

Heat Flow Studies in Low Temperature Detectors

Il Hwan Kim, Min Kyu Lee, Yong-Hamb Kim *

Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Korea

(Received 2 September 2010 revised or reviewed 4 October 2010 accepted 4 October 2010)

저온검출기의 열전도 연구

김일환, 이민규, 김용함*

Abstract

Low temperature micro-calorimeters have been employed in the field of high resolution alpha spectrometers. These alpha detectors typically consist of a superconducting or metal absorber and a temperature sensor. The temperature sensor can be a transition edge sensor (TES), a metallic magnetic calorimeter (MMC) or other low temperature detectors for an accurate measurement of temperature change due to an alpha particle absorption. We report a recent study of the heat flow between a replaceable absorber and a temperature sensor. A piece of gold foil in $2.4 \times 2.7 \times 0.03 \text{ mm}^3$ is used as an absorber. A $40 \mu\text{m}$ diameter Au:Er paramagnetic sensor is attached to another small piece of gold foil in $400 \times 200 \times 30 \mu\text{m}^3$ to serve as the temperature sensor. This sensor assembly, Au:Er and gold foil, is placed on a miniature SQUID susceptometer in a gradiometric configuration. The thermal connection between the absorber and the sensor was made with three gold bonding wires. The measured thermal conductance shows a linear dependence to the temperature. The values are in a good agreement with Wiedemann-Franz type thermal conductance of the gold wires.

Keywords : Micro-calorimeter, Heat flow, Alpha spectrometry

I. Introduction

최근 20년은 초전도소자를 이용한 정밀측정 기술을 활용하는 저온검출기의 연구가 활발히 진행되었고 여러 측정분야에서 기존기술을 대체하거나 새로운 측정을 가능하게 하고 있다. 특히 방사선(능) 측정의 경우 우수한 에너지 분해능 측정의 장점을 가진 차세대 알파 및 감

마 분광기들로 개발되고 있다.

알파분광법(Alpha spectrometry)은 방사능물질의 정량 및 핵종 분석 방법으로 널리 이용되고 있으며, 핵물리 연구, 환경방사능측정, 핵 활동 감시 등에서 중요한 역할을 한다. 기존의 실리콘 기반의 반도체 검출기는 그 편리성으로 인해 널리 쓰이고 있으나 약 10 keV의 분해능 한계를 갖는다. 이는 반도체에서 검출 시 생성되는 전자와 정공의 수의 통계적 분산에 기인한 Fano limit이라는 근본적 한계를 갖고 있다 [1]. 실제 널리 사용되는 반도체 검출기는 20 keV

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5953

e-mail : yhkim@kriss.re.kr

근처의 에너지 분해능을 보인다. 이로 인해 비슷한 영역대의 방사능 에너지를 방출하는 핵종 분석에 있어 오차를 동반하거나 핵종 구별이 불가능할 경우도 있다.

저온검출기 경우 Fano limit의 영향 없이 에너지 분해능을 극대화 시킬 수 있다. 현재 저온검출기인 초전도 상전이 센서(Transition Edge Sensor, TES)와 자기양자센서(Metallic Magnetic Calorimeter, MMC)를 이용한 알파 검출기는 1~3 keV의 높은 에너지 분해능을 보이고 있다 [2, 3].

본 논문은 저온검출기를 구성하는 개체간의 열 전달(heat transfer)에 대한 연구를 통하여 검출기제작과 응용에 필수적인 물리적 현상을 이해하고 열 전달 모델을 확립하는데 있다.

II. Detection principle and geometry

일반적인 저온검출기는 흡수체와 온도센서로 구성되어 있다. 측정하고자 하는 입자가 흡수체에 에너지(E)를 전달하면 작은 온도변화($\Delta T = E/C$)를 유발한다. 여기서 C 는 검출기 구성요소의 전체 열용량(Heat capacity)이다. 이 온도변화를 온도센서를 이용하여 정밀 측정하면 초기에 전달된 에너지 크기를 알 수 있다. 온도 측정 정밀도와 반응시간 등을 고려하여 알파선과 감마선 측정에서는 초전도 상전이 센서와 자기양자센서가 온도센서로 연구되고 있다.

자기양자센서는 온도변화에 따른 센서물질(Au:Er)의 자화(Magnetization) 변화(ΔM)를 초전도양자간섭계(SQUID)를 이용하여 측정한다.

자기양자센서를 이용하면 알파선원이 방출하는 알파선 에너지 측정 검출기(일반적인 알파분광기)뿐만 아니라, 방사성 선원을 흡수체로 완전히 감싸 4π 측정을 가능하게 한다 [4]. 금속 막 사이에 소스물질을 넣고 접어서 밀봉하여 4π 구조를 갖게 하면 전체 붕괴 에너지를 측정할 수 있고, 흡수체 안의 모든 알파붕괴가 측정 가능하여 절대 붕괴 수를 측정할 수 있다. 이 방법을 이용하면 알파분광법의 소스선원에서의 에너지 잃음(straggling effect) 현상이 없는 것도 큰 장점이다.

자기양자센서는 흡수체의 한쪽 면에 온도센

서인 Au:Er을 붙여 SQUID위에 직접 위치 시켜 온도변화에 따른 자화 변화를 측정한다 [5]. 이때 흡수체의 크기는 SQUID 칩 크기의 제한을 받게 된다. 그리고 자기양자센서의 4π 흡수체 실험은 측정 소스에 따라 흡수체를 바꿔주며 실험해야 하고, 알파분광법의 경우도 딸핵의 흡수에 흡착된 오염을 최소화 해야 하기 때문에 흡수체 교체가 필수적일 수 있다. 그래서, 교체를 용이하게 하는 방법으로는 흡수체와 센서를 분리하여 서로 열적인 접촉을 만드는 것을 생각할 수가 있다. 이와 같은 이유로 본 논문에서는 흡수체와 센서 사이를 금선을 통해 연결하고, 그에 관한 열 전달에 대해 연구하였다.

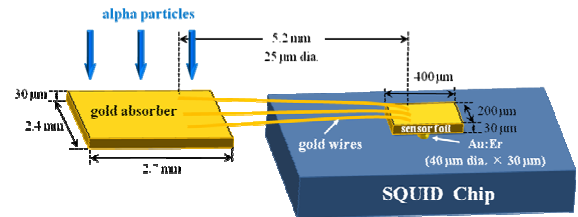


Fig. 1. Schematic view of SQUID chip, sensor foil and gold absorber.

이 실험에서 고려한 흡수체와 온도센서와의 열적 연결(Thermal contact)을 Fig. 1에 나타내었다. 우선 $200 \times 400 \times 30 \mu\text{m}^3$ 크기의 금 포일에 $40 \mu\text{m}$ 지름에 두께 $30 \mu\text{m}$ 의 Au:Er 센서를 붙여 기존 방식과 같이 SQUID 칩 위에 위치 및 고정을 시킨다. 그리고 더 큰 크기를 갖는 $2.4 \times 2.7 \times 0.03 \text{mm}^3$ 금 포일 흡수체를 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열처리하고, 옆에 위치시켰고, 두 금 포일을 5.2mm 길이의 3개의 금선으로 연결하였다. 이 과정 중 SQUID 칩, 센서 포일 및 금 포일 흡수체를 고정하기 위해서 글루(glue)를 사용하였다.

이와 같은 구조에서는 흡수체의 크기를 원하는 대로 제작 가능하게 되고, 소스를 바꿔가며 실험할 때 번거로웠던 준비과정을 손쉽게 흡수체만 바꿔 실험할 수 있게 된다 [6].

III. Thermal model

검출기의 요소들 각각의 독립된 열용량과 상

호 또한 외부로의 열 전달 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 알파선의 운동에너지(E)가 흡수체(C_1)에 입사하여 열에너지로 변환되어 온도변화를 발생하고, 발생한 열은 G_1 과 G_4 를 통하여 전달되게 되는데, 대부분의 열은 G_1 을 통해 온도센서인 C_2 로 전달된다. 이렇게 C_2 로 전달된 열은 다시 G_2 를 통해 SQUID 칩과 G_3 를 통하여 BATH로 전달되어 다시 원래 온도로 돌아가게 되고, 이 과정에서 온도센서인 C_2 의 온도를 측정하는 것이다. 여기서 C 는 각 요소들의 열용량을 나타내고 G 는 각 요소간의 열전도도(Thermal conductance)를 말한다. 이때 G_1 으로 사용된 금선은 무시할 수 없는 자체 열용량을 갖으므로 금선의 열용량 1/2을 흡수체로 나머지를 온도 센서부로 귀속하는 근사를 할 수 있다. SQUID 칩에서는 바이어스 전류와 Shunt 저항에 따른 차폐 발열이 발생하는데, 이를 \dot{Q} 로 나타내었다.

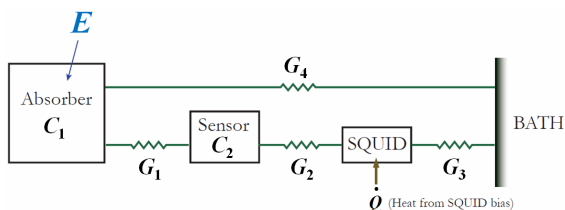


Fig. 2. Thermal model of the current experiment

IV. Characteristics

^{241}Am 알파 선원을 사용하여 약 5.5 MeV에 해당하는 에너지가 흡수체에 전달이 되었을 때 시간에 따른 온도의 변화를 측정하였다. 열용량과 열전도도의 정보를 얻기 위하여 Fig. 2에서 보인 모델의 일반 해는

$$\Delta T_2(t) = -A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} + A_3 e^{-t/\tau_3} + A_4 e^{-t/\tau_4} \quad (1)$$

으로 가정하고 각 상수를 Non-linear least squared fit을 이용하여 구하였다. 이때 $\Delta T(t=0, \infty) = 0$ 의 초기와 말기 조건을 만족한다.

또, 측정온도인 100 mK이하에서는 금선 G_1 이 글루 $G_{2,3,4}$ 보다 매우 큰 열전도도를 갖게 된다. 그래서, 식 (1)의 첫째 항이 신호펄스의

rise part에 대하여 τ_1 은 흡수체와 온도센서간의 열 평형에 이르는 시간을 의미하고, $C_1 \gg C_2$ 이므로

$$\tau_1 \cong C_2 / G_1 \quad (2)$$

으로 근사 할 수 있다. 또한 $A_i = E / \sum C_i$ 의 관계를 갖고 다른 항의 A_i 와 τ_i 은 검출기 모델 구성 요소들의 열용량과 열 전달의 복잡한 함수이다. 이 논문에서는 자세한 상관관계는 다루지 않고 금선의 열 전달에 관한 논의로 국한한다.

하나의 알파입자 흡수에 따른 온도신호를 각각 다른 BATH 온도에 따라 측정된 결과와 이를 식 (1)을 이용하여 나타낸 근사함수를 Fig. 3에 나타내었다. BATH 온도에 따라 신호크기와 decay time이 확연하게 다를 것을 왼쪽 그림에서 알 수 있다. 오른쪽 그림은 짧은 시간의 온도 변화를 알 수 있게 하였다. 모든 온도에서 측정과 근사함수가 빠른 시간과 긴 시간에 대해 잘 일치함이 보여진다. Rise time에 해당하는 τ_1 은 모든 온도에서 비슷한 값으로 약 1 ms으로 나타내었다.

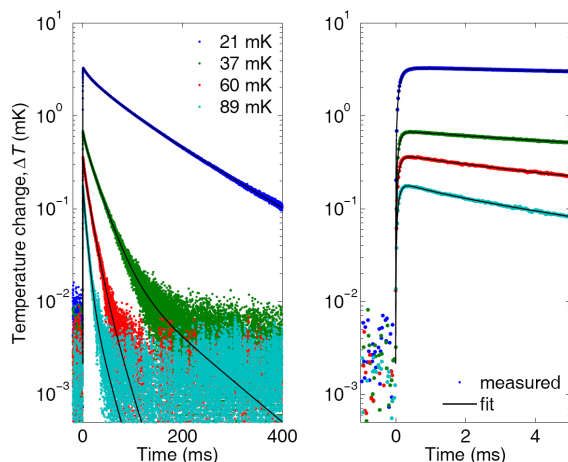


Fig. 3. Temperature response from an alpha absorption. The measured pulses are compared with their corresponding fits at 4 different temperatures as described in text. (Left) Long time scale. (Right) Initial part of the pulse.

저온에서 금속에서의 열 전달은 전도전자에 의해 이루어지고 이는 금속의 저항과 밀접한

관계가 있다. 일반적으로 금속의 열전도율 (Thermal conductivity, κ)는

$$\kappa = L_0 \sigma T \quad (3)$$

으로 나타내어진다. 여기서 σ 은 금속의 전기 전도도(electrical conductivity), T 는 온도이고, L_0 는 Lorenz 상수로 $L_0 = 2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ 이다. 이 관계는 Wiedemann-Franz 공식 [7]으로 알려져 있다.

온도센서와 흡수체와 연결은 Wedge bonder에서 일반적으로 사용하는 지름 $25 \mu\text{m}$ 의 금선을 이용하였고 저온에서 $2.5 \text{ m}\Omega/\text{mm}$ 의 저항을 갖는다. 이 값은 20 cm 의 금선을 4.2 K 액체헬륨에서 측정된 값이다. 이제 Wiedemann-Franz 공식을 이용하여 열전도도(Thermal conductance)를 계산할 수 있는데 측정값과의 비교를 Fig. 4에 나타내었다.

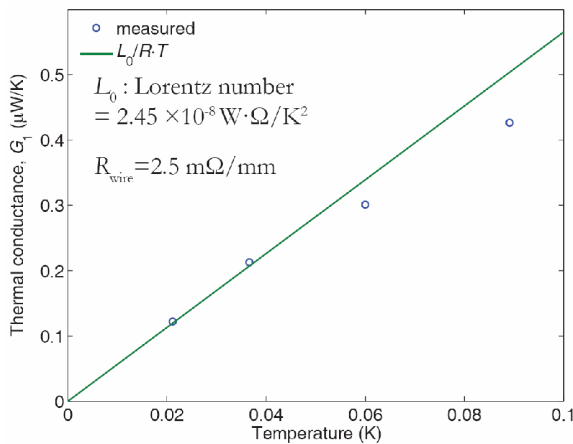


Fig. 4. Comparison of measured and expected thermal conductance of gold wires.

우선 측정값이 계산 값과 잘 일치하고, 온도에 비례함을 알 수 있다. 이 결과는 저온에서의 금선에 의한 열 전달이 Wiedemann-Franz 공식을 이용하여 예측할 수 있고 이를 활용하여 흡수체와 온도센서간의 열 접촉을 금선으로 하여 흡수체 교체를 용이하게 하고 신호의 빠르기도 예측할 수 있다는 의미를 갖는다.

V. Alpha-ray spectrum

알파 입자 흡수에 따른 온도변화의 크기는 알파입자의 운동 에너지에 비례한다. 측정된 신호 크기의 분포(pulse height distribution)를 구하면 알파입자의 에너지 분포에 기인하는 검출기의 분해능을 알 수 있다. 이 실험에 얻은 ^{241}Am 의 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. ^{241}Am 은 에너지가 각각 5388 keV (1.4%), 5443 keV (12.8%), 5486 keV (85.2%)인 세 개의 주요 알파선을 방출한다 [8]. 이 에너지는 서로 가까운 위치에 있어 만약 검출기의 분해능이 좋지 않을 경우 이웃한 알파선간에 분리가 어렵고, 오직 하나의 피크로만 스펙트럼에 나타나게 될 것이다. 본 실험에서는 10 keV 의 FWHM (Full width at Half Maximum) 에너지 분해능을 보여 이 세 개의 주요 알파선을 확실하게 구분할 수 있었다. 이는 일반적인 알파선 검출기로는 측정이 어려운 우수한 결과이다.

측정한 분해능 한계는 대부분 SQUID의 잡음에 기인하였다. 백색잡음(white noise)은 약 $20 \mu\Phi_0/\text{sqrtHz}$ 였는데 이는 일반적으로 사용 가능한 SQUID의 잡음보다 열배 이상 안 좋은 수치이다. 측정된 10 keV 의 분해능은 잡음이 적은 다른 SQUID를 사용함으로 개선이 가능하다.

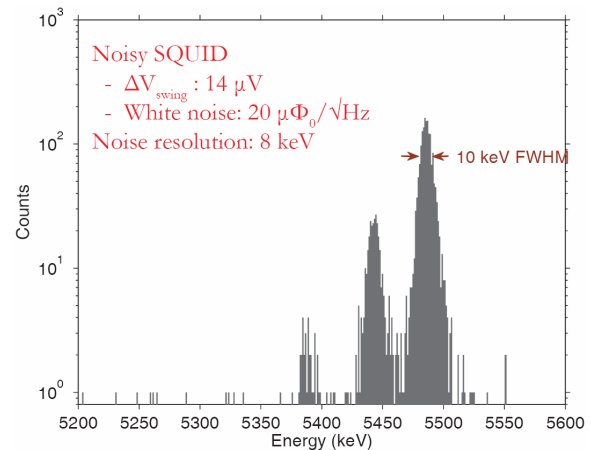


Fig. 5. Alpha energy spectrum of an ^{241}Am source. The measured FWHM was 10 keV .

IV. Conclusion and Future works

본 논문에서는 저온검출기를 기반으로 한 자기양자센서를 개발하여 ^{241}Am 을 알파 선원으로 사용하여 열 전달 특성과 알파 에너지 스펙트럼에 대해 알아 보았다.

또한, 기존의 자기양자센서는 흡수체의 크기 제한과 그에 따른 4π 흡수체 제작의 어려움 및 실험준비의 번거로움이 있었다. 그래서 이를 보완하기 위해 센서 포일과 흡수체를 따로 만들고 금선으로 열적 접촉하는 시스템을 개발하였다. 이와 같은 작업으로 크기 제한 및 4π 흡수체 제작의 어려움을 해결하였으며, 이제 매 실험 때 마다 흡수체만 교체하여 측정이 가능하게 되었다.

센서 포일과 흡수체를 금선으로 연결한 열 전달 시스템에 관해서는 온도에 따른 금선의 열 전달계수(thermal conductance) G_1 과 Wiedemann-Franz law 곡선을 비교한 결과 온도에 비례하고, 값의 크기 또한 이론 값과 일치 하였다.

이 결과를 바탕으로 현재 개발 연구 중인 meander 구조 [9]와 4π 흡수체를 사용하여 알파 에너지를 측정할 예정이다.

References

- [1] E. Steinbauer et al., "Energy resolution of silicon detectors: approaching the physical limit", Nucl. Instr. and Mech. B, 85, 642-649 (1994).
- [2] Robert D. Horansky et al., "Superconducting calorimetric alpha particle sensors for nuclear nonproliferation applications", Appl. Phys. Lett., 93, 123504 (2008).
- [3] Ranitzsch P. C. et al., "Development of cryogenic alpha spectrometers using metallic magnetic calorimeters", submitted in Nucl. Instr. and Mech. A.
- [4] Sang-Jun Lee et al., "Cryogenic measurement of alpha decay in a 4π absorber", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 37, 055103 (7pp) (2010).
- [5] C. Enss(Editors), "Cryogenic Particle Detection", Springer, 151-216.
- [6] I. H. Kim, "Development of cryogenic detectors for high resolution radioactivity measurement", Daejeon University, Master's thesis, DM037063 (2010).
- [7] F. Pobell, "Matter and Methods at Low Temperatures", Third, Revised and Expanded Edition, Springer, 3.3.5, 72-73 (2006).
- [8] Basunia M. S. "Nucl. Data Sheets" **107**, 3323 (2006), <http://www.nndc.bnl.gov/chart/decaysearchdirect.jsp?nuc=241AM&unc=nds>.
- [9] A. Burck et al., "Microstructured Magnetic Calorimeter with Meander-Shaped Pickup Coil", J. Low Temp. Phys. 151, 337-344 (2008).