system^[5] 보다 2배 이상 확장된 spectrum 이다. 또한 공급된 DC 전압은 10 V로 참고문헌 [5]의 60 V 전압보다 작은 전압을 사용하여 비록 테라파의 크기는 작으나 대역폭이 넓은 spectrum을 얻을 수 있었다. 이러한 넓은 영역의 주파수 대역은 THz waveguide 센서 등 많은 부분에서 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

III. THz field 특성

3.1 차단주파수와 흡수율

구리선을 따라 전파하는 테라파는 TM_{01} mode만 표면을 따라 전파하고 고차원 mode는 coupling 과 동시에 매우 높은 흡수율 때문에 모두 소멸된다. Coaxial cable의 경우 TE_{11} mode가 coaxial cable의 크기에 따라 THz 영역 내에서 존재할 수 있다. TE_{11} mode의 차단주파수와 coaxial cable에 의한 흡수율은 다음과 같이 각각 주어진다.^[9]

라파를 gap의 직경보다 96배 큰 480 μm 직경의 구리선에 효과적으로 coupling 하고 테라파의 분산을 최소화하기 위해

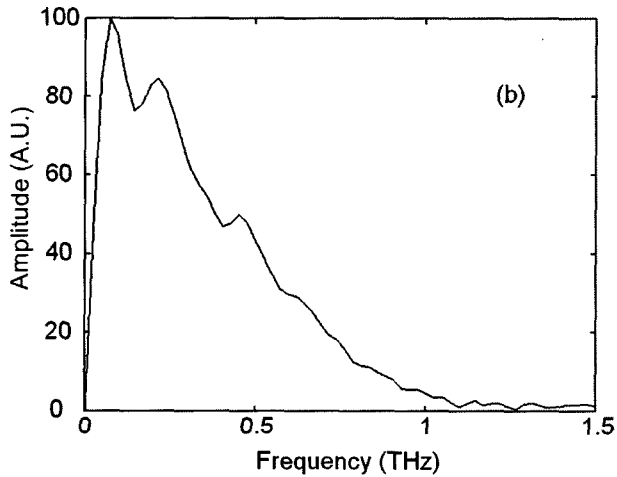
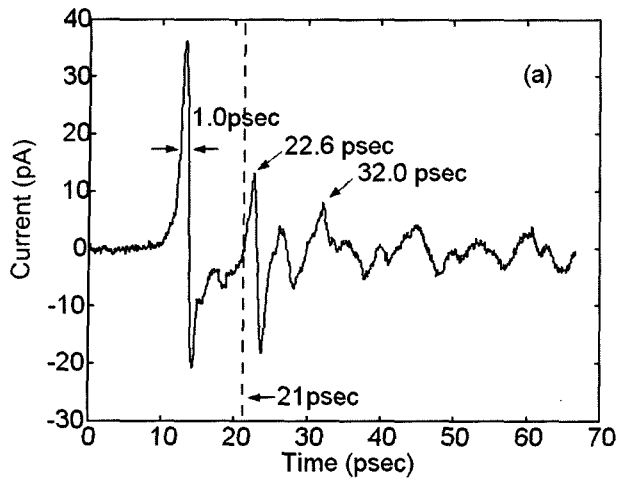


그림 2. (a) 시간 영역에서 측정된 THz 펄스. (b) 21psec 까지 고려된 주파수 영역의 spectrum.

$$f_c = \frac{c/n}{\pi(a+b)} \quad (1)$$

$$\alpha = 13.6 \frac{\delta \sqrt{\epsilon(1+b/a)}}{\lambda_0 b n(b/a)} \quad (2)$$

여기서 a와 b는 각각 내경과 외경의 반지름이고, c는 광속도, n과 ϵ 는 전파매질의 굴절률과 유전율, λ_0 는 파장이다. $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_R \mu_0 \sigma}$ 이고 f는 주파수 $\mu_R = 1$, μ_0 는 투자율, σ 은 전기전도도이다. 내경의 반지름이 240 μm 이고 외경의 반지름이 100배 큰 2.4 cm의 공기로 채워진 coaxial cable의 경우 TE₁₁ mode의 차단 주파수가 3.94 GHz로 된다. 이는 외경의 반지름이 100배 이상 큰 경우 단순한 같은 내경을 가진 금속선으로 간주 할 수 있다.^[9] 그림 3은 0.1 THz의 주파수에서 coaxial cable의 내경 반지름에 대한 amplitude 흡수율이며 삽입된 그래프는 coaxial cable의 inner 전도체 반경 반지름에 대한 차단주

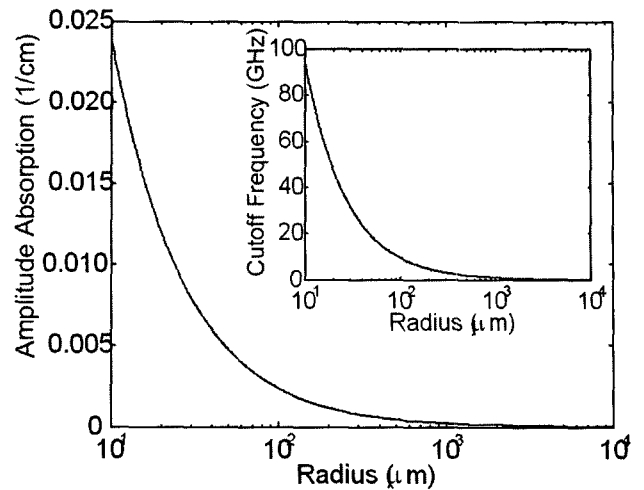


그림 3. 구리선의 반지름에 대한 amplitude 흡수율과 구리선의 반지름에 대한 차단주파수.

파수이다. 계산에 사용된 전도체는 순수 구리로 전기전도도는 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ [$1/\Omega\text{m}$]이며 coaxial cable의 외경은 내경의 100배로 계산하였다. 따라서 그림 3의 계산결과는 단순한 구리선에 대한 차단주파수와 amplitude 흡수율과 같다. 차단주파수의 경우 10 μm 의 반지름에서 94.6 GHz를 가지며 지수 함수적으로 감소하여 1000 μm (1 mm)의 반지름에서 0.95 GHz의 차단주파수를 가진다. amplitude 흡수율 또한 지수 함수적으로 감소하는데 10 μm 에서 $\alpha = 0.024 \text{ cm}^{-1}$ 이며 1000 μm (1 mm)일 때 $\alpha = 0.00024 \text{ cm}^{-1}$ 로 거의 손실 없이 테라파를 전송할 수 있다. 본 연구에 사용된 240 μm 의 구리선의 경우 계산된 차단주파수는 3.94 GHz로 고차 mode는 측정된 1 THz 주파수 영역에서 테라파가 coupling 됨과 동시에 흡수되어 사라진다. 또한 식 (2)에 의해 계산된 amplitude 흡수율은 0.1 THz에서 $\alpha = 0.00059 \text{ cm}^{-1}$ 값을 가지고 1.0 THz에서 $\alpha = 0.00187 \text{ cm}^{-1}$ 이다. 따라서 본 연구에서 전파된 THz 펄스의 최대 크기 주파수 성분은 그림 2(b)와 같이 0.1 THz 이하의 주파수 영역 이므로 거의 흡수 손실이 없이 receiver chip 까지 전파된다고 할 수 있다. 한편 반지름의 크기가 매우 크면 차단 주파수와 amplitude 흡수율이 거의 무시되는 THz plasmon 전파로 간주할 수 있다.^[10]

3.2 Chip과 구리선 사이의 공극에 따른 테라파의 영향

Dipole antenna gap에서 발생된 THz 펄스를 구리선에 coupling 시키고 구리선을 따라 전파된 THz 펄스를 receiver chip에서 검출 할 때 구리선과 chip 사이의 공극에 따른 coupling은 THz 펄스의 크기를 결정짓는 매우 중요한 요인이 된다. 그림 4는 transmitter chip과 구리선 그리고 구리선과 receiver chip 사이의 공극에 대한 THz 펄스의 크기를 표시한 그래프이다. Transmitter chip과 구리선 사이의 공극에 대한 테라파의 감소는 접촉 상태에 와 비교했을 때 275 μm

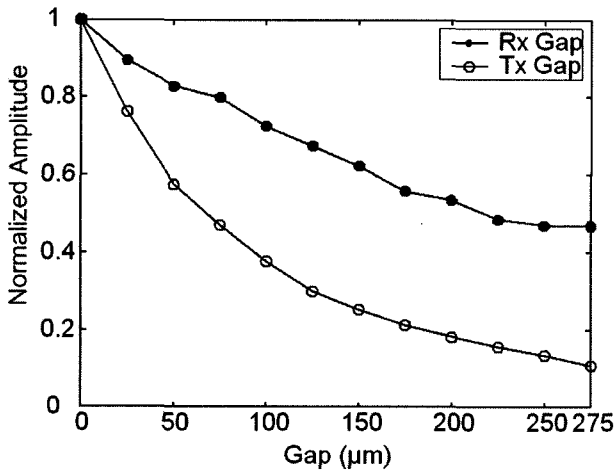


그림 4. chip과 구리선 사이의 공극에 따른 THz 펄스의 크기 변화.

의 공극에서 90% 감소되었다. 즉 크기에 대한 감쇄계수 $\alpha = 72.7 \text{ cm}^{-1}$ 로 매우 높게 나타났다. 이는 발생된 테라파가 공기를 통하여 구리선에 coupling 될 수 있으며 silicon lens와 같은 접촉장치 없이는 그 효율이 매우 낮음을 의미한다. 접촉 상태부터 공극의 크기가 클수록 테라파의 크기가 지수 함수적으로 감소된다. 이는 발생된 테라파가 dipole antenna 부근에 집중되어 있고 공극이 클수록 테라파의 에너지는 지수 함수적으로 감소된다. 한편 receiver chip과 구리선 사이의 공극에 대한 테라파의 감소는 transmitter chip의 경우보다 보다 그림 4와 같이 덜 민감하게 나타났는데 275 μm 의 공극은 접촉상태와 비교해서 52% 감소되었다. 이때 계산된 감쇄계수는 $\alpha = 23.2 \text{ cm}^{-1}$ 로 transmitter의 경우와 비교해 3배 이상 작음을 알 수 있다. Receiver chip의 공극에 대한 테라파 측정 은 구리선 waveguide를 통하여 전파하는 테라파가 구리선이 끝나는 지점에서 waveguide 없이 공기 중으로 마치 transmitter antenna와 같이 전파함을 의미한다.

3.3 개방된 pin hole에 의한 field 분포

도파로로 사용된 구리선 중앙에 pin hole 직경을 1 mm에서 15 mm 까지 1 mm 간격으로 조절하여 THz의 변화를 그림 5(a)와 같이 측정하였다. 직경 1 mm 와 15 mm 일때의 FWHM은 각각 0.75 psec 와 0.79 psec로 나타났으며 이에 대한 normalized 주파수 분포는 그림 5(b)와 같다. 15 mm의 직경에 대한 주파수 성분이 약간 저주파 영역으로 이동되었음을 알 수 있다. 직경에 따른 분산은 공기중을 전파하는 테라파와 비교하면 매우 적게 나타났으며 THz 펄스의 크기만 상대적으로 감소하였다.

그림 5(c)는 구리선의 단면적을 제외한 각각의 유효 면적에 대한 펄스의 peak-to-peak 값이다. 직경 15 mm 일 때 값을 기준으로 하여 각각의 값 차를 normalized 하였다. 즉 구리선의 중앙에 pin hole이 위치하여 구리선을 중심으로 방사 형태로 분포된 THz field를 (TM₀₁ mode) 윗부분만 차단하였

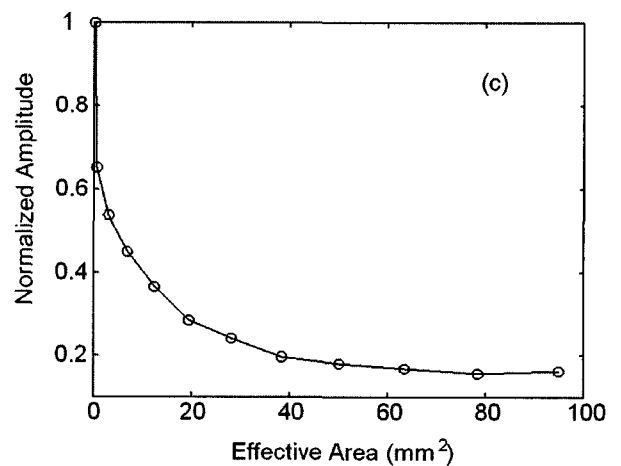
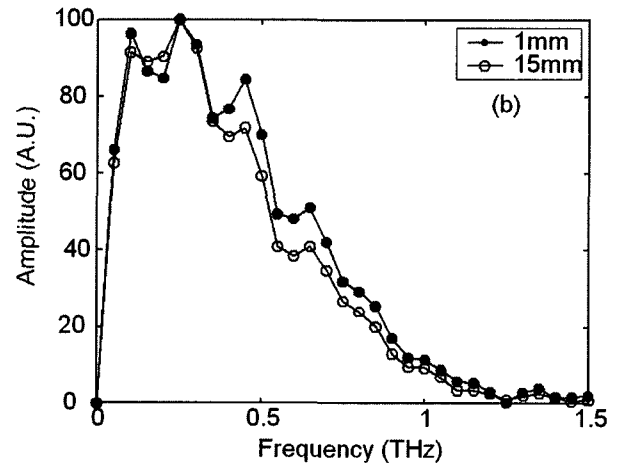
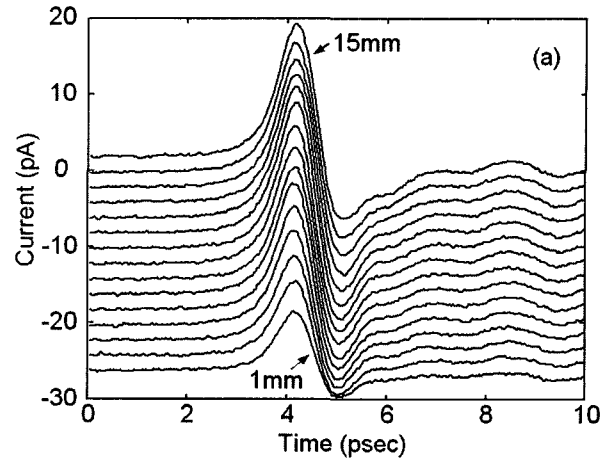


그림 5. (a) 개방된 pin hole의 직경에 따른 THz 펄스의 변화. (b) 1mm 직경의 pin hole과 15mm 직경의 pin hole에 대한 THz 펄스의 주파수 분포(c) Normalized된 THz 펄스의 크기.

다. Receiver chip의 dipole antenna는 pin hole과 멀리 떨어져 있어 측정된 THz field는 THz가 통과된 유효면적에 관계가 있다. 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 약 80 mm^2 (10 cm 직경)에서는 크기의 값이 거의 포화 상태가 됨을 알 수 있다. 유효면적에 따른 테라파의 크기 변화는 receiver chip의 dipole antenna를 직접 TM_{01} mode의 방향에 따라 이동시켜 얻어진 값보다^[5] 훨씬 크게 나타 난 이유가 된다. 펄스 크기의 변화는 지수 함수로 감소되는데 이는 대부분의 THz field가 구리선 표면에 집중되어 있음을 상대적으로 알 수 있다.

IV. 결 론

테라헤르츠 전자기파가 구리선을 따라 전파할 때 dipole antenna 구조의 transmitter chip과 receiver chip을 사용하여 기존의 테라파 spectrum 보다 2배 이상 확장된 최대 1 THz 범위의 spectrum을 얻을 수 있었다. 이는 dipole antenna 사이의 gap이 $5 \mu\text{m}$ 로 기존의 원형 형태의 transmitter chip의 + - 간격 보다 훨씬 짧다. 또한 dipole antenna gap에서 발생된 테라파는 $30 \mu\text{m}$ 직경의 구리선 tip을 통하여 입사되므로 테라파의 dispersion이 많이 일어나지 않는다. 따라서 + - 사이의 간격이 넓은 원형 형태 또는 transmission line 형태의 chip 보다 작은 10 V의 전압을 공급함에도 불구하고 훨씬 더 효율적인 system을 만들 수 있다. 구리선의 양끝 tip과 chip의 결합은 테라파의 전파에서 매우 중요한 요인 중의 하나이다. 특히 transmitter chip과 구리선 tip의 공극은 테라파 coupling에 있어 receiver chip과 구리선 사이의 공극보다 3배 이상 민감하게 작용한다. 또한 receiver chip과 구리선 사이에 공극이 있음에도 테라파가 감지되는 것은 구리선이라는 waveguide가 없이도 테라파가 구리선이 끝나는 지점에서 공기 층으로 마치 transmitter antenna와 같이 테라파가 전파한다는 것을 의미한다. 구리선 waveguide를 통한 TM_{01} mode의 분포는 구리선 표면에 집중되어 있고 외부로 갈수록 그 크기는 지수 함수적으로 감소됨을 알 수 있다. 본 연구는 테라파를 이용한 구리선 waveguide의 특성 분석에 관한 실험적 연구로 앞으로 많은 이론적 실험적 연구가 필요하며 향후 개발 될 THz waveguide 센서 및 통신 연구에 기초 자료가 될 것으로 생각된다.

본 과제(결과물)는 정보통신부의 IT기초기술연구지원사업(정보통신연구진흥원)으로 수행한 연구결과물입니다.

참고문헌

- [1] R. Mendis and D. Grischkowsky, "Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses," *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 846-848, 2001.
- [2] S. Coleman and D. Grischkowsky, "A THz transverse electromagnetic mode two-dimensional interconnect layer incorporating quasi-optics," *Appl. Phys. Lett.* vol. 83, pp. 3656-3658, 2003.
- [3] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Direct optoelectronic generation and detection of sub-ps-electrical pulses on sub-mm-coaxial transmission lines," *Appl. Phys. Lett.* vol. 85, pp. 6092-6094, 2004.
- [4] K. Wang and D. M. Mittleman, "Metal wires for terahertz wave guiging," *Nature*, vol. 432, pp. 376-379, 2004.
- [5] T.-I. Jeon, J. Zhang, and D. Grischkowsky, "THz Sommerfeld wave propargation on a single metal wire," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, pp. 161904, 2005.
- [6] A. Sommerfeld, *Electromagnetic, Academic*, pp. 177-190, 1952.
- [7] F. Sobel, F. L. Wentworth, and J. C. Wiltse, "Quasi-optical surface and other components for the 100- to 300-Gc region," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 9, pp. 512-518, 1961.
- [8] J. R. Birch, E. A. Nicol, D. V. Bartlett, and T. P. Hughes, "The near millimetre wavelength optical constants of some potential window materials at elevated temperatures," *Infrared Phys. Technol*, vol. 36, pp. 799-808, 1995.
- [9] P. A. Rizzi, *Microwave Engineering passive circuit*, Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- [10] T.-I Jeon and D. Grischkowsky, "THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 061113, 2006.

The Coupling Characteristics of THz Electromagnetic Wave using Copper Wire Waveguide

Tae-In Jeon[†], and Young Bin Ji

Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, KOREA

[†]*E-mail: jeon@mail.hhu.ac.kr*

(Received February 23, 2006, Revised manuscript May 23, 2006)

The coupling between copper wire and a THz electromagnetic wave is one of the important factors to build up the magnitude and spectrum of a THz wave. We measured a 1THz spectrum range THz pulse into a 480 μ m diameter and 23cm long copper wire waveguide. We measured THz pulses up to 275 μ m air gap between the end of the copper wire and transmitter or receiver chips. The coupling sensitivity of the transmitter is 3 times bigger than that of the receiver. The THz pulses propagated to air by the end of the receiver-side copper wire tip acting as a transmitter antenna. We confirmed that the THz field concentrates near the copper wire surface by opening the pin hole to the copper wire waveguide.

OCIS Codes : 240.6680, 240.6690, 260.3090.