

Terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy of niobium

Taeyoon Hong^a, Kyujin Choi^a, Byoung-Cheol Park^a, Taewoo Ha^a, Kyung Ik Sim^a, Dong-Gwang Ha^b,
Yonuk Chong^b, and Jae Hoon Kim^{*a}

^a Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749 Korea

^b Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

(Received 28 February 2013; revised 7 March 2013; accepted 11 March 2013)

Abstract

We have developed a terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system for transmission and reflection measurements of metallic thin films. Using our THz-TDS system, we studied the conventional superconductor niobium (Nb) in the normal state in the spectral range from 5 to 50 cm^{-1} . Both the real and imaginary parts of the conductivity are acquired without Kramers-Kronig analysis. Nb exhibits a nearly frequency independent real conductivity spectrum in the terahertz range, with a very small imaginary part.

Keywords : Terahertz spectroscopy, Niobium, Superconductor

1. INTRODUCTION

테라헤르츠 및 원적외선 영역에서의 초전도체의 광학 측정은 역사적으로 초전도의 기원을 이해하고 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 이론 [1]을 정립하는데 중요한 역할을 하였다. 다양한 초전도체의 에너지 갭 [2-7]이 이 영역에 존재하고 준입자 여기 흡수 및 초전도 불균일성 집단 여기 흡수 [8] 또한 이 영역에서 보고되고 있으므로 테라헤르츠는 연구 가치가 매우 높은 영역이라 할 수 있겠다.

테라헤르츠 시분해 분광법(Terahertz Time-Domain Spectroscopy: THz-TDS) [9]은 타 측정기법에 비해 상대적으로 최근에 개발되어 활발히 응용되고 있는 측정기술로서 다양한 특징점을 가지고 있다. 첫째, 전자기파의 진폭 및 위상을 동시에 측정하므로 Kramers-Kronig 관계를 사용하지 않고도 복소 투과 및 반사 계수에서 바로 복소 광학상수 계산이 가능하다. 둘째, 기존의 열 광원과 비교하여 휘도가 매우 높고 결맞은 탐지 방식을 쓰므로 매우 훌륭한 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다. 셋째, 수 피코초 폭의 펄스를 사용하기 때문에 기판내 반사에 의한 펄스를 시간적으로 분리하는 것이 가능하여 Fabry-Perot 간섭을 제거할 수 있다.

전술한 테라헤르츠 시분해 분광법을 사용하여 8.3 켈빈의 초전도전이온도(T_c)와 24 cm^{-1} 정도의 초전도 에너지 갭(2Δ) [2, 3]을 갖는 전통적인 초전도체 나이오븀(Nb)에 대한 저온 측정의 예비단계로서 상온에서의 정상상태에 대한 투과 및 반사 실험을 5 - 50 cm^{-1} 영역의 주파수에서 수행하였다.

2. EXPERIMENTAL

Fig. 1은 본 연구실의 THz-TDS 투과/반사 시스템의 개략도이다. Ti:Sapphire 펄스 레이저(파장 $\sim 800 \text{ nm}$, 폭 $\sim 70 \text{ fs}$, 펄스 반복률 $\sim 80 \text{ MHz}$)와 광전도(photoconductive) 안테나를 사용하여 테라헤르츠 펄스를 발진시키고 탐지한다. 발진기와 탐지기로 사용되는 광전도 안테나는 저온에서 성장된 GaAs 기판 위에 금 전극을 전기쌍극자 패턴으로 증착한 것으로 테라헤르츠 펄스 발진과 탐지를 위해 광범위하게 사용되는 것이다.

투과 실험을 위하여 테라헤르츠 펄스를 포집하고 시료에 초점을 맞추기 위하여 off-axis paraboloidal 거울을 사용하였다. 반사 실험의 경우 광섬유를 이용하여 펄스 레이저 펄스와 발진기 및 탐지기를 시료에 접근시킨 후 발생된 테라헤르츠 펄스를 시료에 15° 정도 각으로 입사/반사시켜 실험을 수행하였다.

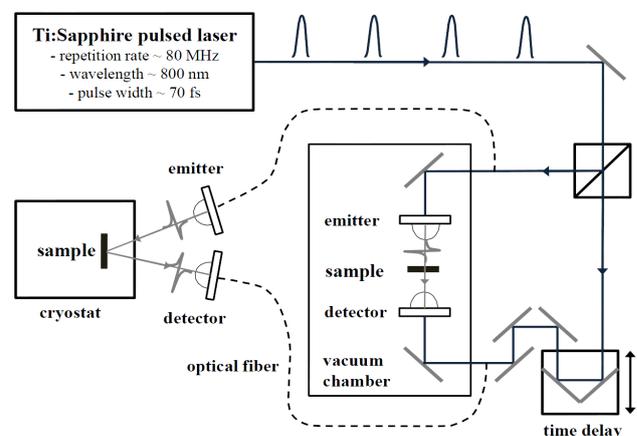


Fig. 1. A schematic diagram of our THz-TDS transmission and reflection system.

* Corresponding author: super@yonsei.ac.kr

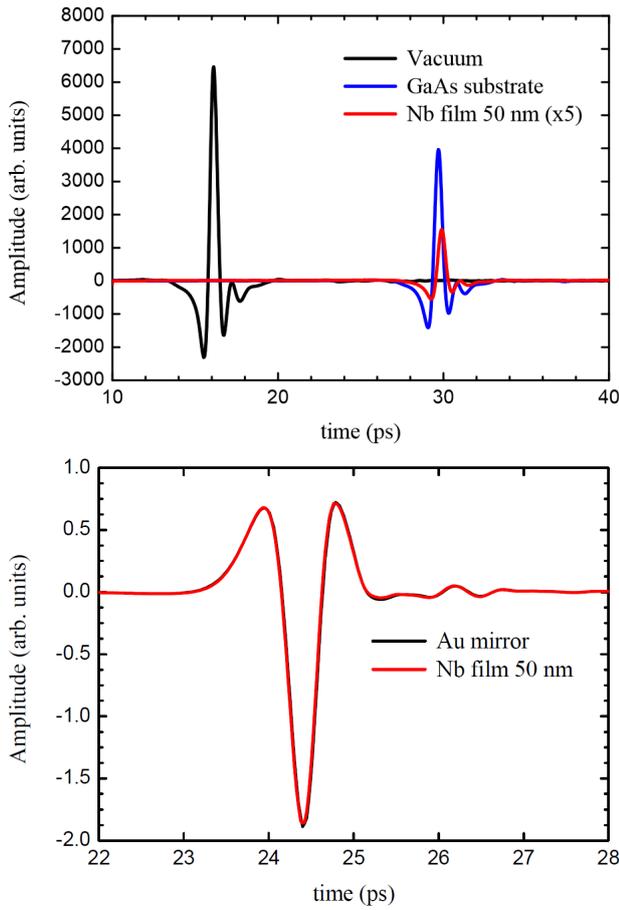


Fig. 2. Time-domain waveforms transmitted through vacuum (black line), a GaAs substrate (blue line), and our Nb film (red line) evaporated on the GaAs substrate (scaled by a factor of 5) (top). Time-domain waveform reflected from a gold mirror and our Nb film (bottom).

반사 실험 수행 시 시료와 반사표준용 금 거울간의 위치 차이가 상당한 오차를 가져오기 때문에 이를 방지하기 위하여 특별히 고안한 시료 홀더를 사용하여 오차를 줄였다.

Nb 박막 시료는 한국표준과학연구원에서 두께 1.5 mm의 부도체 GaAs 기판 위에 sputtering 기법으로 50 nm의 두께로 증착되었으며 본 실험실의 THz-TDS 장비를 사용하여 Nb 박막과 금거울의 투과 및 반사 테라헤르츠 펄스의 세기를 시간에 대한 함수로 획득한 후 푸리에 변환하여 복소 스펙트럼을 추출한 후에 투과도와 반사도를 계산하였다.

Fig. 2 은 진공, GaAs 기판, Nb 박막의 투과 테라헤르츠 펄스 세기를 시간에 대한 함수로 획득한 것이다. 진공을 투과한 펄스의 피크와 GaAs 기판을 투과한 펄스의 피크의 시간 차이가 13.5 피코초 정도인 것을 확인할 수 있는데 이것은 테라헤르츠 영역에서 굴절률이 3.7인 1.5 mm 두께의 GaAs 기판을 빛이 투과하는데 걸리는 시간으로 계산이 가능하다. GaAs 기판 위에 증착된 Nb 박막의 두께가 50 nm로 매우 얇지만 금속성을 나타내기에는 충분하여 투과 펄스의 세기가 매우 작아 자세히 보기 위하여 5배 확대하여 표시하였다. Fig. 2 (bottom)은 반사표준용 금 거울과 Nb 박막에서 반사된 테라헤르츠 펄스를 시간에 대한 함수로 획득한 것이다. Nb 시료의 금속성이 좋아 반사율이 표준용 금 거울 결과와 거의 같게 나온 것을 확인할 수 있다.

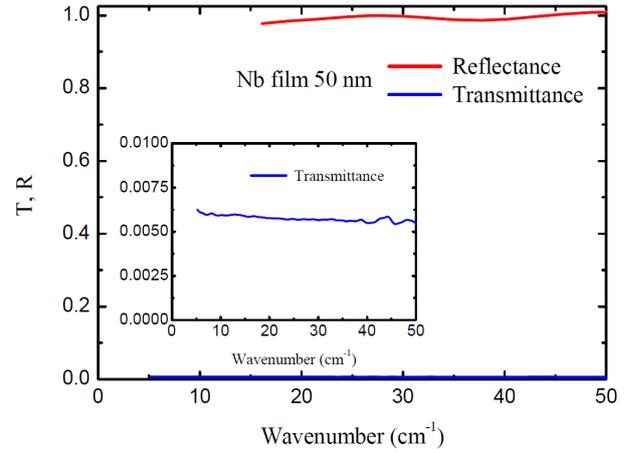


Fig. 3. The reflectance and transmittance spectra of our Nb film.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 3에서도 역시 Nb 박막의 반사율과 투과율로부터 Nb이 매우 좋은 전도체임을 확인할 수 있다. 반사율의 경우 15에서 50 cm^{-1} 까지의 영역에서 오차범위 이내로 1에 가까운 결과를 보이고 투과율의 경우 5에서 50 cm^{-1} 까지의 전 측정영역에서 0.6%의 거의 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

앞서 계산된 Nb 박막의 복소 투과계수와 미리 측정된 GaAs 기판의 복소 굴절률을 가지고 아래의 공식 [5]을 사용하여 Nb 박막의 복소 동전도도 $\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) + i\sigma_2(\omega)$ 를 각주파수 ω 의 함수로서 계산하였다.

$$\sigma(\omega) = \frac{(n_s + 1)(t_s / t_f - 1)}{Z_0 d}$$

여기서 Z_0 는 자유 공간의 임피던스, d 는 박막의 두께, n_s 는 기판의 복소 굴절률, t_f 와 t_s 는 각각 박막과 기판을 모두 투과한 복소 투과계수와 기판만을 투과한 복소 투과계수를 말한다. Nb 박막의 두께가 50 nm로 $n_f \omega d / c \ll 1$ (n_f 는 박막 복소 굴절률, c 는 진공중 광속) 가정이 잘 맞기 때문에 위의 공식을 사용하여 복소 동전도도를 성공적으로 계산할 수 있었다.

Fig. 4는 계산된 복소 동전도도와 Drude model fitting [10] 결과로서 Drude Model Fitting 파라미터로는 $\sigma_{DC} = 30,545 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, $\gamma = 5,500 \text{cm}^{-1}$ 을 사용하였다. 복소 동전도도의 실수부와 허수부를 보면 측정된 전 영역에서 거의 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있는데 이것은 금속의 복소 동전도도를 기술하는 Drude model에서 충돌률 γ 보다 매우 낮은 주파수 영역에서의 전도도 예상치와 일치하는 결과이다. 전도도 실수부의 크기를 보면 3×10^4 정도로 backward wave oscillator를 사용한 기준 문헌값(Nb박막 두께 15 nm) [3]과 비교하면 70% 정도의 값을 보이는 것을 확인하였다.

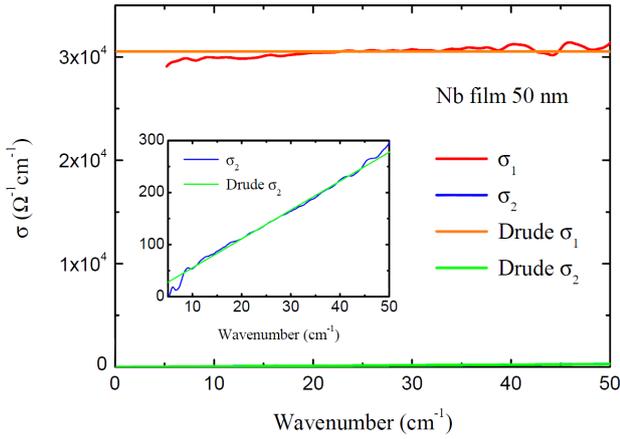


Fig. 4. The real and imaginary parts of the conductivity of our Nb film as a function of frequency. The predictions of the Drude model are also shown.

4. CONCLUSION

우리는 테라헤르츠 시분해 투과 및 반사 분광법을 사용하여 50 nm 두께 단일원소 금속 초전도체 Nb 박막의 투과, 반사율 및 복소 동전도도를 결정하였다. Nb의 상온 정상상태 동전도도 결과는 Drude model의 예측과 매우 잘 일치한다는 것을 확인하였다. 본 연구는 향후 저온실험에서의 측정결과와 비교하여 초전도 gap을 결정하는 자료로 이용될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) by Ministry of Science and Technology (2010-0012991).

REFERENCES

- [1] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957).
- [2] Martin C. Nuss, K. W. Goossen, J. P. Gordon, P. M. Mankiewich, and M. Bhushan, J. Appl. Phys. 70, 2238 (1991).
- [3] A. V. Pronin et al., Phys. Rev. B 57, 14416 (1998).
- [4] N. Drichko, P. Haas, B. Gorshunov, D. Schweitzer, and M. Dressel, Europhys. Lett. 59, 774-778 (2002).
- [5] Robert A. Kaindl et al., Phys. Rev. Lett. 88, 027003 (2002).
- [6] M. Ortolani et al., Phys. Rev. Lett. 97, 097002 (2006).
- [7] A. Perucchi et al., Eur. Phys. J. B 77, 25-30 (2010).
- [8] J. Corson, J. Orenstein, Seonshik Oh, J. O'Donnell, and J. N. Eckstein, Phys. Rev. Lett. 85, 2569 (2000).
- [9] M. C. Nuss and J. Orenstein, "Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids", edited by G. Grüner, Springer-Verlag, Berlin, 7-50 (1998).
- [10] Dressel, M.; Gruner; G. Electrodynamics of Solids: Optical Properties of Electrons in Matter; Cambridge University Press: Cambridge, 2002.