

# 집적화된 Nb DC SQUID 소자의 제작 및 특성

이용호 · 권혁찬 · 김진목 · 박종철

한국표준과학연구원 초전도연구실

(1992년 9월 18일 받음)

입력코일과 변조코일이 박막 형태로 집적화된 planar DC SQUID를 제작하고 그 특성을 조사하였다. SQUID loop은 균일한 외부자장의 영향을 받지 않도록 두개의 ring이 '8'자형으로 직렬로 연결된 구조를 하고 있으며, 조셉슨 접합으로는 Pd shunt 저항을 가지는 Nb/Al-oxide/Nb 턴넬 접합을 이용하였다.

소자는 포토리소그라피 기술과 RF 마그네트론 스퍼터링 및 양극산화 방법으로 제작하였으며, 제작된 SQUID는 4.2 K에서 기본적인 특성을 측정된 결과 standard readout 시스템에 적합한 매끄러운 특성을 보였으며 전압 잡음은 측정할 수 없을 정도로 작아 white noise는 최대  $10^{-4} \phi_0 / \sqrt{Hz}$  이하로 나타났다. 현재 matching 코일을 사용하여 잡음 특성을 측정중에 있으며 앞으로 SQUID parameter를 최적화할 경우 매우 고감도의 자기센서로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## I. 서 론

조셉슨 효과와 자속양자화 현상을 이용하는 SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) 는 가장 고감도의 자기 센서로서 자속의 미소변화 뿐만 아니라 자속으로 변환될 수 있는 각종 물리량, 즉, 전압, 전류, 자장, 자장의 기울기, susceptibility, 변위 등의 측정이 가능하기 때문에 기초과학, 정밀의료단(심장, 뇌), 자원탐사, 지구물리학 등에 광범위하게 응용되고 있다[1].

SQUID 시스템의 성능은 센서, 자속 transformer, 신호검출기 등의 특성에 의해 결정되는데 특히 조셉슨 접합의 특성은 SQUID의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. SQUID에 사용될 수 있도록 조셉슨 접합이 가져야 할 조건은 sub-gap에서의 누설전류 및 저주파에서의 excess noise가 매우 적을 것, 반복적인 thermal cycling에 대한 접합의 안정성이 뛰어나야 하며 접합의 각종 parameter를 쉽게 바꿀 수 있어야 하며 제작상의 재현성이 양호해야 한다. Al-oxide를 접합 장벽으로 사용한 Nb/Al-oxide/Nb 조셉슨 접합은 그 특성이 가장 좋기 때문에 현재 저잡음 SQUID 센서에 가장 많이 이용되는 물질이다[2].

본 연구에서는 고감도 DC SQUID 센서를 개발하기 위하여 high quality Nb/Al-oxide/Nb조셉슨 접합의 제작 및 센서에 결합되는 코일들을 다층 박막으로 집적화 하고 제작된 센서의 각종 특성을 조사하였다.

## II. DC SQUID의 동작원리

Autonomous (uncoupled) DC SQUID는 그림 1(a)와 같이 두개의 조셉슨 접합과 초전도 ring으로만 구성되며 이때 접합의 특성은 hysteresis parameter  $\beta_c \equiv 2\pi R^2 I_0 C / \phi_0$ 로, SQUID ring의 특성은 modulation parameter  $\beta \equiv 2LI_0 / \phi_0$ 로 나타낸다. 여기서  $I_0$ ,  $R$ ,  $C$ 는 각각 접합의 임계전류, shunt 저항값, 정전용량값이며  $L$ 은 SQUID ring의 인덕턴스,  $\phi_0$ 는 자속양자( $\equiv h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$  Wb)를 나타낸다. 여기서 조셉슨 접합은 hysteresis가 없는  $I-V$  특성을 가져야 하는데 이를 위해서는  $\beta_c$ 가 1 보다 작아야 한다. 또한  $\beta$  값은 1 정도일때가 최적 조건으로 알려져 있다[3,4].

SQUID에 외부 자장이 가해질때 링을 통과하는 자속은 자속양자의 정수배가 되도록 링에 흐르는 순환 전류가 결정되며, 자속의 변화에 대한 SQUID의  $I-V$  특성 곡선은 그림 1 (b)와 같다. 결국 SQUID 양단에 일정한 바이

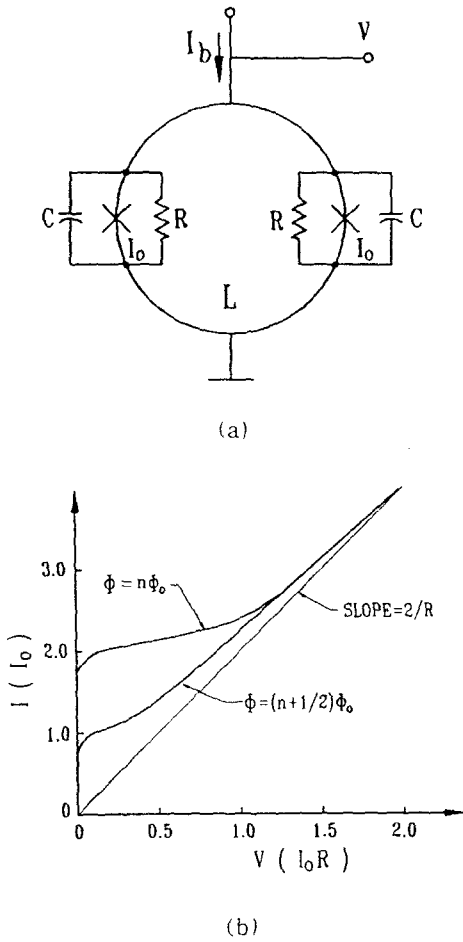


Fig. 1. (a) Electrical representation of a DC SQUID. In the presence of external flux, circulating current flows through the inductance. (b) Current-Voltage characteristics of a DC SQUID for two flux values, having an integer or a half-integer multiple of flux quanta.

어스 전류를 가한 상태에서 SQUID 양단의 전압은 자속의 변화에 대한 주기적인 변화를 하므로 자속의 측정이 가능하다.

SQUID의 고유 에너지 잡음은 접합의 shunt 저항과 관련된 전압잡음  $V_n$ 과 자속-전압 전달함수(transfer function)  $\partial V / \partial \phi$ 에 의해 표시되는 등가 자속잡음  $\phi_n = V_n / |\partial V / \partial \phi|$ 에 의해 결정되며, 측정할 수 있는 최소

의 에너지 값은 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon = \phi_n^2 / 2I_c \approx 16k_B T \left( \frac{LC}{\beta_c} \right)^{1/2}, \quad \beta_c \leq 1 \quad (1)$$

따라서 높은 에너지 감도를 갖기 위해서는 SQUID ring의 크기와 접합의 면적이 가급적 작아야 한다.  $L$ 이 증가하면 자속잡음도 증가하나 입력코일과의 결합을 좋게 하기 위해서는  $L$ 을 비교적 크게 할 필요가 있다.

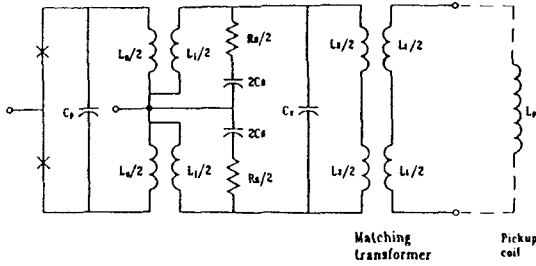
현재 개발되고 있는 DC SQUID는 대부분이 lithography 기술을 이용하여 박막으로 되어 있으며 SQUID loop 위에 변조 코일, 입력 코일이 다층 박막형태로 형성되어 있다. 따라서 SQUID의 기본동작 원리는 앞에서 보듯이 비교적 쉽게 이해할 수 있지만 실제적인 SQUID의 dynamics는 autonomous SQUID와는 달리 매우 복잡한 특성을 갖게 된다. 특히 SQUID 센서를 실제적으로 사용하기 위해서는 소자를 구성하는 재료뿐만 아니라 SQUID loop과 입력 코일간의 결합, 상능저하의 요인이 되는 각종 공명현상의 제거, 입력코일에 의한 parasitic capacitance의 영향 등을 고려하여 설계·제작해야 한다.[5-7].

그림 2(a)는 SQUID를 자력계로 이용할 경우의 실제적인 회로이다. SQUID loop은 인덕턴스  $L$ 인 입력코일과 transformer 형태로 자기적으로 결합되고 입력코일은 인덕턴스  $L_p$ 인 검출코일과 연결된다. SQUID loop 위에는 절연층을 사이에 두고 입력코일 등이 형성되어 있기 때문에 parasitic capacitance를 유발시켜 각종 공명현상의 원인이 되므로 이를 damping 하기 위해 입력코일 양단에 감쇄 저항과 감쇄 capacitor를 연결한다.

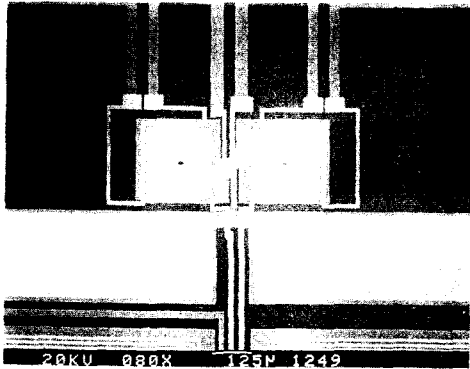
### III. 실험

#### 1. DC SQUID의 설계 및 제작

SQUID loop은 외부의 균일한 자장에 대해 전혀 영향을 받지 않도록 gradiometer 구조를 가지는 double washer 형태로서 '8'자형의 구조를 갖도록 설계했다. SQUID의 설계값은 표 I에 정리되어 있다. 대부분의 경우 인덕턴스 1  $\mu$ H 내외인 검출코일을 SQUID loop과 결합시키기 위해서는 입력코일이 100 turn 정도되어야 하는데 이때는 parasitic inductance를 줄이기 위해 선폭이 매우 작아야 하는 어려움이 따르므로 본 연구에서는 입력코일과 검출코일 사이에 SQUID loop과 비슷한 washer 형태의 matching transformer를 둔 double transformer 구조를 갖도록 하여 코일의 turn수를 줄였



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Equivalent circuit for the complete double transformer DC SQUID magnetometer.  $C_p$  and  $C_x$  denote the parasitic capacitances across the SQUID and over the intermediate transformer, respectively.  $R_s$  and  $C_s$  are used to damp the resonance in the transformer caused by  $C_x$ . (b) Close up view of the double washer SQUID loop.

다. 그림 2(b)는 제작된 소자의 SQUID loop 부분을 현미경으로 관찰한 것이다.  $16 \times 16 \mu\text{m}^2$  크기의 hole을 갖는 사각형 washer 두개가 8자형으로 직렬로 연결되어 있으며 각각의 loop 위에는 선폭  $4 \mu\text{m}$ , turn수 11인 입력코일이 결합되어 있고 parasitic capacitance의 영향을 줄이기 위해 입력코일 양단에 감쇄 저항과 감쇄 capacitor를 연결하였다. 또한 SQUID loop양쪽에 대칭적으로 1 turn 변조코일이 결합되어 있다.

SQUID의 제작은 photolithography에 의한 patterning, 스퍼터링 및 양극 산화 공정으로 이루어지며 제작 과정은 그림 3과 같다[8-11]. 먼저 조셉슨 접합과

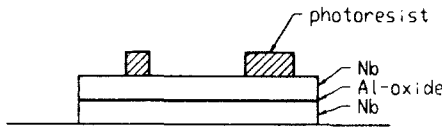
Table I. Designed values of DC SQUID.

(1) Josephson junction	
(a) Critical current	$I_c : 20 \mu\text{A}$
(b) Shunt resistance	$R : 3 \Omega$
(c) Capacitance	$C : 1 \text{ pF}$
(d) Area	$A : 16 \mu\text{m}^2$
(e) Hysteresis parameter	$\beta_c : 0.5$
(2) DC SQUID loop	
(a) Hole size	$16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$
(b) Total inductance (*)	$103 \text{ pH}$
(c) Modulation parameter $\beta$	2
(3) Input coil	
(a) Turn	11
(b) Inductance $L_i$	$8.3 \text{ nH}$
(c) Shunt resistance $R_i$	$6 \Omega$
(d) Shunt capacitance $C_i$	$0.4 \text{ nF}$
(4) Matching transformer secondary	
(a) Hole size	$1.9 \text{ mm} \times 1.9 \text{ mm}$
(b) Inductance $L_2$	$8.0 \text{ nH}$
(5) Matching transformer primary	
(a) Turn	16
(b) Effective input inductance $L_1$	$1.1 \mu\text{H}$

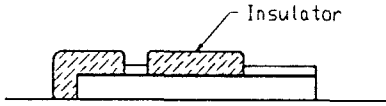
\* Total inductance is the sum of inductances due to two loops, slits and junctions.

SQUID loop을 형성하기 위하여 Nb/Al-oxide/Nb 세 층을 진공을 깨지 않고 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작한다. 여기서 하부 전극과 상부 전극의 두께는 각각  $2000 \text{ \AA}$ ,  $500 \text{ \AA}$ 이며 Al의 두께는  $50 \text{ \AA}$ 인데, Nb과 Al의 증착속도는 각각  $1000 \text{ \AA}$ ,  $160 \text{ \AA}/\text{min}$ . 이며 터널장벽을 형성시키기 위하여 Al 막막 표면을  $1000 \text{ Pa}$ 의 산소분위기에서 60분간 산화시켰다.

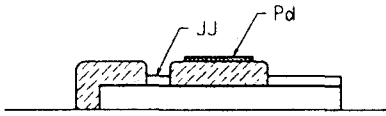
접합의 patterning은 양극산화를 이용하였고 절연막의 결함으로 인한 short를 없애기 위하여 2회의 절연과정을 거쳤다. 양극산화는 ammonium pentaborate, ethylene glycol 및 물의 혼합용액을 사용했고 백금 음극을 통한 전류밀도는 약  $0.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$  으로 constant current mode로 산화시켰다.



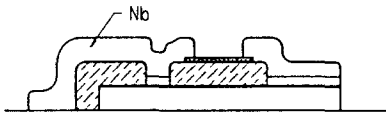
(a) Nb/Al-oxide/Nb deposition and junction patterning



(b) Insulation



(c) Pd shunt resistor deposition



(d) Interconnect deposition

Fig. 3. Fabrication steps of DC SQUID.

신뢰성과 재현성이 좋은 저항값을 얻기 위하여 shunt 저항값을 얻기 위하여 shunt 저항은 산화에 대한 저항력이 큰 Pd를 이용하였으며 증착속도는 1400 Å/min. 이며 Pd 박막의 두께로서 저항값을 조절하였다.

마지막으로 입력코일 및 wiring layer Nb를 5000 Å 두께로 증착하고 lift-off 함으로서 SQUID 센서는 완성된다.

### 2. 특성 측정

조셉슨 접합과 SQUID의 특성은 시험용 probe를 이용하여 4.2 K에서 측정하였는데 외부자기 잡음을 차폐하기 위하여 길이 9 cm인 원통형의 납을 사용하였다. I-V 특성은 4 단자 방법으로 측정하였으며, battery-powered 정전류원과 function generator, DC amp., microvoltmeter 등을 사용하였다. SQUID의 기본적인

특성으로서 외부자장의 변화에 따른 SQUID의 출력전압, 즉,  $V-\phi$  곡선과  $V_n-\phi$  특성을 함께 측정하였으며,  $V-\phi$  곡선을 얻기 위하여 SQUID loop에 인접한 변조코일을 통하여 SQUID loop에 자장을 공급하고 1  $\phi_0$ 의 변화에 필요한 전류의 크기로 부터 SQUID loop와 변조코일 사이의 상호 인덕턴스를 구하였다. 또한 같은 방법으로 matching transformer primary 코일과 SQUID loop 사이의 상호 인덕턴스도 측정하였다. SQUID의 transfer function, 즉,  $\partial V / \partial \phi - \phi$  특성은 변조코일에 매우 작은 값( $\sim 0.001 \phi_0$ )의 교류 전류를 가하고 SQUID의 출력을 lock-in amp.로 측정하므로써 구하거나  $V-\phi$  측정값으로 계산하였다[10].

## IV. 결과 및 논의

조셉슨 접합은 quality factor  $I(4 \text{ mV}) / I(2 \text{ mV})$ 가 대개의 경우 40 내외로서 누설 전류가 매우 작은 우수한 접합 특성을 나타내었으며, 또한 외부자장에 대한 임계전류의 변화를 조사한 결과 pinhole과 같은 결함이 없는 균일한 접합 장벽을 형성하고 있음을 확인하고 SQUID에 사용될 조셉슨 접합으로 매우 양호함을 알 수 있다.

그림 4는 DC SQUID의 I-V 특성을 측정한 것으로서 47  $\mu\text{V}$ , 68  $\mu\text{V}$  부근에 약간의 굴곡이 있긴 하지만 전체적으로 공명의 영향이 비교적 작게 나타났으며, 측정 결과로부터  $2I_c \sim 50 \mu\text{A}$ ,  $R_s/2 \sim 0.5 \Omega$ ,  $\beta_c = 0.04$  임을 알 수 있고, 또한 임계전류의 modulation depth  $\Delta I / 2I_c$ 로부터  $\beta \sim 2.6$ ,  $L \sim 100 \text{ pH}$ 를 구할 수 있다.

여러가지 인가전류에 대한  $V-\phi$  특성을 측정한 결과는 그림 5와 같이 나타났는데 외부자장의 변화에 대해 매우

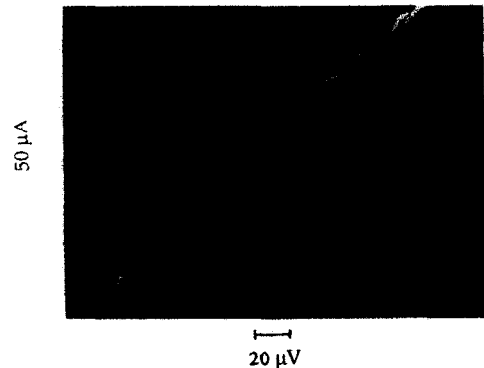


Fig. 4. Current-voltage characteristics of the DC SQUID for  $\phi = n \phi_0$  and  $\phi = (n + \frac{1}{2}) \phi_0$ .

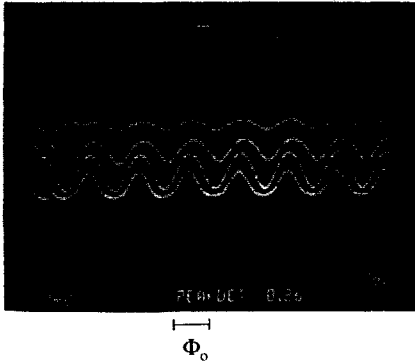


Fig. 5. Output voltage modulated by the external flux for four bias currents; 122, 130, 138, 156  $\mu$ A.

매끄러운 특성을 가지므로써 standard readout 시스템에 적합함을 알 수 있다.

Transfer function( $\partial V / \partial \phi$ )은 약  $40 \mu V / \phi_0$ 의 최대 값을 가지며 SQUID parameter를 최적화하여  $\beta \sim \beta_c \sim 1$ 이 되도록 하면 특성은 보다 향상 될 수 있다. 특히 본 연구에서는 SQUID loop와 입력코일 사이의 절연층이 Nb의 산화막으로 되어 있어 parasitic capacitance  $C_p$ 가 접합의 capacitance  $C$ 에 비해 비교적 클 것으로 추정되고 ( $\sim 10 C$ ) 이로 인하여  $10 \mu V$  부근에 나타날 것으로 예상되는 공명효과는 입력코일 양단에 연결된 감쇄소자 때문에 줄어든 것으로 생각되나 별도로 확인하지는 않았다. 또한 parasitic capacitance가 크면 공명효과로 인한 성능저하를 유발할 뿐 아니라 SQUID의  $I$ - $V$  특성이 hysteresis를 갖게 되기 때문에, SQUID를 최적화하여 고감도의 센서를 얻기 위해서는 parasitic capacitance를 줄이는 것이 필요하다. SQUID의 잡음특성은 tank coil과 같은 matching 회로를 사용하여 측정하여야 하는데 본 연구에서는 직접 측정하였으므로 약  $4 nV / \sqrt{Hz}$ 의 background 잡음보다 작아 측정할 수 없었으며 따라서 소자의 white noise는  $10^{-4} \phi_0 / \sqrt{Hz}$  보다 작은 것으로 추정된다. 현재 자체 제작된 SQUID probe와 controller를 사용하여 보다 정밀한 특성을 조사하고 있는 중 이므로 이 결과는 추후 발표할 예정이다. 표 II는 측정된 SQUID parameter를 정리한 것이다.

### V. 결 론

입력코일과 변조코일이 박막형태로 집적화된 planar

Table II. Measured values of the DC SQUID

SQUID inductance	$L$	100 pH
Critical current	$I_0$	25 $\mu$ A
Shunt resistance	$R_s$	0.5 $\Omega$
Junction capacitance	$C$	0.5 pF
Hysteresis parameter	$\beta_c$	0.04
Modulation parameter	$\beta$	2.5
Modulation depth	$\Delta I_c$	12 $\mu$ A
Mutual inductance between the SQUID loop and modulation coil	$M_{ms}$	10 pH
Mutual inductance between the SQUID loop and matching transformer primary coil		3.6 nH

DC SQUID를 제작하고 특성을 조사하였다. 소자는 포토 리소그래피 기술과 RF 마그네트론 스퍼터링 및 양극산화 방법으로 제작되었으며, 4.2 K에서 기본적인 특성을 측정한 결과 white noise는  $10^{-4} \phi_0 / \sqrt{Hz}$  이하로 나타났고 더욱 정밀한 측정 방법으로 측정중에 있다. 제작된 SQUID 소자는 외부의 전기적 충격에도 비교적 안정된 특성을 보이고 있고 현재 SQUID parameter를 최적화하는 연구와 함께 소자의 신뢰성을 향상시키기 위한 배선 및 절연공정을 보완하고 있으므로 특성은 더욱 향상될 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. Clarke, Proc. IEEE, **77**, 1208 (1989).
- [2] B. Savo, F. C. Wellstood, and J. Clarke, Appl. Phys. Lett., **50**, 1757 (1987).
- [3] C. D. Tesche, Cryogenics, **29**, 1135 (1989).
- [4] C. D. Tesche, and J. Clarke, J. Low Temp. Phys. **29**, 301 (1977).
- [5] J. Knuutila, A. Ahonen, and C. Tesche, J. Low Temp. Phys. **68** (3/4), 269 (1987).
- [6] J. Knuutila, M. Kajola, H. Seppa, R. Mutikainen, and J. Salmi, Report **TKK-F-A61 9**. (Helsinki Univ. of Tech., Otaniemi, 1987).
- [7] R. Cantor, T. Ryhanen, D. Drung, and H. Koch, IEEE Trans, Magn, **MAG-27**, 2927 (1991).

- [8] 권혁찬, 이용호, 김진목, 박종철, 새물리 31, 59 (1991).  
[9] 이용호, 권혁찬, 김진목, 박종철, 새물리. 31, 182 (1991).  
[10] 권혁찬, 이용호, 김진목, 박종철, 새물리, 31, 405 (1991).  
[11] 과학기술처, 'DC SQUID의 개발 및 응용연구', (KRISS-91-166-IR, 한국표준과학연구원, 1991).

## Fabrication and Characteristics of Integrated Nb DC SQUID

Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, and J. C. Park

*Superconductivity Laboratory*

*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606*

(Received 18 September 1992)

We have designed, fabricated and tested an integrated planar DC SQUID which incorporates input coil and modulation coil in thin film structure. The SQUID uses Nb/Al-oxide/Nb Josephson junctions and Pd shunt resistors, and the SQUID loop incorporates two rings connected in series forming figure '8' structure and has the advantage of a negligibly small circulating current for the spatially homogeneous noise fields. The devices were fabricated using photolithographic technique, RF magnetron sputtering, anodic oxidation for insulation and lift-off process. The preliminary test of the fabricated SQUID at 4.2 K showed that the flux-voltage characteristics were smooth enough to adopt standard readout system, and the voltage noise was too small to be measured by direct method and so the white noise was thought to be less than  $10^{-4} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ .