

Development of Superconducting Transition Edge Sensors for Gamma Ray Detection

Young Hwa Lee, Yong-Hamb Kim*

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

Received 04 April 2008

감마선 검출을 위한 초전도 상전이 센서

이영화, 김용함*

Abstract

We are developing a sensitive gamma ray spectrometer based on superconducting transition edge sensors. The detector consists of a small piece of high purity Sn as an absorber and a Ti/Au bilayer as a temperature sensor. It is designed to measure the thermal signal caused by absorption of gamma rays. The mechanical support and the thermal contact between the absorber and the thermometer were made with Stycast epoxy. The bilayer was formed by e-beam evaporation and patterned by wet etching on top of a SiN_x membrane. A sharp superconducting transition of the film was measured near 100 mK. When the film was biased to the edge of the transition, signals were observed due to single photon absorption emitted from an ²⁴¹Am source. The measured spectrum showed several characteristic peaks of the source including 59.5 keV gamma line. The full width at half maximum was about 900 eV for the 59.5 keV gamma line. The background was low enough to resolve low energy lines. Considerations to improve the energy resolution of the gamma ray spectrometer are also discussed.

Keywords : gamma-ray detection, Superconducting absorber, TES, proximity effect, electro-thermal feedback

I. Introduction

감마선 분석기술은 천체물리학 및 핵물질 분석 분야에서 매우 중요한 분야이다. 현재 감마선 검출에는 상용화된 고순도 Ge 기반 검출기가 널리 사용되고 있으나, 수백 eV (FWHM)에 이르는 에너지 분해능은 방사선 동위원소 구별

등 고정밀 분석에는 그 응용이 불충분하다. 여기에, 초전도 상전이 센서(Transition Edge Sensor: TES) 기반의 극저온 열량계를 적용함으로써 10배 이상의 에너지 분해능을 기대할 수 있다 [1 - 5].

TES는 초전도 박막을 이용하여 x-선을 흡수하여 그 온도 변화를 감지하는데, 초전도체에서 일반 금속체로 급격히 변하는 구간-상전이 영역이 그 작동 영역이다. 이 TES에 충분한 감마선 흡수효율을 갖는 초전도 흡수체를 결합

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5953

e-mail : yhkim@kriss.re.kr

하여 고분해능 감마선 검출기로서 응용이 가능하다. 또한, 극저온에서 바이어스 전압을 인가시켜 유지되는 열적 평형 상태에서는 TES에 흡수된 감마선에 의해 온도가 상승하면 박막의 저항이 급격히 증가되어 전류가 감소, 다시 열적 평형 상태로 소자를 되돌리며, 이러한 전기적-열적 피드백(electro-thermal feedback) 특성을 이용하여 흡수에너지를 간단히 계산해 낼 수 있다 [6 - 8].

본 논문에서는 한국표준과학연구원에서 선행 연구된 Ti/Au 이중층 초전도 박막 TES를 기반으로 극저온 고분해능 감마선 검출기를 개발하고 그 특성을 조사하였다.

II. Detector design

초전도 감마선 검출기는 구조상 크게 흡수체와 감지부, 그리고 외부와의 열적 연결부로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 크기의 Ti/Au 이중층 초전도 박막 감지부를 갖는 TES를 기본으로 하였다. 감지부의 하부는 기판(Si)을 통한 열확산을 막기 위해 미세가공기술을 이용해 제거시켰다. 감마선의 흡수체로는 $1.0 \times 1.0 \times 0.3 \text{ mm}^3$ 크기로 가공된 고순도 Sn을 센서부에 부착시켰다 (감마선 TES 소자의 단면도는 그림 1(e)를 참조).

TES는 초전도/일반금속 이중층의 근접효과에 따라 Ti/Au의 두께비를 조절하여 약 100 mK의 상전이 온도를 갖도록 하였으며 [9], 미세 전류변화를 측정하기 위하여 초전도양자간섭소자(SQUID)를 연결하고 감마선 흡수에 따른 전류변화를 측정하였다.

III. Fabrication

그림 1에 소자 제작공정을 나타내었다. 먼저 저압화학기상증착법(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)으로 증착된 저응력 SiN_x Si(100) 4인치 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 그리고 센

서가 위치할 후면부를 KOH 식각액(80°C , $1.4 \mu\text{m}/\text{min}$)에서 비등방 식각시킴으로써 후식각시의 식각 용액열에 의한 불필요한 Ti/Au 박막간 내부확산을 회피하였다.

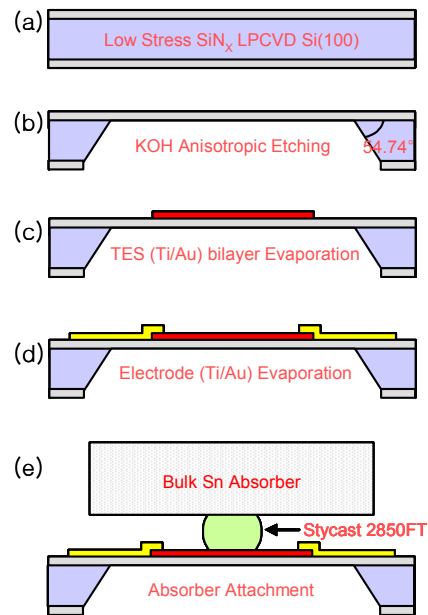


Fig. 1. Fabrication processes for gamma ray TESs and a cross sectional view of a TES with a bulk Sn absorber.

TES부 즉, 감지영역은 Ti/Au 이중층을 전자선 진공증착(e-beam evaporation) 시켰고, 그 두께는 각각 25 nm/100 nm로 하였다. 또한 포토리소그래피 및 습식 식각법으로 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 크기의 센서를 형성하였고, 이때 식각액으로는 Au etchant type TFA와 BOE 1:6 용액을 각각 사용하였다. 특히, TES 가장자리의 형상적 불완전 및 박막 두께 불균일 현상을 제거하기 위해 추가로 BOE에서 선택적 Ti 과식각 시켰다. 이후 소자와 외부단자와의 연결을 위하여 Ti/Au 초전도전극을 lift-off법으로 형성하였다.

마지막으로 $1.0 \times 1.0 \times 0.3 \text{ mm}^3$ 크기로 미리 가공된 99.99% bulk Sn 흡수체를 에폭시(Stycast 2850FT)를 사용하여 센서의 중심부에 고정시켰다. 그림 2은 흡수체를 부착한 소자의 현미경 사진을 나타낸다.

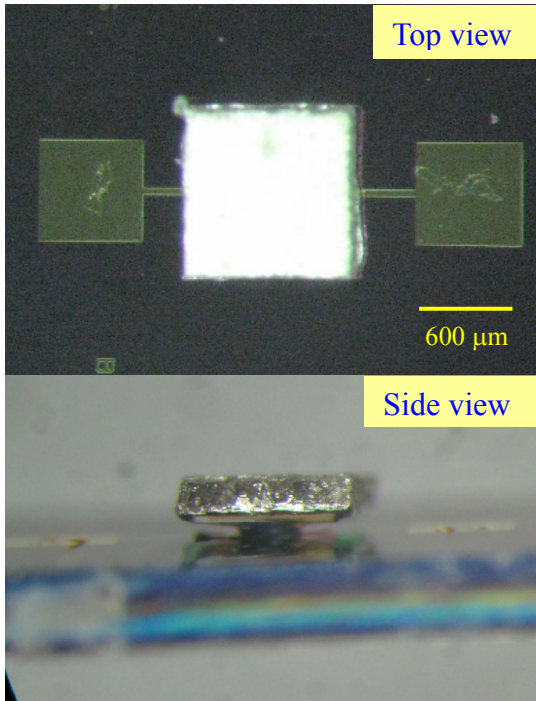


Fig. 2. Microscopic images of Sn absorber glued on a Ti/Au TES sensor.

IV. Characteristics

초전도 박막 TES는 기본적으로 안정된 상전이 온도 (T_C)값과 급격한 상전이 폭 (ΔT_C) 특성을 가져야 한다. 감마선 검출 실험에 앞서 Ti/Au 이중층 박막의 극저온 특성을 검증하였다 [10]. 제작된 TES를 단열 자기 냉동기 (ADR: adiabatic demagnetization refrigerator) 부착하여 50 mK - 4 K 사이의 저항을 측정 하였다. 그림 2에 보이는 소자의 전극 패드에서 4-단자 배선 후 AC Resistance Bridge 기기를 이용하여 자기 냉동기의 온도변화에 따른 저항을 관찰하였다.

실제적으로 Ti/Au 이중층의 두께비 변화에 따라서 상전이 온도값을 조절할 수 있으며 본 실험에서는 약 100 mK 근처의 상전이 온도를 지향 하였다. 본 감마선 검출기에 적용된 Ti 25 nm/Au 100 nm 두께 TES 소자의 온도-저항 특성은 그림 3와 같다.

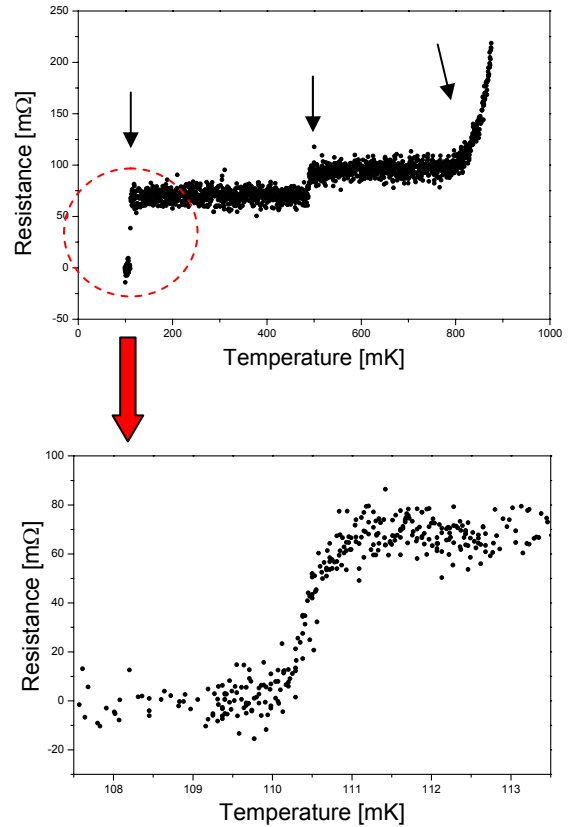


Fig. 3. Resistance-temperature characteristic of a Ti/Au (25 nm/100 nm) TES.

우선 상단에 1 K 이하 넓은 영역에서 소자의 온도-저항 거동을 나타냈다. 3개의 크고 작은 상전이 영역을 보이는데, 이는 소자내 센서부와 전극 및 이들 사이 연결부의 Ti/Au 두께비 차이에 따른 결과이다. 900 mK 부근의 큰 저항 변화는 전극(Ti 150 nm/Au 50 nm)에서의 상전이를 나타내며 500 mK 근처의 작은 저항변화는 전극과 센서부의 접친 영역에서의 상전이를 나타낸다. 실제 TES 동작영역인 100 mK 근처 저항이 80 mΩ에서 0(zero)의 값으로 변하는 급격한 상전이를 하단 그림에 자세히 나타내었다. 이때 센서부(Ti 25 nm/Au 100 nm)는 약 110 mK의 상전이 온도에서 약 1 mK 정도의 급격한 상전이 폭을 갖는다.

또한 소자 특성을 나타내는 중요한 변수로서 초전도 상전이의 감도(α)는 $\alpha=(T/R)(dR/dT)$ 로

표현할 수 있다. 단순 계산된 본 소자의 α 값은 약 162 정도로 감마선 및 x-선 검출에 있어서 적합한 값을 보인다.

V. Gamma-ray spectrum

소자는 기 제작된 전용의 홀더에 부착하고 ADR의 극저온 환경에서 전압을 인가시켜 전기적-열적 피드백 효과로 열평형 상태를 유지시키고, 감마선 흡수로 인해 발생된 미세한 전류변화를 dc-SQUID를 이용해 측정하였다. 그림 4에 TES 측정회로를 간단히 나타냈다.

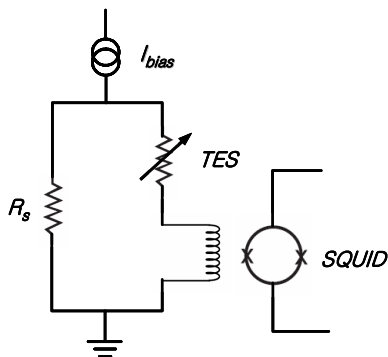


Fig. 4. Schematic circuit diagram of the measurement circuit.

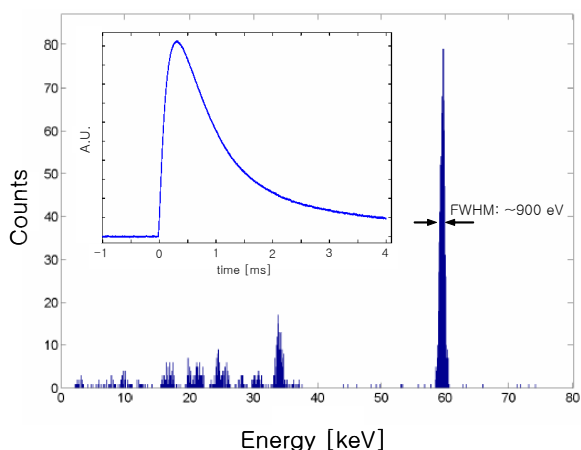


Fig. 5. X-ray and gamma ray spectrum of ^{241}Am using Sn absorber with Ti/Au TES. The inset is a typical pulse for a 59.5 keV gamma ray.

감마선 흡수체로는 열용량을 최소화하고 높은 흡수효율을 갖기 위하여 bulk Sn을 사용하였다. Sn은 3.7 K 이하의 온도에서 초전도 상태가 되므로 TES의 작동온도인 0.1 K 영역에서는 Sn이 갖는 전자 열용량은 무시할 수 있다.

선원으로는 ^{241}Am 을 사용하였고, 선원에서 나오는 에너지가 큰 알파 입자를 완전히 배제하기 위하여 선원과 흡수체 사이에 20 μm 두께의 Au foil을 위치 시켰다.

소자의 감마선 에너지 스펙트럼 결과를 그림 5에 나타내었다. 측정결과에서 바탕신호가 적어 비교적 낮은 에너지 대역에서의 여러 작은 피크들을 보이고 있으며, 59.5 keV의 감마선에 대해 에너지 분해능은 약 900 eV FWHM의 값을 갖는다. 이는 현재 상용 Ge 검출기의 에너지 분해능과 유사한 수준이며, 개발 초기 단계의 검출 소자로서는 고무적인 결과이다. 따라서 추가의 조건확립과 다양한 소자 제작을 통해 충분한 고분해능 검출기로써의 가능성을 보인다.

VI. Conclusion

본 논문에서는 Ti/Au 이중층 초전도 상전이 센서를 기반으로 하여 감마선 검출기를 개발하고 그 특성을 살펴보았다. Ti/Au의 두께비를 조절하여 상전이 온도의 제어가 가능하며 현재 약 100 mK 정도의 상전이 온도를 추구한다. 또한 습식 식각법으로 완성된 TES 센서 주변부 Ti를 과식각 시킴으로써 불완전 형상적 요소를 제거하였다. 감마선 흡수체로는 고순도 bulk Sn을 선택, TES에 부착시켜 감마선에 노출시키고 그 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 현재 59.5 keV의 감마선에 대하여 약 900 eV의 분해능을 보이고 있으며, 고분해능 감마선 검출기로서는 좀더 높은 성능이 필요하다. 여기에 몇 가지 소자의 성능개선과 측정의 최적화를 제시할 수 있다. 먼저 TES 소자에 있어서 우수한 극저온 특성, 즉, 안정된 상전이 온도와 급격한 상전이 폭을 가져야 한다. 동시에 감마

선에 의한 즉각적인 반응을 얻어내기 위해 흡수체와 TES와의 열적 연결을 원활하게 하는 방법이다. 즉, 수작업에 의존하는 흡수체와의 부착방법을 개선하여 에폭시의 양 조절과 TES/흡수체간 간격을 일정하게 유지시키기 위한 사잇띠우개의 적용 및 흡수체의 구조개선 등이다. 또한 전용 SQUID 시스템과 함께 내부 병렬저항의 최적화 등이 검토되고 있다.

요약하면 보다 안정된 검출 소자를 개발하고 측정 조건을 최적화하여 상용 Ge 검출기 이상의 감마선 검출 능력을 갖도록 지속적인 연구가 필요하다.

References

- [1] D. T. Chow et al., "Gamma-ray spectrometers using a bulk Sn absorber coupled to a Mo/Au multilayer superconducting transition edge sensor", Nucl. Instr. and Meth. A 444, 196-200 (2000).
- [2] R. D. Horansky et al., "Superconducting absorbers for use in ultra-high resolution gamma-ray spectrometers based on low temperature microcalorimeter arrays", Nucl. Instr. And Meth. A 579, 169-172 (2007).
- [3] J. N. Ullom et al., "Multiplexed microcalorimeter arrays for precision measurements from microwave to gamma-ray wavelengths", Nucl. Instr. And Meth. A 579, 161-164 (2007).
- [4] B. L. Zink et al., "Array-compatible transition-edge sensor microcalorimeter γ -ray detector with 42 eV energy resolution at 103 keV", Appl. Phys. Lett. 89, 124101 (2006).
- [5] W. B. Doriese et al., "14-pixel, multiplexed array of gamma-ray microcalorimeters with 47 eV energy resolution at 103 keV", Appl. Phys. Lett. 90, 193508 (2007).
- [6] K. D. Irwin et al., "An application of electothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection", Appl. Phys. Lett. 66, 1998-2000 (1995).
- [7] G. C. Hilton et al., "Microfabricated transition edge x-ray detectors", IEEE Trans. Appl. Supercond. 11, 739-742 (2001)
- [8] K. Tanaka et al., "Strong, easy-to-manufacture, transition edge x-ray sensor", Appl. Phys. Lett. 77, 4196-4198 (2000).
- [9] J. M. Martinis, G. C. Hilton, K. D. Irwin and D. A. Wollman, "Calculation of T_C in a normal-superconductor bilayer using the microscopic-based Usadel theory", Nucl. Instr. and Meth. A 444, 23-27 (2000).
- [10] Y. H. Lee and Y. H. Kim, "Fabrication of superconducting transition edge sensors using Ti/Au bilayer", unpublished.