

인덕턴스 복사계 측정을 위해 사용된 초전도 자속 흐름 센서기 모델링

고석철*, 강형곤**, 임성훈*, 최명호***, 한병성*

전북대 전자정보공학부*, 전북대 반도체물성연구소**, 광주보건대 의료정보공학부***

Modeling of a Superconducting Flux Flow Sensor Inductance Radiometer

Seokcheol Ko*, Hyeong-Gon Kang**, Sung-Hun Lim*, Myongho Choi***, Byoung-Sung Han*

Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University*,

Semiconductor Physics Research Center, Chonbuk National University**,

Department of Medical Information Engineering, Kwangju Health College***

Abstract

For use in constructing highly sensitive thermal detectors, the present authors have been studying the preparation of Superconducting Flux Flow Sensor(SFFS). In this research, SFFS with five channel ($5\mu\text{m}/1\text{channel}$) has been fabricated based on the flux flow using high temperature superconducting thin films by the ICP etching technique. We have designed a bolometer based on the temperature dependence of the kinetic inductance of a superconducting flux flow thin film. In this paper examines the fabrications and flux flow resistance and thermometer responses of the highly sensitive sensor constructed of a thin YBCO film. It is also suggested that they will be applicable to a new type of flux flow sensor.

Key Words : thermal detectors, flux flow sensor, bolometer.

1. 서 론

고온 초전도체가 발견된 이후로 초전도체의 응용은 많은 분야에서 시도되고 있으며 그 중 가장 실용화에 근접되어 있는 것으로 초전도 센서 분야가 주목을 받고 있다. 이는 초전도 상태에서 상전도 상태로 혹은 상전도 상태에서 초전도 상태로의 상전이 발생되는 저항의 변화를 디바이스의 동작으로 응용할 수 있기 때문이다. 고온 초전도체의 전자소자의 응용은 초전도 산업화를 위해서도 대단히 중요한 의미를 갖는다. 특히 YBCO계 초전도체는 외부로부터 자계를 인가하면 전압이 발생하게 되는데 외부 자계를 소거한 후에도 출력전압이 유지되는 물리적 현상이 있다. 이 현상을 자기적 효과라고 한다. 이는 다결정 입계로 구성되어 있는 산화물 초전도체가 갖

는 특징이며 자계를 인가함과 동시에 초전도체에 발생하는 출력전압이 변화하는 현상을 주목하면 간단한 고감도 초전도 자기센서로서 응용할 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 이 대안으로써 혼합상태에서 발생한 상전도 볼텍스를 이용한 초전도 자속 흐름 센서(SFFS)를 제안하고자 한다. 이는 초전도 자속 흐름 트랜지스터는 볼텍스 들을 형성할 수 있는 약 결합을 인위적으로 만들어 이를 채널층으로 사용하는 센서기로 재현성 있는 채널 제작이 핵심기술이라고 할 수 있다.

적외선 영상 감지 소자에는 감지방식에 따라 크게 광자형 감지기와 열형 감지기로 나눌 수 있다. 광자형 감지기는 응답속도가 빠르고 감지도가 뛰어난 반면 파장이 제한적이고 냉각 시스템이 필요하여 가격

이 높은 단점이 있다. 반대로 열형 감지기는 감지도는 광자형보다 떨어지지만 넓은 파장대에서 사용이 가능하고 냉각 시스템이 필요가 없고 가격이 저렴하여 산업용, 의료용 등에 폭넓게 이용되어지고 있다. 열형 감지기에는 크게 초전형 감지기, 열전대형 감지기, 마이크로볼로미터로 나눌 수 있는데 초퍼회로가 필요 없고 모노리틱한 소자제작이 용이한 볼로미터에 관한 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다.

볼로미터는 입사된 빛이 물질의 온도를 변화시키고 그에 따른 저항값이 변화하는 특성을 이용한 것이다. 볼로미터의 성능을 향상시키기 위한 방법으로는 높은 TCR(Temperature Coefficient of Resistance) 값을 가지는 흡수층의 개발과 열전도도를 낮추기 위한 열적고립구조의 제작 및 빛을 효과적으로 흡수층에 모으는 방법 등이 있다.

본 논문에서는 볼텍스 형성을 이용한 자속 흐름 센서기를 입사하는 복사계의 측정하기 위해 사용되었다. 먼저 고온 초전도 자속 흐름 센서기는 새로운 반도체 식각 장비인 ICP 장치를 이용하여 채널을 제작하고 이의 특성을 조사한다. 이렇게 만들어진 SFFS의 입력라인에 열탐지기 센서들을 구성하고 바이어스 전류라인에 유기되는 출력 전압식을 유도하고 모델링한다. 전체적인 센서기의 이론적인 모델을 구축하고 YBCO 박막으로 구성된 고감도 센서기의 특성을 해석한다. 이런 이론적인 모델링을 바탕으로 고온초전도 자속 흐름 트랜지스터는 적외선 볼로미터 센서 등에 적용될 수 있음을 제안한다.

2. 모델

2.1 열형 감지기의 전체적인 구조

그림 1은 동적 인덕턴스 이론에 기초를 둔 브리지 장치로 방사계 측정을 위해 초전도 스트립라인과 초전도 자속 흐름 트랜지스터로 구성된 새로운 타입의 센서기이다. 브리지 장치는 초전도체 약결합 회로로 구성된 4개의 인덕터들 사이에 온도차를 감지한다. 히터전류 I_{HTR} 가 변화함에 따라 인덕터 L_1 이 변하게 되어 브리지 차동전류가 발생된다. 이 차동전류는 고온 초전도 자속 흐름 트랜지스터 입력 제어전류 I_{com} 이 된다. 이 전류는 자계를 발생하여 채널부 위에서 볼텍스를 형성하여 출력전압을 유기한다. 브리지의 인덕터는 이상적이라 가정하고 $L_1 = L_3$,

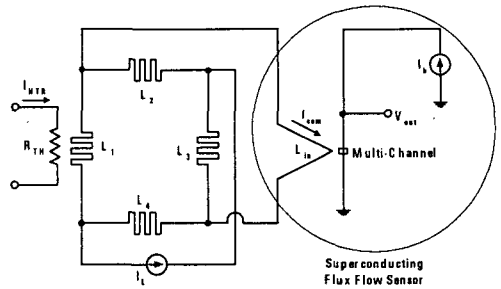


그림 1. 열형 감지기의 전기적인 회로 구조

$L_2 = L_4$ 이다. 열감지의 전류와 인덕터 관계식은 다음의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$I_{com} = I_L \ln 2(L_{in} + L_1) \quad (1)$$

여기서 I_L 은 브리지의 유도전류이고, L_{in} 은 제어전류라인의 인덕턴스이다.

2.2 초전도 자속 흐름 센서 모델

한 개의 약결합 채널을 가지고 있는 자속 흐름 트랜지스터의 모델은 Martens에 의해 처음으로 제안되었다[1]. 그 후로 많은 학자들이 약결합 부분에서의 볼텍스 거동에 관한 연구를 해오고 있다.

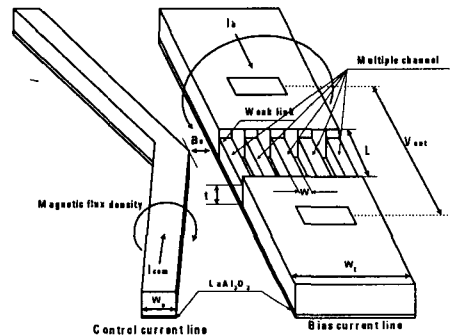


그림 2. 다채널 초전도 자속 흐름 센서기의 입체적 구조

볼텍스 채널폭을 마이크로 단위로 좁게 만든다면 응답시간은 상당히 향상시킬 수 있을 것이다. 그러한 브리지를 마이크로브리지라 부르고 브리지 치수는 효과적인 침투깊이 $\lambda_{eff} \approx \lambda^2/t$ 보다 훨씬 작다. 여기서 λ 는 런던 침투깊이이다. 강한 척력이 브리지 외부의 볼텍스에 작용하기 때문에 단지 하나의 아브

리코소브 볼텍스가 마이크로브리지 채널내부에 존재할 수 있다. 다채널 SFFS (Superconducting Flux Flow Sensor)의 구조를 그림 2에 보여주고 있다. 이런 다채널 SFFS는 ICP (유도 커플링 플라즈마) 장비라는 마이크로 패터닝 기술을 사용하여 제작할 수 있다. 제작과정은 식각기술에 관한 논문들에서 자세히 설명되고 있다[2], [3], [4].

2.3 볼텍스에 유기된 전압 방정식

혼합상태에서 볼텍스가 형성되어서 전류는 이 볼텍스를 이동시키기 때문에 바람직한 에너지 소비가 발생된다. 볼텍스들이 바이어스 전류 I_b 가 흐르고 있는 두께 t , 채널의 거리 L , 채널의 폭 w 을 가지고 있는 채널부분에서 거동할 때 채널부분의 단자에서 유기되는 전압의 크기는 다음과 같이 표현될 수 있다[5].

$$V_{out} = nLv_L\phi_0 \quad (2)$$

여기서 n 은 볼텍스 표면 밀도이고, v_L 은 볼텍스 평균 속도이다. 이 볼텍스의 흐름은 초전도 선재에서 낮은 임계전류밀도의 원인이 되기도 하여 이의 편고정을 위해 초전도체를 제작할 때 상전도 물질을 소량 첨가하기도 한다[6].

자속 열유동 지역에 전압은 아래와 같다[참고문헌].

$$V_{out} = \left\{ \frac{\mu_0 \cdot L \cdot v_{L0} \cdot \exp(-E_p/k_B T)}{t} \right\} \left\{ I_b - \left[I_{cro} - \frac{2t \cdot B}{\mu_0} \right] \right\} \times \sin h \left[\frac{I_b}{(w \cdot k_B \cdot T / (\delta \cdot \phi_0))} \right] \quad (3)$$

여기서 μ_0 와 v_{L0} 는 투자율과 볼텍스 초기 속도이고, t 와 k_B 는 바디라인의 채널부위의 약결합 링크의 두께와 볼츠만 상수를 나타낸다. 또한, T 와 I_{cro} 는 절대온도와 임계전류를 뜻하고, δ 와 ϕ_0 는 편고정 포텐셜 범위와 양자속의 최소단위를 나타낸다. E_p 는 편고정 에너지를 뜻한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자속밀도 계산 방법

방정식 (3)의 자속밀도 B 는 제어전류 I_{com} 에 의해 발생된다. 채널부분은 바이어스 전류 I_b 가 임계전류

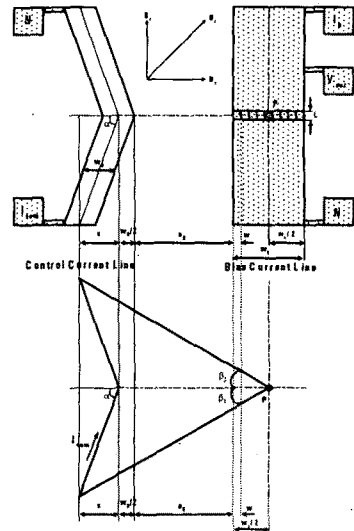


그림 3. 다채널 자속 흐름 센서기에서 자속밀도를 표현하는 비오-샤바르 법칙

I_{cro} 보다 크므로써 혼합상태가 된다. 제어전류에 의해 발생된 외부 자계 B 는 y 축으로 진행하는 외부 자계 B_y 를 계산한다. 여기에서 z 축으로 진행하는 외부 자계 B_z 는 무시한다. 단지 외부 자계 B_y 만을 고려한다면 그림 3처럼 도선에 유한장 전류를 흘렸을 때의 자계를 비오-샤바르 법칙을 사용하여 y 축으로 진행하는 외부 자계를 구할 수 있다. 비오-샤바르 법칙을 이용하여 P 점에서의 자속밀도는 다음과 같다.

$$B = \mu_0 H_p = \left\{ \frac{\mu_0 \cdot \sin \alpha \cdot I_{com}}{2\pi(x + w_0/2 + a_0 + w/2)} \right\} \times \left\{ \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha \cdot I_{com}}{(x + w_0/2 + a_0 + w/2)} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

여기서 x 는 제어 전류라인의 중심선으로부터 제어 전류의 양끝까지의 직선거리이며 α 와 w 는 제어 전류라인의 중심각과 바이어스 전류라인의 폭을 의미한다. 식 (1), (3), (4)으로부터 센서기의 출력전압 방정식을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$V_{out} = \left\{ \frac{\mu_0 \cdot L \cdot v_{L0} \cdot \exp(-E_p/k_B T)}{t} \right\} \left\{ I_b - \left[I_{cro} - \frac{t \cdot \sin \alpha \cdot I_L \cdot \ln 2(L_{in} + L_1)}{\pi(x + w_0/2 + a_0 + (N_{ch} - 0.5)w)} \right] \right\} \times \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha \cdot I_L \cdot \ln 2(L_{in} + L_1)}{x + w_0/2 + a_0 + (N_{ch} - 0.5)w} \right) \right) \times \sin h \left[\frac{I_b}{(w \cdot k_B \cdot T / (\delta \cdot \phi_0))} \right] \times [2(N_{ch} - 0.5)]^{1/3} \quad (5)$$

여기서 N_{ch} 는 채널의 개수를 나타낸다. 만약 입력 제어전류가 없을 때 출력전압을 표현하면 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 이 전압은 볼텍스에 의해 생긴 자체적인 전압이다.

$$V_0 = \left\{ \frac{\mu_0 \cdot L \cdot v_{ID} \cdot \exp(-E_g/k_B T)}{t} \right\} [I_b - I_{cro}] \times \sin h \left[\frac{I_b}{(w \cdot k_B \cdot T) / (\delta \cdot \phi_0)} \right] [2(N_{ch} - 0.5)^{1/3}] \quad (6)$$

4.2 전류와 전압 특성

고온 초전도 볼텍스 흐름 트랜지스터는 YBCO 초전도 박막을 ICP장비를 이용하여 채널두께를 400nm로 식각하였다. 볼텍스 흐름 채널부분크기는 채널폭 $w=45\mu m$, 채널길이 $L=3\mu m$ 로 제작하였다. 약결합 부분이 너무 커서 조셉슨 효과는 발생하지 않는다. 이 실험에서 사용된 박막은 85.5 K의 임계온도를 가졌다.

그림 4는 초전도 자속 흐름 트랜지스터의 기본적인 등가회로를 보여주고 있다. 그림 5는 초전도 자속 흐름 센서기의 출력 I-V 특성곡선과 볼로미터의 입력파라미터들에 따라 출력전압 변화량이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다.

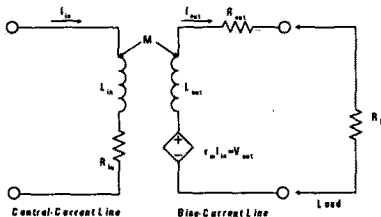


그림 4. 자속 흐름 트랜지스터의 등가회로

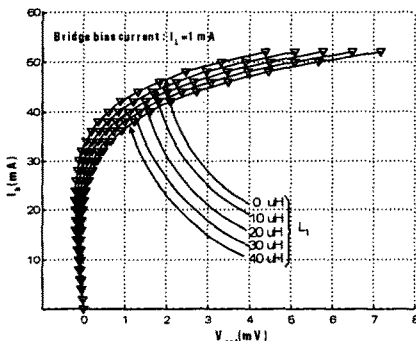


그림 5. 자속 흐름 센서기의 I-V 곡선

4 결론

볼텍스 형성을 이용한 자속 흐름 센서기를 입사하는 복사계의 측정하기 위해 사용되었다. 먼저 고온 초전도 자속 흐름 센서기는 새로운 반도체 식각 장비인 ICP 장치를 이용하여 채널을 제작하고 이의 특성을 조사하였다. 이렇게 만들어진 SFFS의 입력라인에 열탐지기 센서들을 구성하고 바이어스 전류라인에 유기되는 출력 전압방정식을 유도하고 모델링하였다. 이 방정식은 디바이스들을 제작하기 전에 전류-전압 곡선을 예상할 수 있어 공정기술에 많은 도움을 줄 것이다. 이런 이론적인 모델링을 바탕으로 고온초전도 자속 흐름 트랜지스터는 적외선 볼로미터 센서 등에 적용될 수 있음을 제안하였다.

참고 문헌

- [1] J. S. Martens, J. H. Thompson, J. B. Beyer, J. E. Nordman, and G. K. G. Hohenwarter, "Characteristics of superconducting flux-flow transistor." *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 27, PP. 3297-3300, March 1991.
- [2] Y. H. Im, H.-G. Kang, B-S. Han, and Y. B. Hahn, "High Density Plasma Etching of YBaCuO Superconductors." *Electrochemical and Solid-state Lett.* Vol. 4, PP. C77-C79, May 2001.
- [3] Hyeong-Gon Kang, etl., "Conditions of ICP for a Superconducting Flux Flow Transistor and its etching characteristics." *Matt. Sci. Eng. B*, Available online 24, April, 2003.
- [4] 강형근, 임성훈, 임연호, 한윤봉, 황종선, 한병성, "새로운 ICP 장치를 이용한 고온 초전도체의 Dry Etching과 기존의 Wet Etching 기술과의 비교." *한국전기전자재료학회*, Vol. 14, No. 2, PP.158-162, 2001.
- [5] 강형근, 임연호, 임성훈, 한병성, 한윤봉, "The Possibility of Fabrication of a New NAND logic gate by means of three terminal flux flow transistor." *제10회 한국반도체학술대회*, pp.803-804, Feb. 2003.
- [6] 강형근, 임성훈, 박성진, 한병성, "MPMG법을 이용한 YBaCuO 초전도체의 임계특성에 영향을 미치는 파라미터." *KIEE* Vol. 48c, No. 4, PP. 221-225, April, 1999.