

제 2 차 년 도
최 종 보 고 서

KRISS-98-025-IR

초전도 기술개발 연구

Development of Superconducting Technology

연 구 기 관

재단법인 한국표준과학연구원

과 학 기 술 처

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “초전도 기술 개발 연구”의 연구 보고서로 제출합니다.

1998. 1.

주 관 기 관 명 : 한국표준과학연구원

총괄연구책임자 : 박 용 기

연 구 원 : 김 규 태

권 혁 찬

박 종 완

박 종 철

요 약 문

I. 연구제목

초전도 기술 개발 연구

II. 연구의 목적 및 중요성

접합의 크기가 100 nm 이하로 작아지면 접합의 전기용량이 매우 작아져 일정온도 이하에서 전자 하나를 계에 대전하는데 필요한 전기 에너지가 열 에너지 보다 커지게 되고 따라서 전자 하나의 움직임에 의한 효과를 볼 수 있게 된다. 전자 하나의 움직임에 의한 효과를 이용한 소자를 단전자 소자 (single electron device)라고 하는데 전류 표준, 전기 용량 표준 뿐만 아니라 정밀 전류계 등에 직접 응용될 수 있다.

본 연구는 단전자 소자의 전기 표준에의 응용 가능성을 타진하고, 그에 대한 기반 기술을 확립하기 위해 50 nm 크기의 Al/AlO_x/Al 미소접합 소자를 제작하여 저온에서의 전기적 특성을 연구하는 데 목적을 두고 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 내용 및 범위는 다음과 같다.

- 접합의 크기가 50~100 nm 인 두 개의 접합이 직렬로 연결된 Al/AlO_x/Al 단전자 트랜지스터 제작.
- 제작된 단전자 트랜지스터의 저온에서의 전기적 특성 조사.

IV. 연구 결과 및 활용에 대한 건의

전자빔 식각기술 및 양각증착법을 개선하여 50~100 nm 수준의 단전자접합을 안정적으로 제작할 수 있게 되었다. 크기가 50~100 nm인 두 개의 Al/AlO_x/Al 접합이 직렬로 연결된 단전자 트랜지스터를 제작하였다. 접합저항은 0.35~6.1 MΩ 이었고 쿨롱갭의 크기는 0.23~0.57 meV였다. $I-V_g-V$ 특성을 살핀 결과 게이트 전압 V_g 의 변화에 따른 전류 I 의 진동을 관찰 할 수 있었고 전압 주기로 계산한 게이트 전기용량은 0.017~0.028 fF 정도였다.

개발된 단전자소자 제작기술은 전기표준용의 electrometer로 활용될 수 있을 것으로 기대되며 앞으로 새로운 전기용량 표준, fine structure constant의 정밀 측정을 위해 저온 표준용량기 및 정밀측정시스템의 개발도 함께 이루어져야 할 것으로 보인다.

SUMMARY

I. Title

Development of Superconducting Technology.

II. Objectives and Significance of the Research

If a junction size is order of 100 nm or smaller, its capacitance becomes very small so that the electrostatic energy to charge an extra electron to the junction becomes as large as or greater than the thermal energy. This system exhibit so called *single electron charging effect* due to the motion of single electron. Single electron tunneling (SET) devices, utilizing single electron charging effect, is regarded to have wide range of application from current and capacitance standards to highly-sensitive electrometer.

The main goal of the present research is to fabricate SET devices of sizes smaller than 50 nm and to study their electric properties at low temperatures.

III. Contents and Scopes of Research

- Fabricate SET transistor consisted of two Al/AlO_x/Al junctions of sizes smaller than 50 nm.
- Characterize the SET transistor at low temperature.

IV. Results and Suggestions

We improved the e-beam lithography and double angle evaporation technology to reproducibly fabricate an Al/AlO_x/Al single electron junction with size of 50~100 nm. The Coulomb blockade effects have been observed on the SET transistors whose junction resistance was in the range of 0.35~6.1 M Ω and the Coulomb gap 0.23~0.57 meV. The gate capacitances, inferred from the period of the $I-V_g$ curves, were 0.017~0.028 fF. The developed fabrication technology could be used for future application to high-sensitivity electrometer for electrical metrology. Further development of cryo-capacitance standard and precision measurement technology should be included for a new capacitance standard and determination of fine structure constant.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Single Electron Tunneling Effect	4
Section 1. Coulomb Blockade Phenomena	4
Section 2. Single Electron Transistor	7
Section 3. Single Electron Pump	13
Chapter 3. Single Electron Device for Metrology	16
Section 1. Current Standard	16
Section 2. Capacitance Standard	17
Chapter 4. Fabrication of Single Electron Device	20
Chapter 5. Measurement of Single Electron Device	24
Section 1. Measurement System	24
Section 2. Measurement Result	25
Chapter 6. Conclusion	31
References	32

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 단전자 효과	4
제 1 절 쿨롱차폐 현상	4
제 2 절 단전자 트랜지스터	7
제 3 절 단전자 펌프	13
제 3 장 단전자 소자와 전기 표준	16
제 1 절 전류표준	16
제 2 절 전기용량 표준	17
제 4 장 단전자 소자 제작	20
제 5 장 단전자 소자 특성 측정	24
제 1 절 측정장치	24
제 2 절 측정 결과	25
제 6 장 결 론	31
참 고 문 헌	32

제 1 장 서 론

길이가 μm 보다 작은 물리계를 준미세계(mesoscopic system)라고 하는데 일상적인 거시계(macroscopic system)에서 볼 수 없는 다양한 물리적 현상들이 관찰된다. 대표적인 것이 쿨롱차폐(Coulomb blockade)현상으로 일반적으로 크기가 100 nm 보다 작고 저항이 적당히 큰 접합의 전류-전압 곡선은 Ohm의 법칙을 따르지 않고 적은 전압에서 전자의 투과로 발생하는 전류가 0에 가깝게 줄어든다. 이는 투과하는 전자와 대전된 계가 정전기적으로 상호작용해서 발생하는 현상이다. 단전자 소자(single electron tunneling device)는 이러한 쿨롱차폐현상을 이용한 소자를 말하는데 원리적으로 일정 온도 이하에서 전자 하나로 소자의 동작이 가능하다. 이러한 단전자 소자는

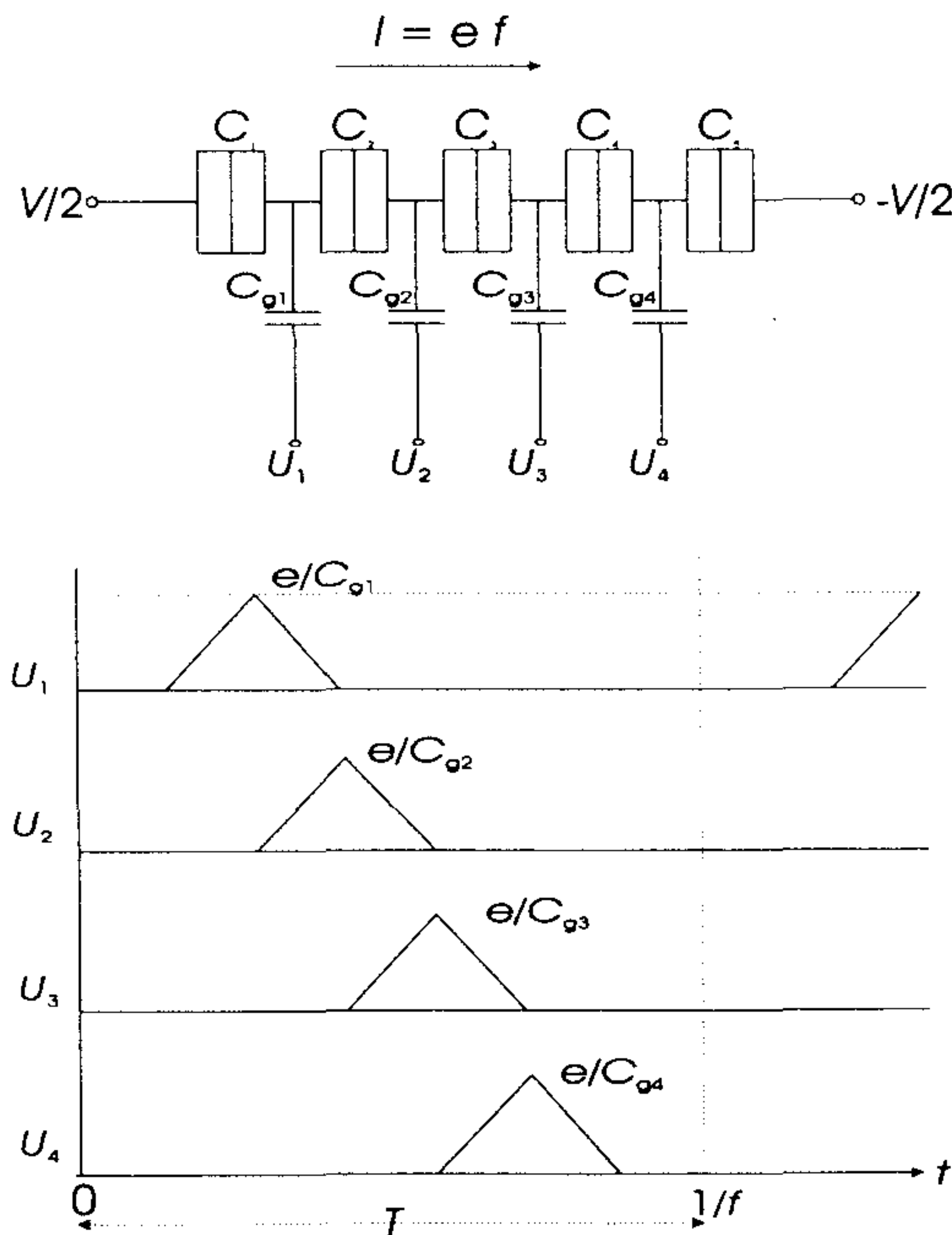


그림 1-1-1. Diagrammatic explanaton of a 5-junction single electron tunneling (SET) pump. One electron charge passes per each period($1/f$) of gate signal

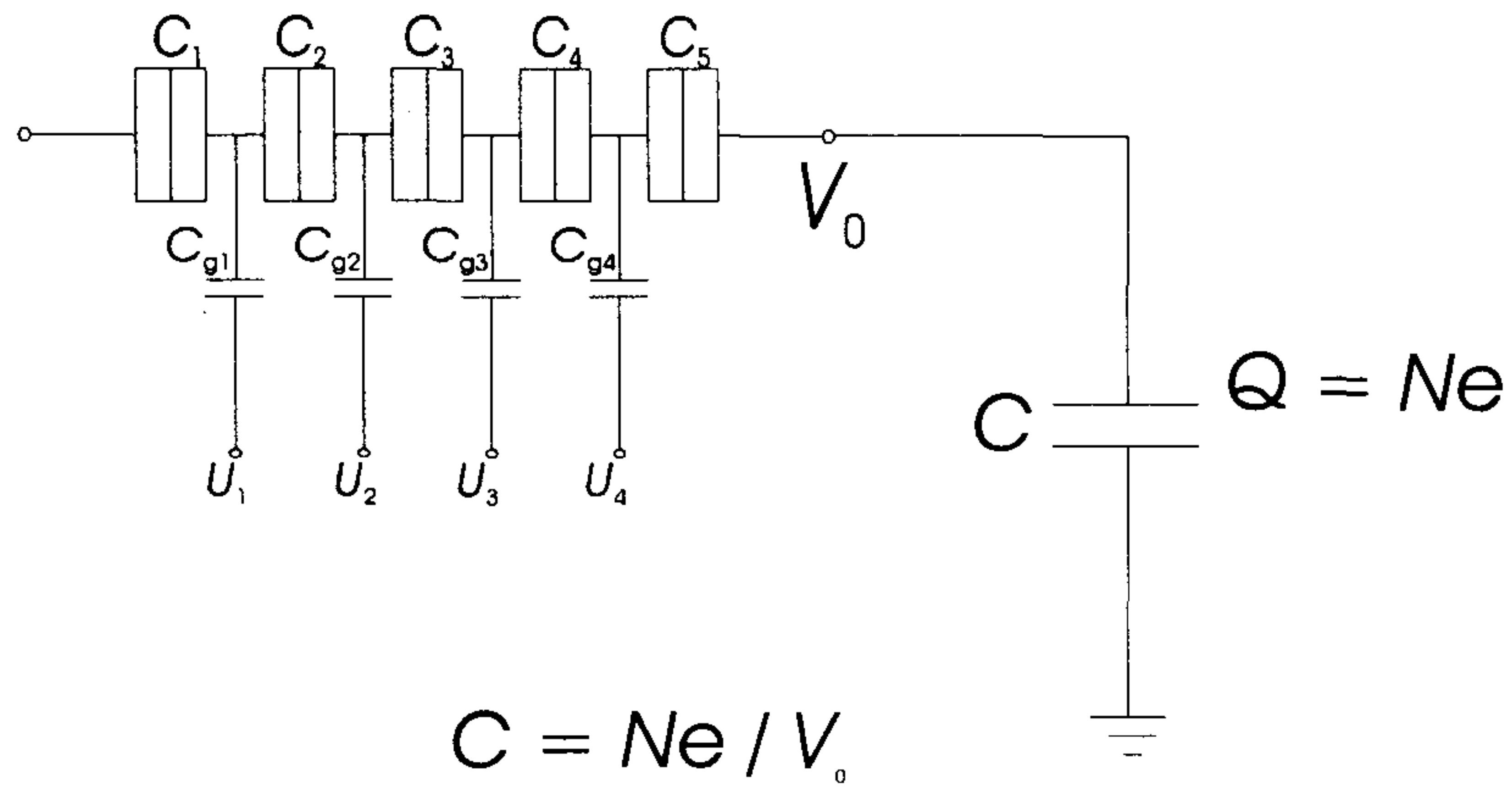
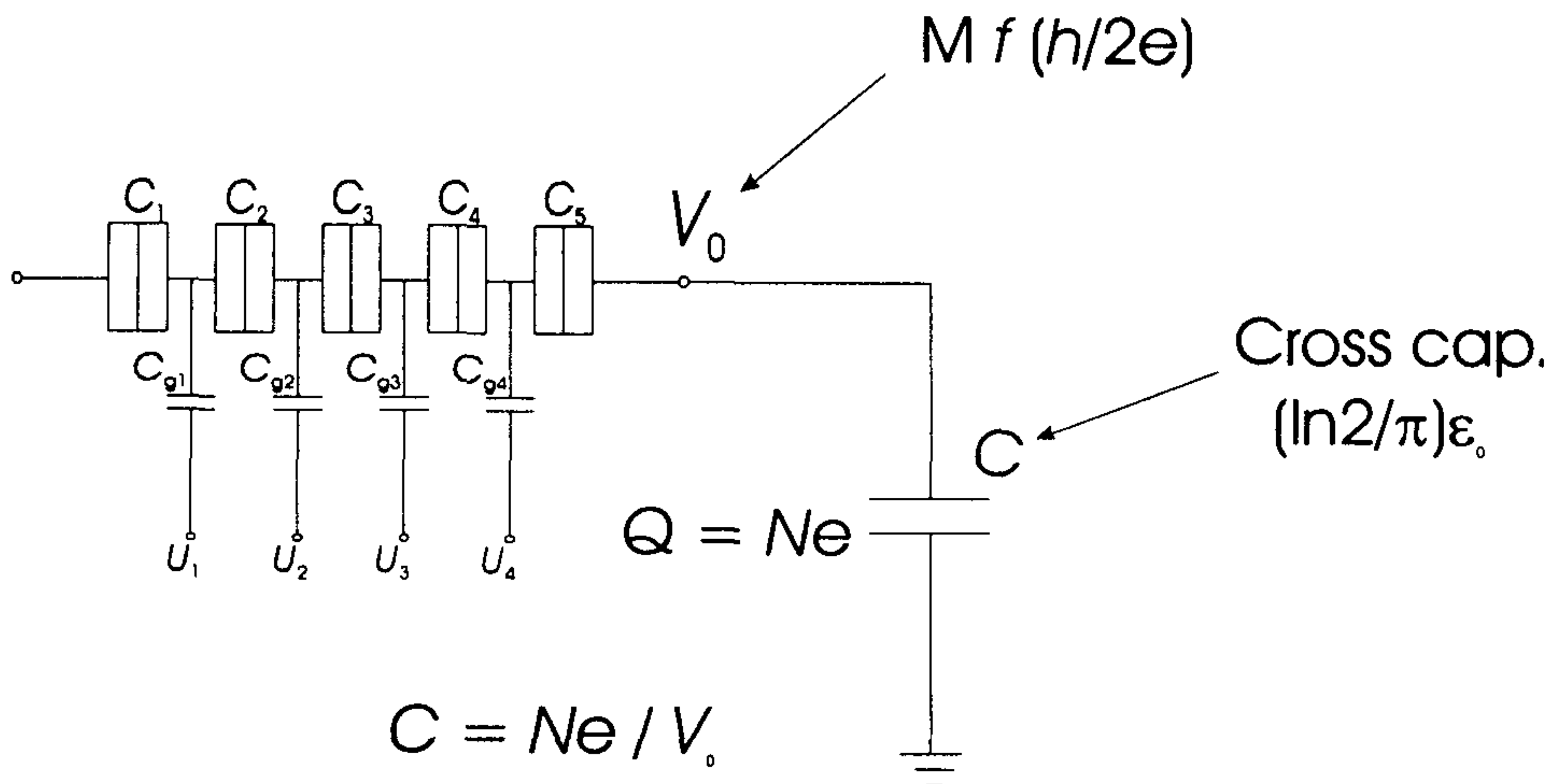


그림 1-1-2. Diagrammatic explanation of a determination of capacitance of a cryogenic standard capacitor using single electron tunneling (SET) pump.

The V_0 is determined by a Josephson voltage standard.



$$\alpha = \mu_0 c (e^2 / 2h) = (\mu_0 c / 4) C f M / N$$

그림 1-1-3. Diagrammatic explanation of a determination of fine structure constant using single electron tunneling (SET) pump. The V_0 is determined by a Josephson voltage standard and C is determined by a cross capacitor.

전류 표준기(그림 1-1-1), 전기용량 표준기(그림 1-1-2) 뿐 아니라 미세구조상수(fine structure constant, α)의 측정에(그림 1-1-3) 사용될 수 있어서 새로운 개념의 전기표준 확립 및 기본 물리상수값 결정에 중요한 역할을 할 것으로 예상되어 이미 십여년 전부터 세계 주요 국가표준기관을 중심으로 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 전자빔 식각 장치와 양각 증착법을 이용하여 전기 표준에 이용될 수 있는 50 nm 크기의 미소 접합을 제작하고 저온에서의 전기적 특성을 조사하였다.

제 2 장 단전자 효과

제 1 절 쿨롱차폐 현상

우리가 일상적으로 접하는 거시계(macroscopic system)는 아보가드로수 (6.02×10^{23}) 정도의 많은 원자나 분자로 이루어지고 이들의 운동은 고전역학으로 비교적 정확하게 기술할 수 있다. 반면에 개개 원자나 분자의 운동을 기술하기 위해서는 양자역학적 개념이 필수적이다. 원자나 분자의 세계인 미시계(microscopic system)에서 거시계로 넘어가는 전이영역을 준미시계(mesososcopic system)라고 하는데 대개 계의 크기(l)가 10 nm~1 μ m 정도인 영역을 포함한다. 이러한 준미세계에는 아보가드로수 보다는 훨씬 적지만 여전히 많은($\sim 10^{10}$) 수의 입자가 있지만 개개 입자의 운동이 계 전체의 물리적 특성을 좌우하는, 미시계에서 볼 수 있는 현상들이 관찰된다. 대표적인 것이 쿨롱차폐(Coulomb blockade)현상으로[1-3] 일반적으로 크기가 100 nm 보다 작고 저항이 적당히 큰(>100 k Ω) 금속-부도체-금속(MIM)접합의 전류-전압 곡선은 Ohm의 법칙을 따르지 않고 저전압에서 전자의 투과로 발생하는 전류가 0에 가깝게 줄어든다. 이는 투과하는 전자와 대전된 계가 정전기적으로 상호작용해서 발생하는 현상으로 1951년 Gorter가 금속 박막의 전기적 특성을 설명하기 위해 처음 제안하였다[4]. 이후 1986년 Likharev 등이 양자역학에 바탕한 이론을 발표하였고[2] 1987년 인위적으로 만든 미소접합에서 쿨롱차폐현상이 관측되었다[5]. Likharev[1-2] 등에 따르면(이를 Orthodox theory라고 부른다) 접합저항이 R_T 이고 전기용량이 C 인 미소접합의 전류-전압 곡선은 온도 $T=0$ K일 때 다음과 같이 주어진다(그림 2-1-1).

$$\begin{aligned}
 I &= 0 & |eV| < E_c \\
 &= (eV - E_c) / e^2 R_T & |eV| > E_c
 \end{aligned}
 \tag{2-1-1}$$

여기서 E_c 는 미소접합에 전자 한 개를 대전하는데 필요한 전기에너지 $E_c = e^2/2C$ 이다.

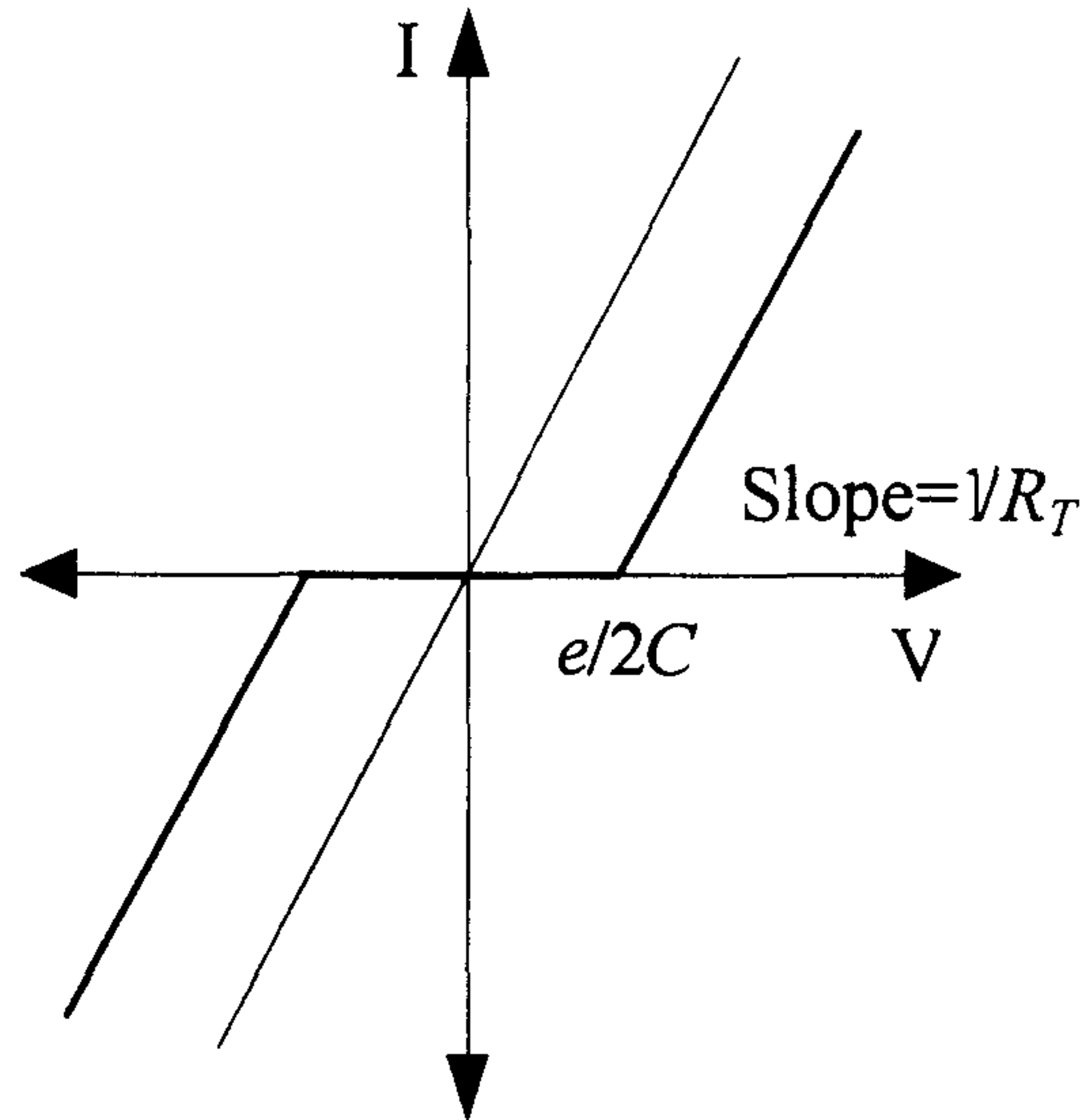


그림 2-1-1. 온도 $T = 0$ K일 때 미소접합의 전류-전압 특성 곡선.

전압이 $|eV| < E_c$ 인 영역에서는 투과전류가 차폐되어 0이 되는데 이는 접합을 통과하려는 전자와 접합의 쿨롱(Coulomb) 상호작용에 기인하고 이를 쿨롱차폐(Coulomb blockade)현상이라 한다. 이러한 쿨롱차폐현상을 실험적으로 관찰하기 위해서는 전기에너지 E_c 가 열적 요동(thermal fluctuation)과 양자 요동(quantum fluctuation)보다 커야하고 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_c &= e^2 / 2C \gg k_B T \\
 R_T &\gg R_Q = e^2 / h \sim 26 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}
 \tag{2-1-2}$$

즉 접합저항이 충분히 큰 미소접합에서 온도가 충분히 낮을 때 쿨롱차폐 현상을 관찰할 수 있다. 단일접합에서 쿨롱차폐를 검증하려는 시도는 Likharev 이후 몇몇 그룹에 의해 시도되었지만 원하는 결과를 얻지 못했다. 단일접합은 외부의 전자기적 영향에 민감할 뿐 아니라 실제 측정시 접합과 연결되는 shunt resistor와 shunt capacitor가 보고자하는 쿨롱차폐 현상을 가릴 수 있다[2]. 외부의 영향을 줄일 수 있는 방법으로 이중접합 구조가 있다. 이는 외부와는 접합을 통해서만 연결되는 고립된 섬(island)을 만들고 섬 양단에 두 개의 접합을 만드는 것이다(그림 2-1-2)[5].

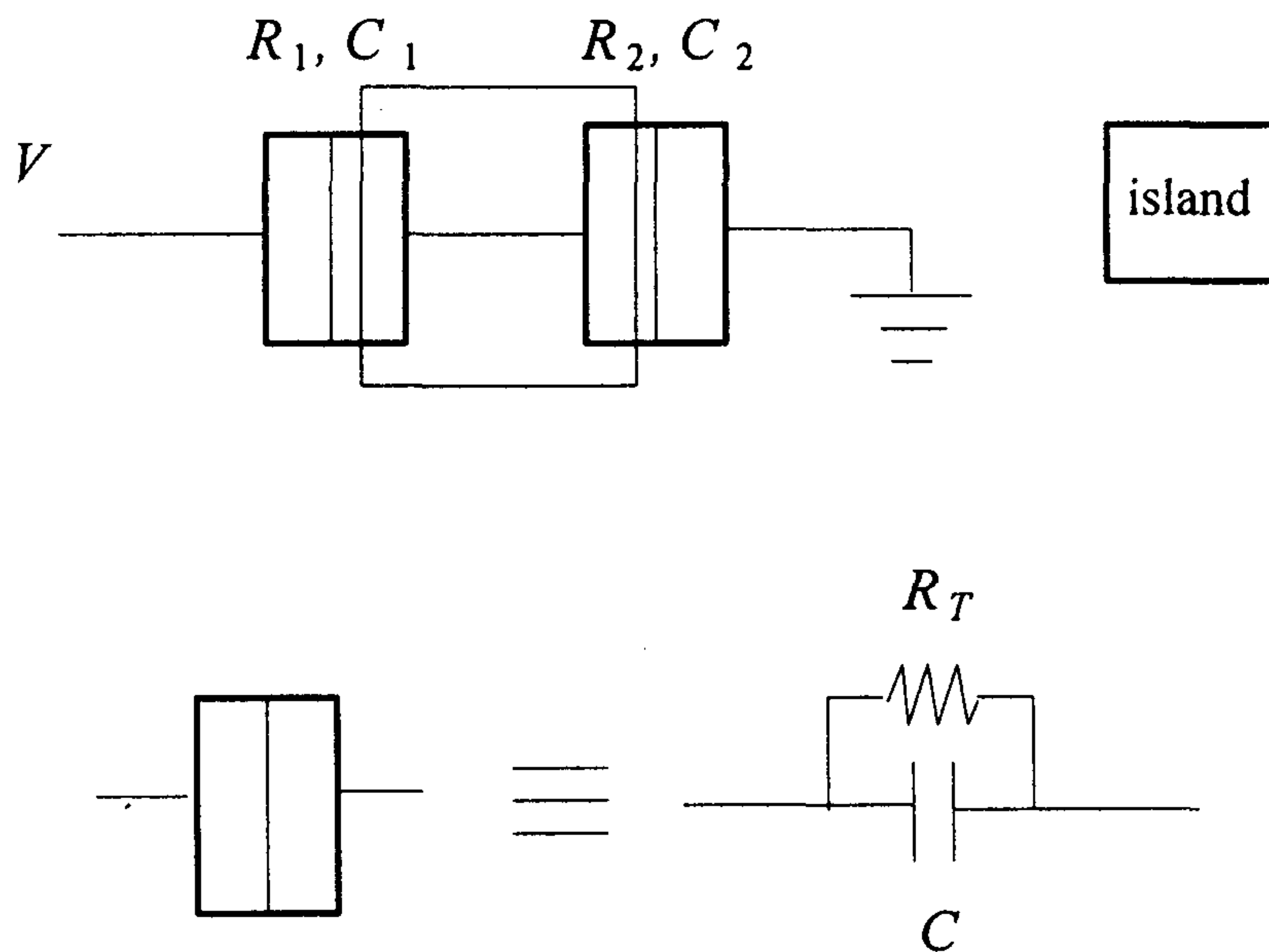


그림 2-1-2. 이중접합 단전자 소자.

이러한 이중접합 및 세 개 이상의 접합을 직렬로 연결한 다중접합은 1개 이상의 금속섬을 갖고 이들이 외부와 약하게 연결되어 단전자 효과를 관찰하기에 용이하다. 인위적으로 만든 다중접합에서 쿨롱차폐현상을 처음 발견한 것은 우연이 아니라고 하겠다[5].

제 2 절 단전자 트랜지스터

일반적으로 반도체 트랜지스터는 source와 drain사이에 흐르는 전류의 크기가 gate에 걸어주는 전압에 따라 변하고 이를 전자회로에 이용한다. 앞 절에서 언급한 단전자 이중접합 내의 금속섬에 gate를 달아 전압을 걸어주면 반도체 트랜지스터처럼 게이트 전압의 크기에 따라 접합을 통과하는 전류의 크기가 변하는 것을 관찰할 수 있다(그림 2-2-1). 이렇게 단전자 이중접합과 게이트로 이루어진 구조를 단전자 트랜지스터(SET transistor)라 한다[5].

이러한 구조가 트랜지스터처럼 동작할 수 있음을 보이자[6]. 그림 2-2-1과 같이 C_1 , C_2 의 용량을 갖는 두 접합에 비대칭적으로 전압을 걸어 주는 경우에 계 전체의 전기에너지는

$$E_c(n) = \frac{1}{2}C_1(V - V_c)^2 + \frac{1}{2}C_2V_c^2 + \frac{1}{2}C_g(V_g - V_c)^2 \quad (2-2-1)$$

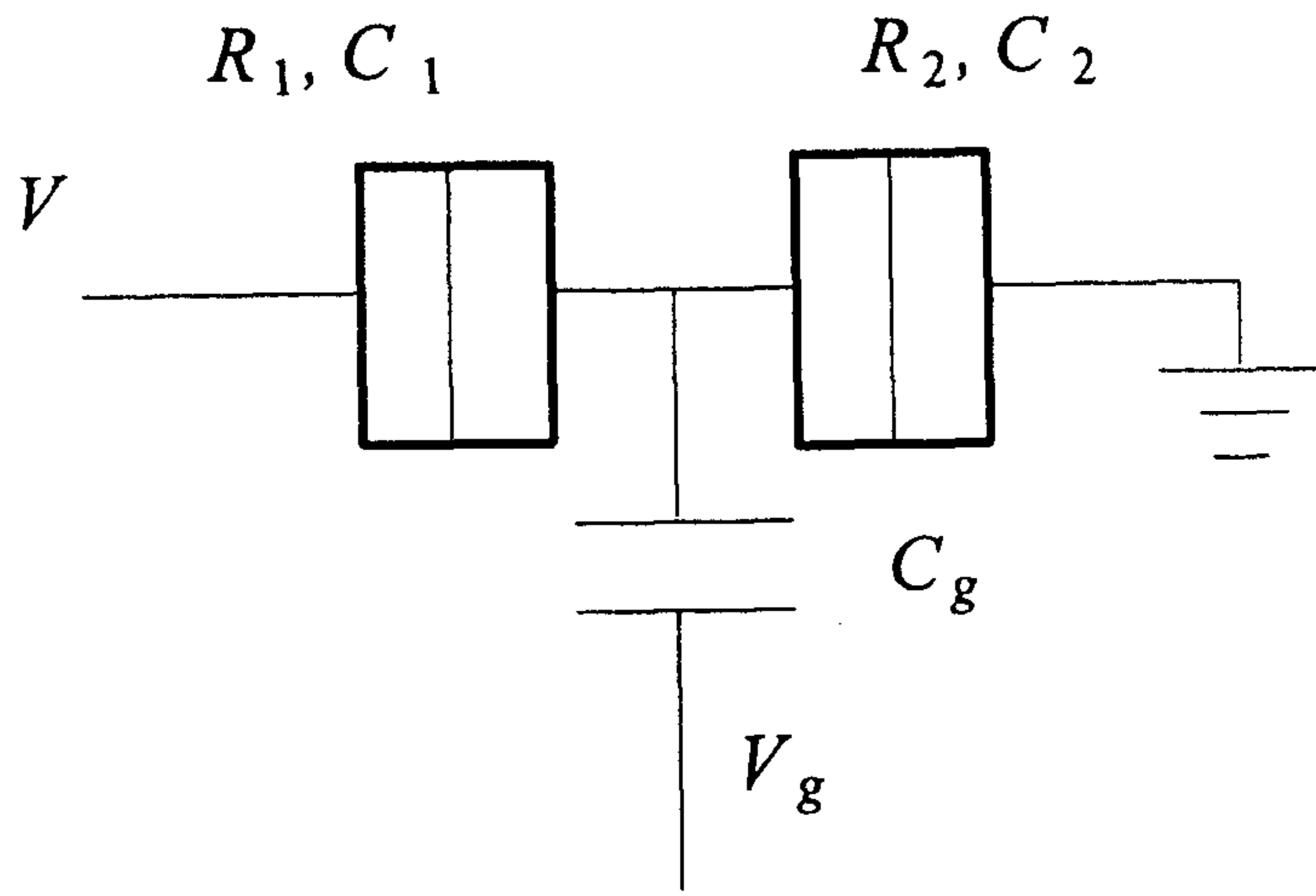
로 주어진다. 위 식에

$$V_c = \frac{-ne + C_1V + C_gV_g}{C_\Sigma} \quad (2-2-2)$$

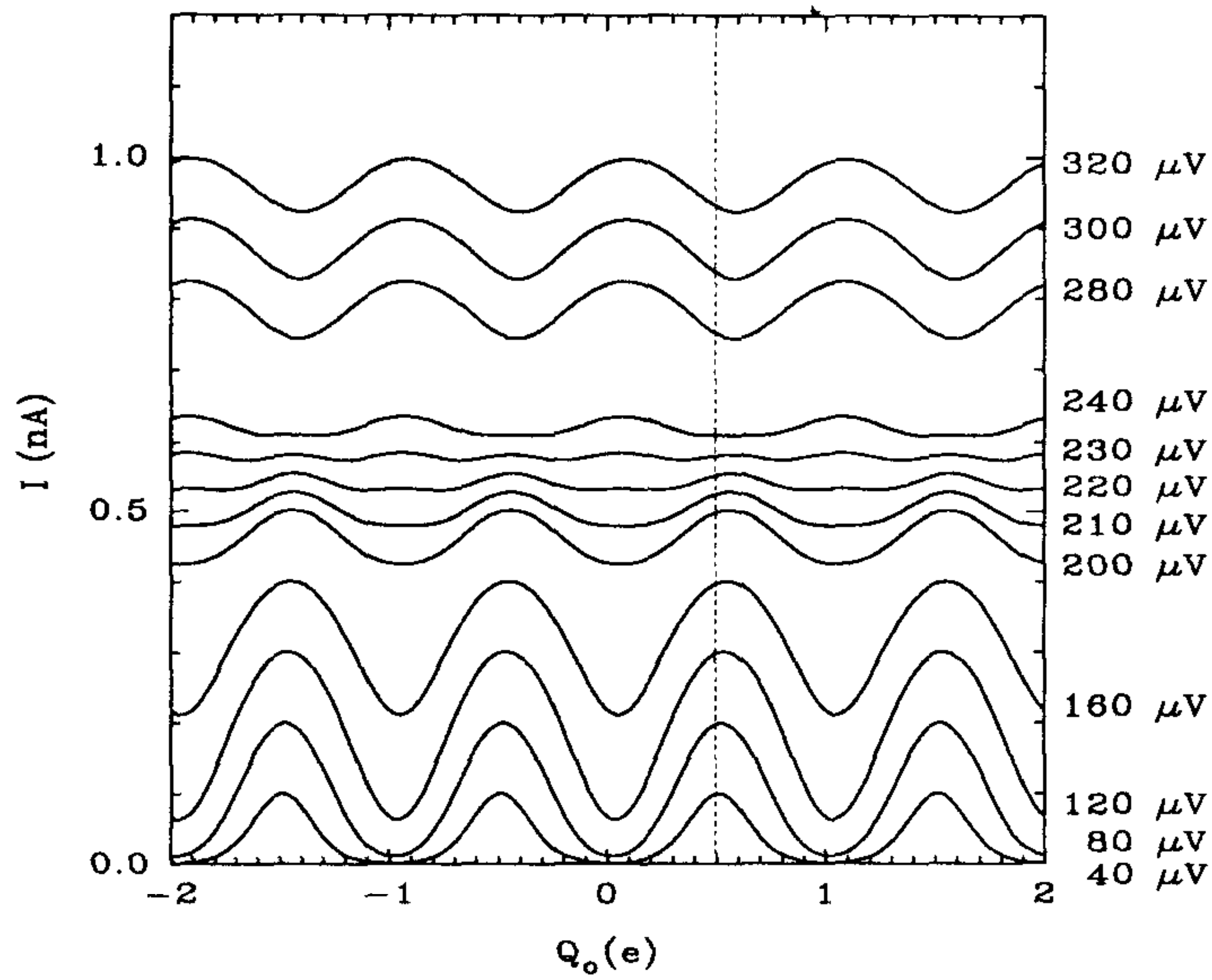
를 대입하면

$$E_c(n) = \frac{(ne)^2}{2C_\Sigma} + E(V, V_g) \quad (2-2-3)$$

가 된다. 여기서 $C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_g$ 이고 $E(V, V_g)$ 는 섬에 대전된 전자 개수를 나타내는 양자역학적 기대치 n 에는 의존하지 않는 V 와 V_g 만의 함수이다. 섬이 양자적 상태 $|n+1\rangle$ 에서 $|n\rangle$ 으로 바뀌면 이에 따른 에너지 변화는



(a)



(b)

그림 2-2-1. (a) 단전자 트랜지스터의 회로도 (b)Orthodox theory로 계산한 단전자 트랜지스터의 $I-V_g-V$ 특성곡선. $Q_0(e)=C_g V_g$ 이고 온도 $T=100$ mK, $C_1=C_2=0.5$ fF, $R_1=R_2=100$ k Ω , $C_g=0.1$ fF이다.

$$\Delta E_c(n+1 \rightarrow n) = E(n) - E(n+1) = -\frac{(2n+1)e}{2C_\Sigma} \quad (2-2-4)$$

로 주어진다. 정전기 에너지 뿐만 아니라 전압 V 를 걸었을 때 외부에서 계에 하는 일도 고려하면 접합 1을 통해 섬이 양자적 상태 $|n+1\rangle$ 에서 $|n\rangle$ 으로 바뀔 때 자유에너지 차이는 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta G_1(n+1 \rightarrow n) = -E_0[2(n-n_x)+1] - eV \frac{C_2 + C_g}{C_\Sigma} \quad (2-2-5)$$

여기서 $E_0 = e^2/2C_\Sigma$ 이고 $n_x = C_g V_g / e$ 이다.

마찬가지로 하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta G_2(n+1 \rightarrow n) &= -E_0[2(n-n_x)+1] + eV \frac{C_1}{C_\Sigma}, \\ \Delta G_1(n \rightarrow n+1) &= E_0[2(n-n_x)+1] + eV \frac{C_2 + C_g}{C_\Sigma}, \\ \Delta G_2(n \rightarrow n+1) &= E_0[2(n-n_x)+1] - eV \frac{C_1}{C_\Sigma} \end{aligned} \quad (2-2-6)$$

처음에 $n+1$ 개 전자가 섬에 있을 때 접합 1의 투과율 $\Gamma_1(n+1 \rightarrow n)$ 은 Fermi's golden rule을 쓰면 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_1(n+1 \rightarrow n) = \frac{\Delta G_1(n+1 \rightarrow n)}{e^2 R_1} \frac{1}{1 - \exp\left[\frac{\Delta G_1(n+1 \rightarrow n)}{k_B T}\right]} \quad (2-2-7)$$

전체 투과율은 접합 1과 접합 2의 투과율을 합친 것이 되고

$$\Gamma(n+1 \rightarrow n) = \Gamma_1(n+1 \rightarrow n) + \Gamma_2(n+1 \rightarrow n) \quad (2-2-8)$$

세부균형 조건(detailed balance condition)으로부터 접합을 통과할 확률 $P(n)$ 을 얻을 수 있다.

$$P(n+1)\Gamma(n+1 \rightarrow n) = P(n)\Gamma(n \rightarrow n+1) \quad (2-2-9)$$

식 (2-2-7)과 (2-2-9)로부터 각 접합을 통과하는 전류를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= -e \sum_{n=-\infty}^{\infty} P(n) [\Gamma_1(n \rightarrow n+1) - \Gamma_1(n \rightarrow n-1)] \\ I_2 &= -e \sum_{n=-\infty}^{\infty} P(n) [\Gamma_2(n \rightarrow n-1) - \Gamma_2(n \rightarrow n+1)] \end{aligned} \quad (2-2-10)$$

세부균형 조건[식 (2-2-9)]을 만족하는 $\{P(n)\}$ 에 대하여 $I_1=I_2$ 가 성립함을 보일 수 있다.

위와 같이 복잡한 수식을 쓰지 않고도 직관적으로 어떻게 source와 drain을 통과하는 전류 I 가 gate에 걸어준 전압 V_g 에 따라 주기적으로 변하는지를 보일 수 있다. 식 (2-2-4)에 따르면 고립된 섬이 $e^2/2C$ 의 간격을 갖는 불연속적에너지 준위를 가진다고 생각할 수 있다. 걸어준 전압 V_g 를 증가함에 따라 에너지 준위가 다같이 위로 올라가고 일정한 V_g 에서 전자의 투과가 용이해지는 공명(resonance)현상이 나타난다(그림 2-2-2). 대칭적인 트랜지스터의 경우 ($C_1=C_2$, $R_1=R_2$) $V_g C_g = (n+1/2)e$ 에서 전류값이 최대가 되고 $V_g C_g = ne$ 일 때 최소가 될 것이 예상되지만, 실제로 전류-전압 곡선은 source와 drain 양단에 걸어준 전압 V 에 따라 복잡한 양상을 보인다. V 를 고정시키고 V_g 를 변화하면 주기적으로 변하는 I 를 얻는다. 이때 전류의 진동 주기는

$$\Delta V_g = \frac{e}{C_g} \quad (2-2-11)$$

로 주어진다.

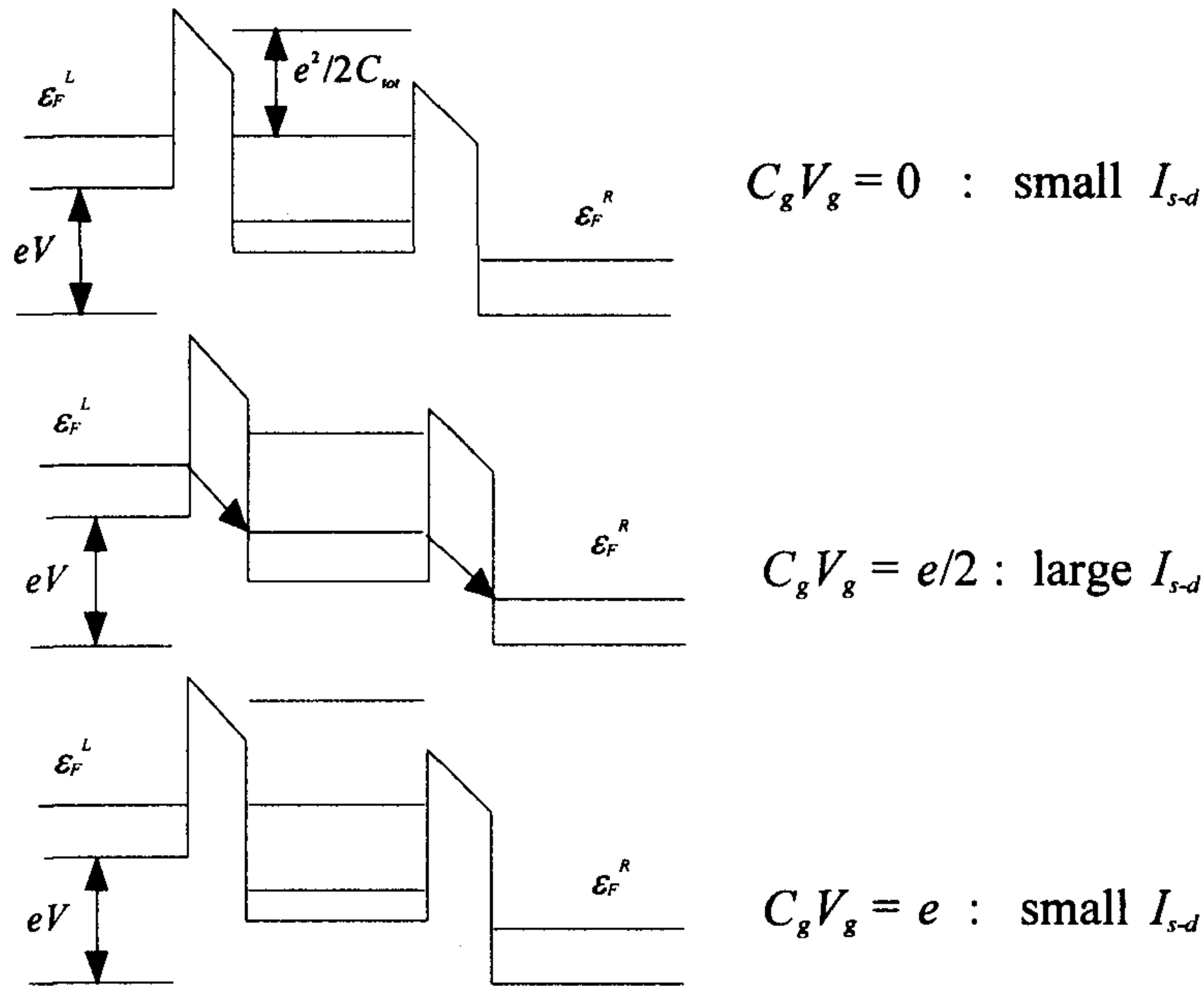
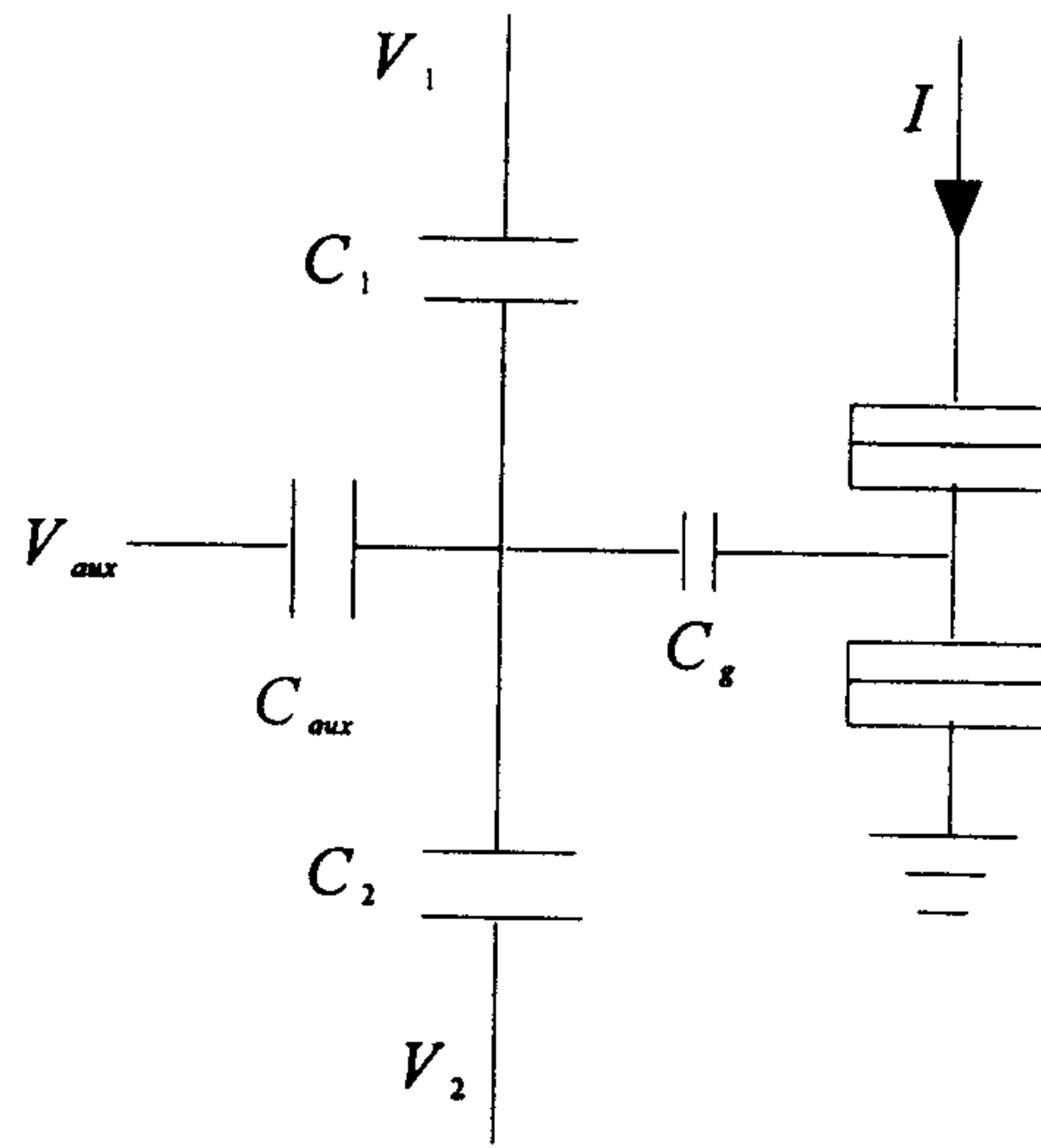


그림 2-2-2. 단전자 트랜지스터의 작동원리.

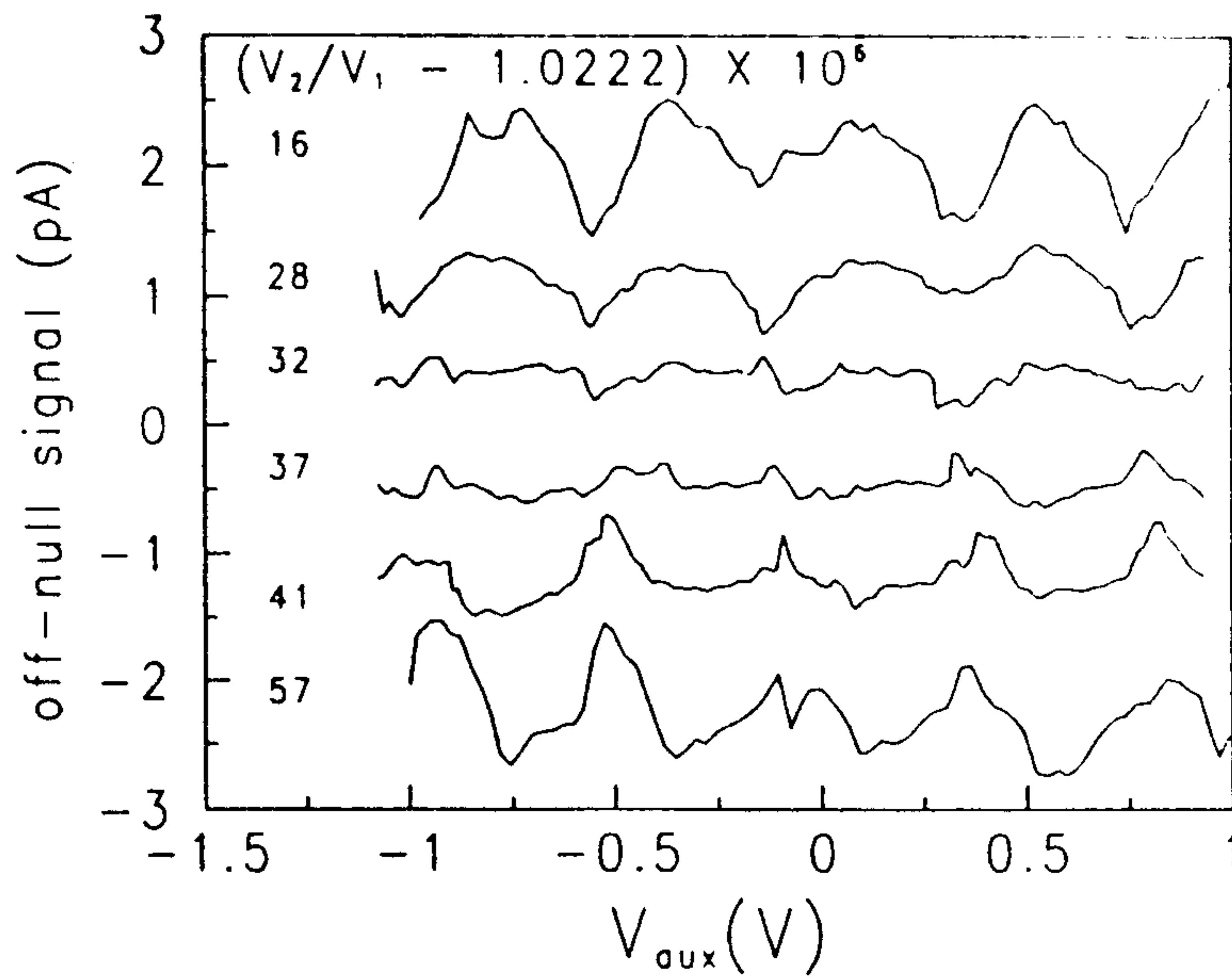
이러한 단전자 트랜지스터는 섬에 대전된 전하량(n_x)의 미세한 변화를 source와 drain 사이에 흐르는 전류 I 의 변화로 감지할 수 있으므로 정밀한 전류계(electrometer)로 쓰일 수 있다. 그림 2-2-3과 같은 회로에서[7] 트랜지스터에 발생하는 전류 I 가 0이 되려면 V_1, V_2 가 다음 조건을 만족해야 한다.

$$V_1 C_1 = V_2 C_2 \quad (2-2-12)$$

윗식에 따르면 전류 I 가 0이 될 때의 전압비 V_1/V_2 를 정확히 알면 용량비 C_1/C_2 비를 같은 정도의 정확도로 알 수 있게 된다. 죠셉슨 전압 표준기[8]를 이용하면 1V 수준에서 10^{-8} 이하의 불확도로 전압비를 측정할 수 있고 따라서 두 전기용량기의 용량비를 10^{-8} 이하의 불확도로 정할 수 있게 된다. 하지만 10^{-8} 이하의 불확도로 $I=0$ 인 점을 잡기는 매우 힘든 일이다. 결과적으로 C_1/C_2 값을 정하는데 V_1/V_2 값을 측정하는데 생기는 오차보다는 $I=0$ 인 점을 정하는데 따르는 오차가 훨씬 크다.



(a)



(b)

그림 2-2-3. (a) null detector로 쓰이는 단전자 전류계.
(b) Clark등의 실험 결과[7].

이러한 문제점은 단전자 트랜지스터의 특성을 이용하면 해결될 수 있다. 그림 2-2-3(a)에서와 같이 C_{aux} 에 전압 V_{aux} 를 걸어주고 천천히 변화 시키면 I 가 V_{aux} 에 따라 주기적으로 변할 것이다. V_1/V_2 값에 따라 I 의 모양이 바뀌는데 $|V_1/V_2| > 1$ 일때의 전류 최대점이 $|V_1/V_2| > 1$ 일때는 최저점으로 바뀐다[그림 2-2-3(b)]. 따라서 $|V_1/V_2|$ 를 변화시키면서 I 의 모양이 바뀌는 점을 찾으면 우리가 원하는 C_1/C_2 값을 알 수 있다. Clark 등의 실험에 따르면[7] 현재 이러한 방법으로 정상값이 0.5 pF 정도인 두 용량기값의 비를 1 ppm 오차 이내로 정할 수 있다.

제 3 절 단전자 펌프

그림 2-3-1과 같이 미세 접합이 3개 이상 직렬로 연결되어 있고 각각의 섬이 게이트를 통해 독립적인 전원에 연결되어 있는 구조를 단전자 펌프 [9-12]라고 한다.

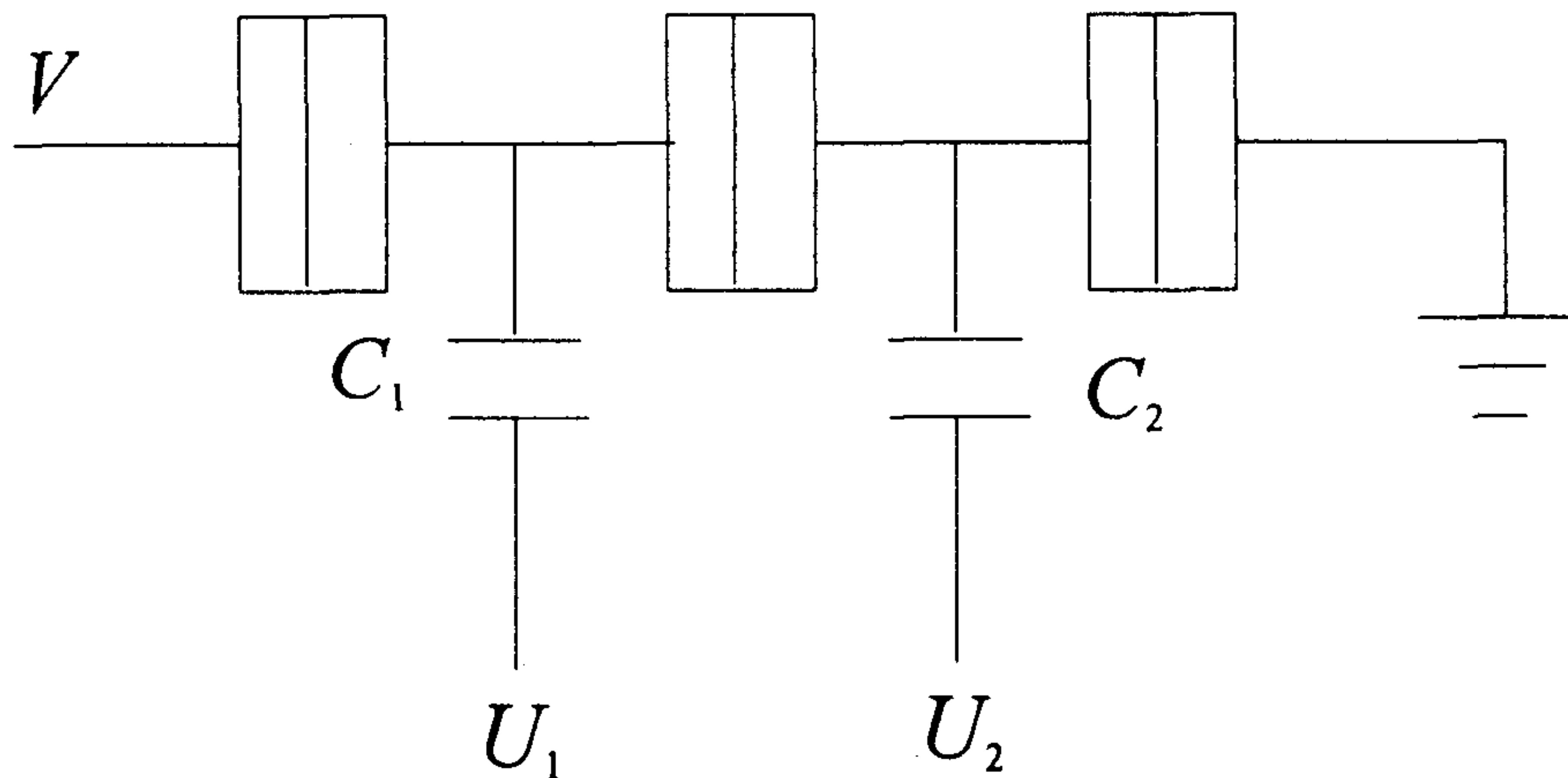


그림 2-3-1. 단전자 펌프의 회로도.

위 그림과 같이 접합 3개와 금속섬 2개로 이루어진 가장 간단한 단전자 펌프의 양자 상태는 금속섬에 대전된 전자의 갯수 $n=(n_1, n_2)$ 와 펌프를 통과한 전자의 갯수 n_0 를 알면 정해진다. 각각의 금속섬에 인가한 전압 $U=(U_1, U_2)$ 에 따라 계가 최소에너지를 갖는 안정된 상태의 전하량 $n=(n_1, n_2)$ 이 고정되고 이를 (C_1U_1, C_2U_2) 평면에 표시하면 그림 2-3-2와 같은 기울어진 벌집 모양이 된다. 여기서 각각의 영역(domain)은 최소에너지를 갖는 양자 값 $n=(n_1, n_2)$ 으로 구분지어지고 세 영역이 공유하는 꼭지점이 한 cell당 2개씩 존재한다. 그림 2-3-2에 P 로 표시된 꼭지점 주위를 반시계방향으로 돌면 $(0,0) \rightarrow (1,0) \rightarrow (0,1) \rightarrow (0,0)$ 인 양자 상태 통과하게 된다. 이는 왼쪽에서 오른쪽으로 전자를 하나 통과시킨 후 원래 상태로 돌아가는 과정과 동일함을 알 수 있다. 반대로 N 으로 표시된 꼭지점 주위를 반시계방향으로 돌면 오른쪽에서 왼쪽으로 전자를 하나 통과시키는 과정을 밟게 된다. 따라서 펌프에 적당한 전압을 가해 펌프의 양자 상태를 P 점 근처에 놓고 두 게이트에 주기적이고 위상차가 $\pi/2$ 인 교류전압을 가해주면 주기적으로 전자 하나를 통과시켜서

$$I = ef \tag{2-3-1}$$

인 직류전류를 발생시킬 수 있다. 여기서 f 는 교류 주파수로 이를 정확히 알면 발생하는 전류 I 를 같은 정도의 정확도로 알 수 있다. 일반적으로 주파수를 10^{-9} 정도의 불확도로 정하는 것은 어려운 일이 아니지만 같은 정도의 불확도로 전류값을 정하기는 현재의 측정기술로는 불가능하다. 따라서 단전자 펌프를 이용한 정밀한 직류전류 발생기를 실현할 수 있다면 전류표준에 신기원을 이룰 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 단전자 펌프를 전류표준에 이용하기 위해서는 다음 장에 기술한 바와 같은 문제점들을 해결해야 한다.

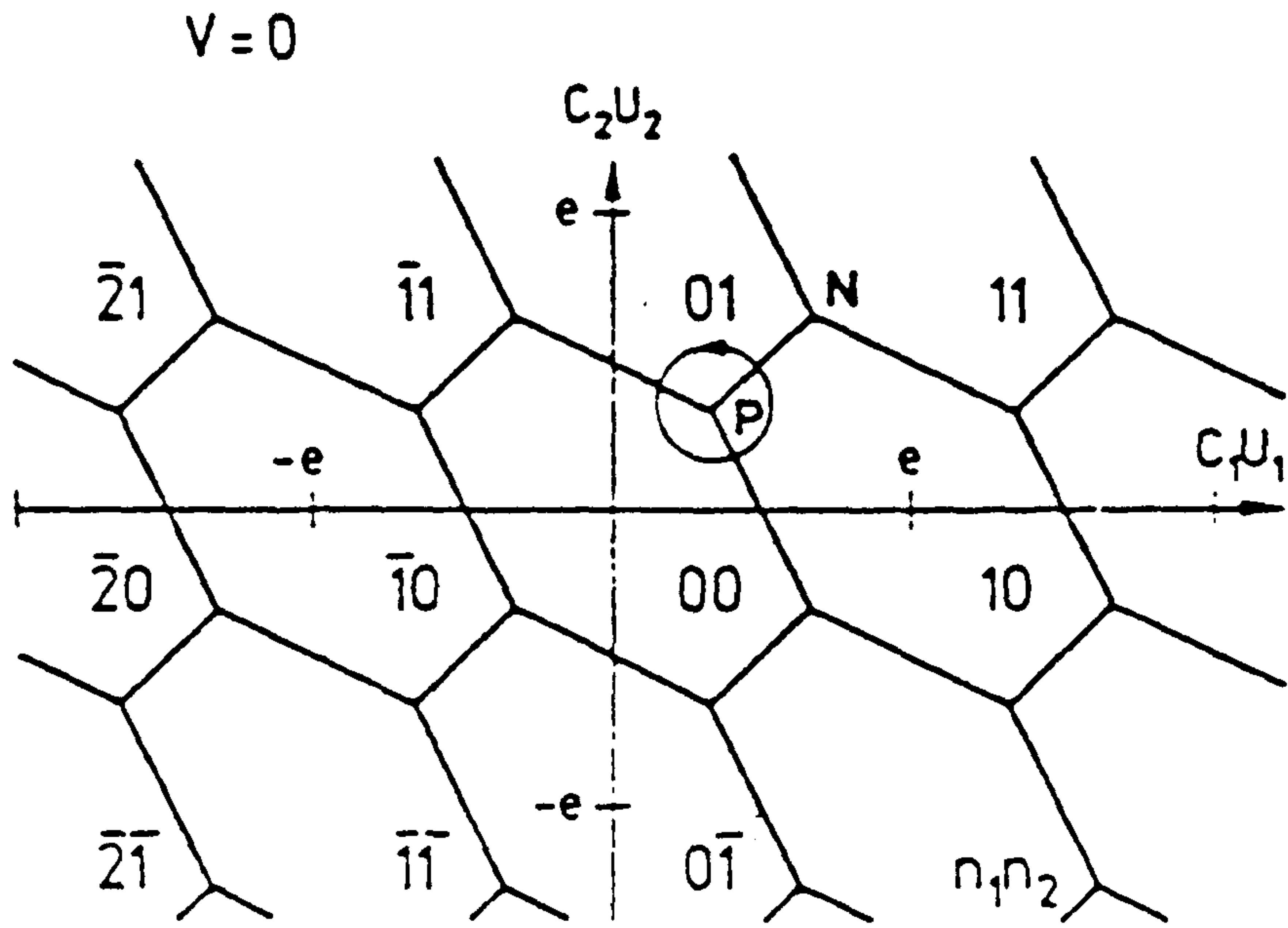


그림 2-3-2. 두 개의 금속섬을 가지는 단전자 펌프의 양자 상태 영역도

제 3 장 단전자 소자와 전기 표준

제 1 절 전 류 표 준

단전자 소자를 전류표준에 이용할 수 있음은 Likharev 등의 초기논문에서 제안되었다. 이후 단전자 펌프[12]나 turnstile[13]을 이용하여 이를 구현하려는 연구가 여러 그룹에 의해 진행되었는데 다음과 같은 문제점들이 발견되었다[14].

1. 전류측정의 정확도 문제

기존의 전류계로 1 ppm 이하의 전류 불확도를 얻기가 힘들다. 이는 이상적으로 작동하는 전류표준용 단전자 소자를 만든다 하더라도 이를 이용하여 전류값을 1 ppm 이하의 불확도로 측정하기 힘들다는 의미이다.

2. Co-tunneling 문제

이상적인 펌프나 turnstile은 매 rf 주기마다 전자 하나를 이웃한 금속섬에 전달해야 한다. co-tunneling은 전자가 금속섬 여러개를 동시에 통과하는 것으로 펌프의 불확도를 증가시키는 요인이 된다. 온도가 낮아질 수록 co-tunneling이 일어날 확률이 커지고 따라서 전류 오차가 증가한다. 접합의 개수를 증가시키면 이러한 co-tunneling을 줄일 수 있지만 이에 필요한 전압원(bias source) 개수가 증가하여 회로가 복잡해지고 다음에 기술할 반응시간의 문제를 가져온다. 현재 접합의 개수가 5개, 7개인 펌프가 제작되어 그 결과가 보고되었다[12].

3 반응시간의 문제

실용적인 전류표준기로 쓰이기 위해서는 1 nA 이상 수준에서 1 ppm 이하의 불확도를 가질 것이 요구된다. 1 nA 직류 전류를 얻기 위해서는 게이트에 걸어주는 교류 주파수가 1 GHz 이상이 되어야 한다. 일반적으로 쿨롱차폐현상은 접합저항이 100 k Ω 이상인 접합에서 나타난다. 전기 용량이 1 fF 이라할 때 이는 접합이 외부전압 변화에 반응하는 시간이 $\tau = R_T C = 10^{-10}$ 이 된다. 이는 $f_c = 1/\tau = 10^{10}$ 보다 높은 주파수를 갖는 교류에 접합이 반응하지 못함을 의미한다. Co-tunneling을 줄이기 위해서 금속섬 개수를 N 으로 늘리고 각각 섬에 π/N 의 위상차를 갖는 교류전압을 인가할 때 이상적인 표준기라면 다음 조건을 만족해야한다.

$$f < \alpha \frac{1}{NR_T C} \quad (3-1-1)$$

를 만족해야 한다. 여기서 α 는 1보다 작은 상수로 원하는 불확도의 크기에 의존하는데 1 ppm의 불확도를 가정할 때 0.01정도 값이된다. 7개 접합으로 이루어진 펌프의 경우 $N=6$ 이되고 $C=1$ fF이라 하면 위식을 만족하는 주파수가 15 MHz를 넘을 수 없고 이때 발생하는 전류가 1 pA 정도로 전류표준기로 쓰기에는 너무 적은 값이다. 전류를 증가시키기 위해서 접합을 병렬로 연결하여 7×1000 개의 접합을 갖는 2차원 배열로 만드는 방법이 있으나 이는 전하 offset을 증가시키는 등의 문제점이 있다.

제 2 절 전기용량 표준

전류표준기와 더불어 단전자 소자의 전기 표준에의 응용가능성으로 제시된 것이 전기용량(capacitance) 표준기이다. 전기용량이 C 인 축전기 양단에

전압 V 를 걸었을 때 대전되는 전하의 갯수를 n 이라 하면

$$ne = CV \quad (3-2-1)$$

가 된다. n 값을 정확히 알고 V 를 조셉슨 전압 표준기를 이용 10^{-8} 불확도로 측정하면 전기용량 C 를 같은 정도의 불확도로 측정할 수 있다. 이는 단전자 소자를 이용해 기존 표준기의 전기용량값을 정밀측정 할 수 있음을 의미한다. 또한 조셉슨 관계식에 의해 전압 V 는

$$V = m \frac{hf}{2e} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3-2-2)$$

로 주어진다. 여기서 f 는 조셉슨 접합에 가하는 rf주파수 이다. 식 (3-2-1)과 (3-2-2)를 합치면 미세구조상수 (fine structure constant)

$$\alpha = \frac{\mu_0 ce^2}{2h} = \frac{m}{4n} \mu_0 cfC \quad (3-2-3)$$

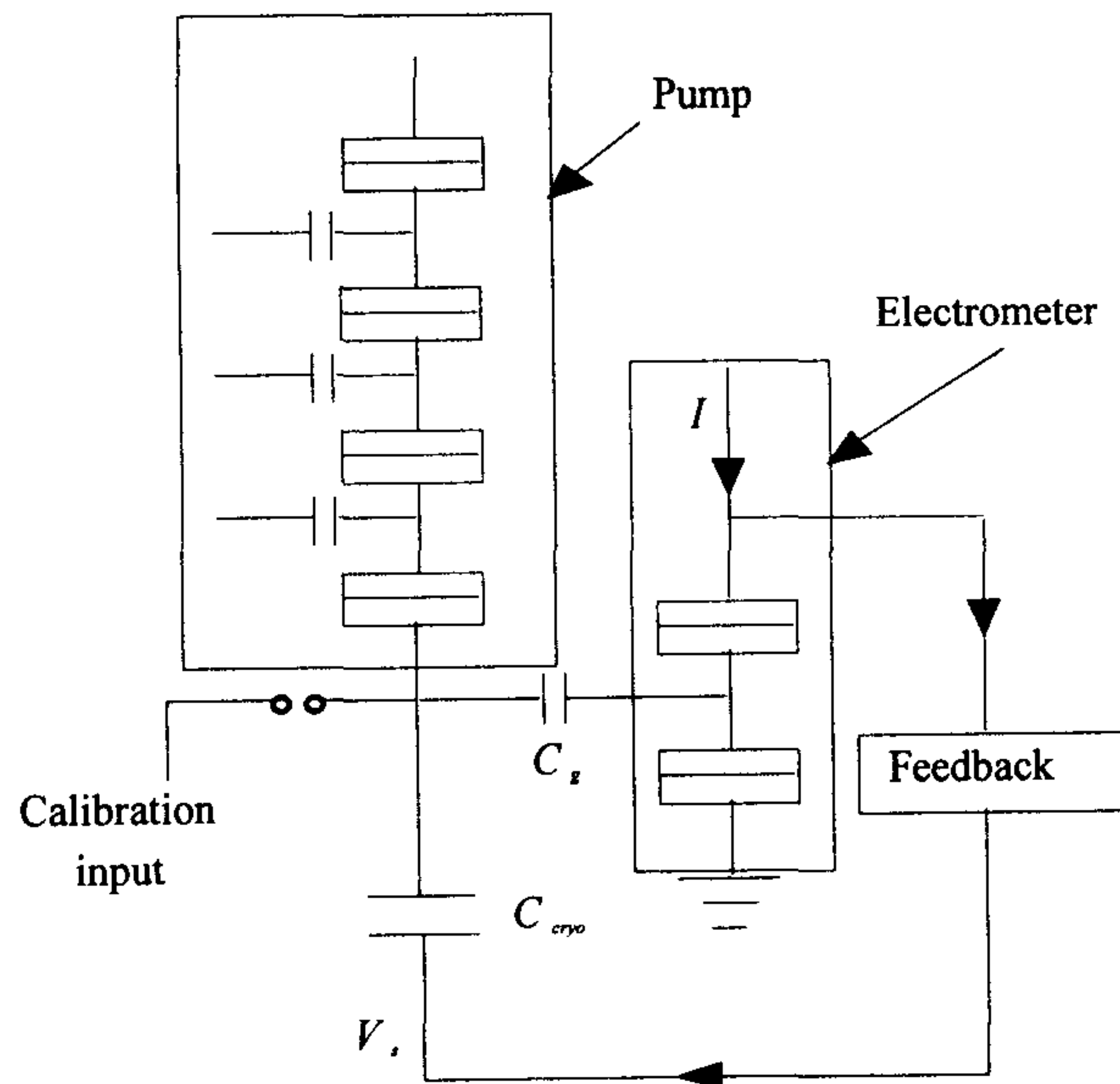


그림 3-2-1. 단전자 소자를 이용한 전기 용량 표준기 회로도.

를 얻는다. 현재까지 미세구조상수값은 양성자 자기회전비율 측정법이나 양자홀저항 측정법으로 결정되어졌는데 앞으로 단전자 소자를 이용해 미세구조상수값을 측정하는 새로운 길이 열리게 되었다. 그림 3-2-1 은 Williams 등이[15] 제안한 전기용량 표준기의 회로도로서 단전자 펌프[12]와 단전자 전류계(electrometer)[6]의 두 부분으로 이루어진다.

제 4 장 단전자 소자 제작

단전자 소자의 미세 접합 부분은 크기가 $1\mu\text{m}$ 보다 작아야하므로 전자빔 식각(electron-beam lithography)을 이용하여 제작한다. 그러나 전자빔 식각은 노광속도가 느리기 때문에 소자특성 측정시 필요한 $1\times 1\text{ mm}^2$ 이상 크기의 전극은 광 식각법(photo lithography)으로 제작하였다.

먼저 그림 4-1과 같이 전극과 align key를 image reverse와 lift-off법으로 제작한다. 제작된 패턴에 전자빔 증착기(electron-beam evaporator)를 이용하여 Ti (5 nm)과 Au(15~20 nm) 박막을 증착한 후 아세톤에 담가 photoresist를

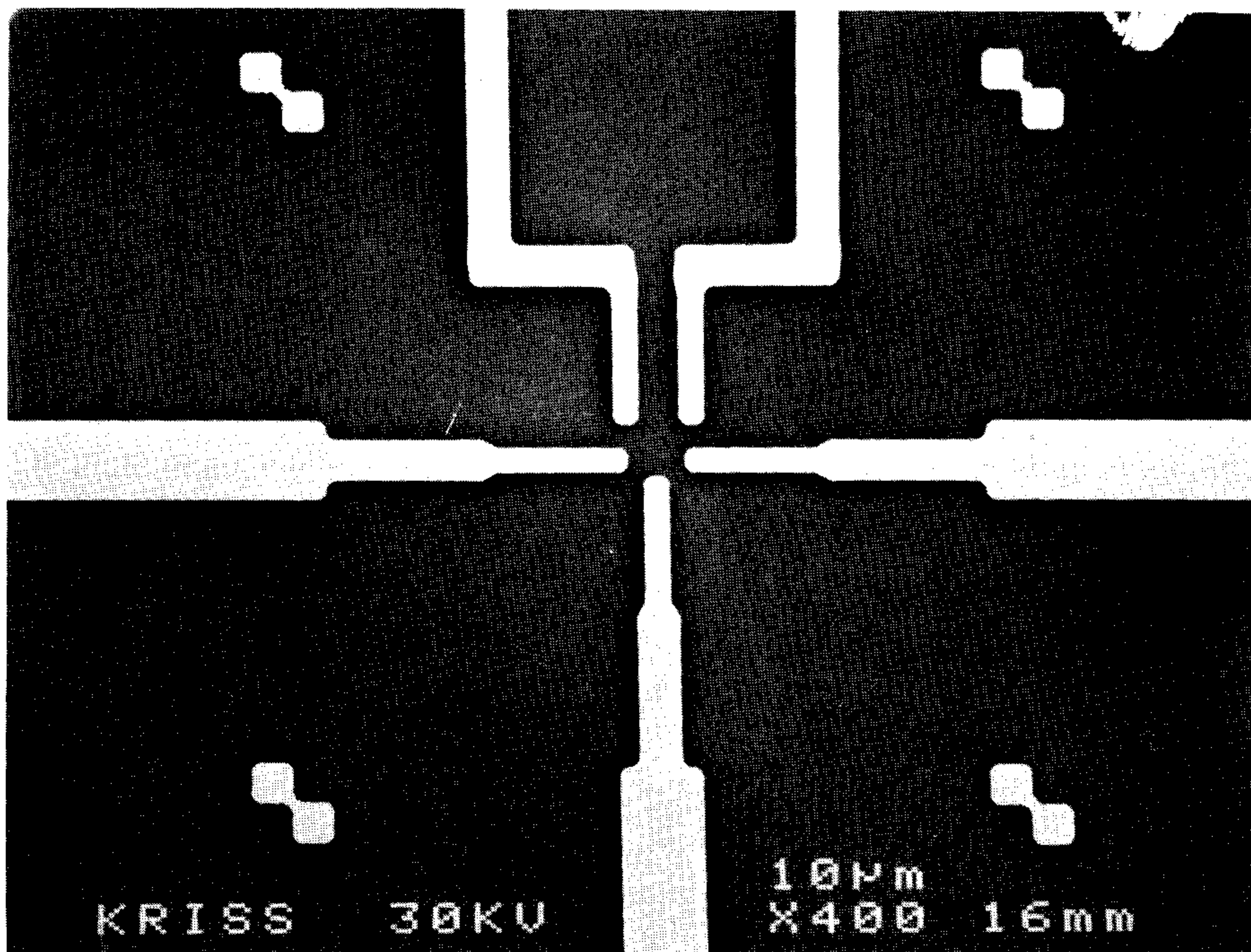
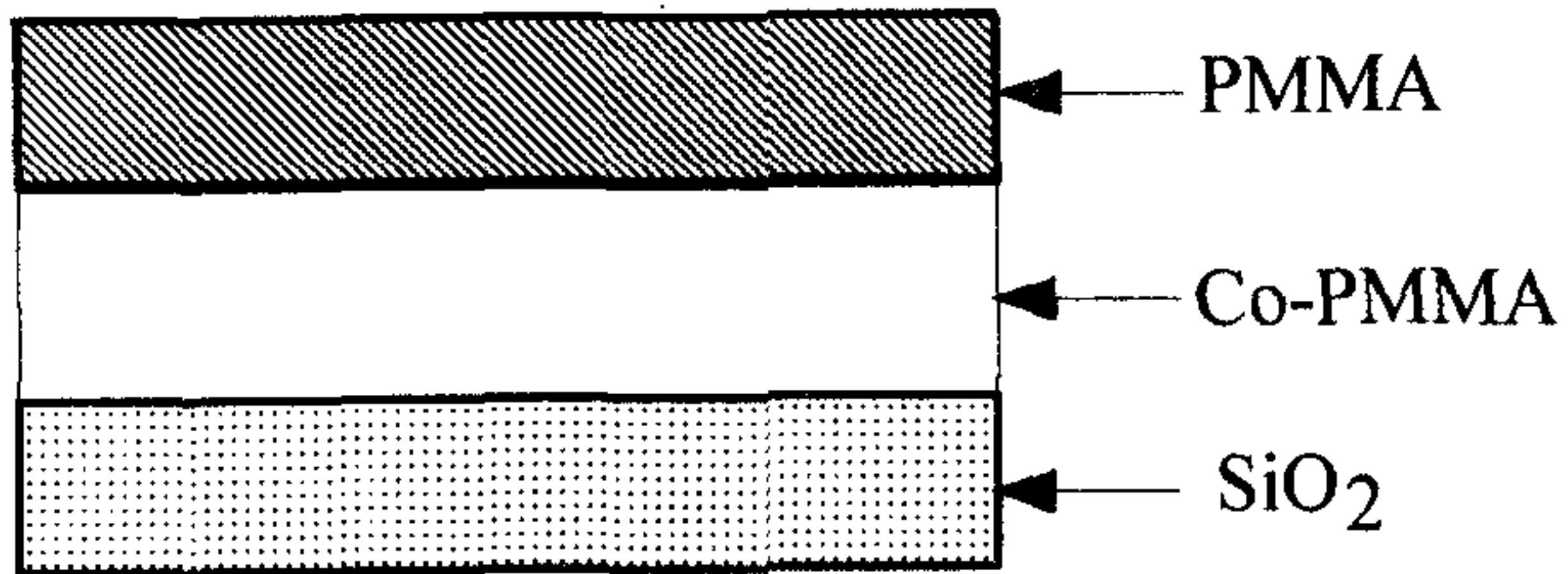
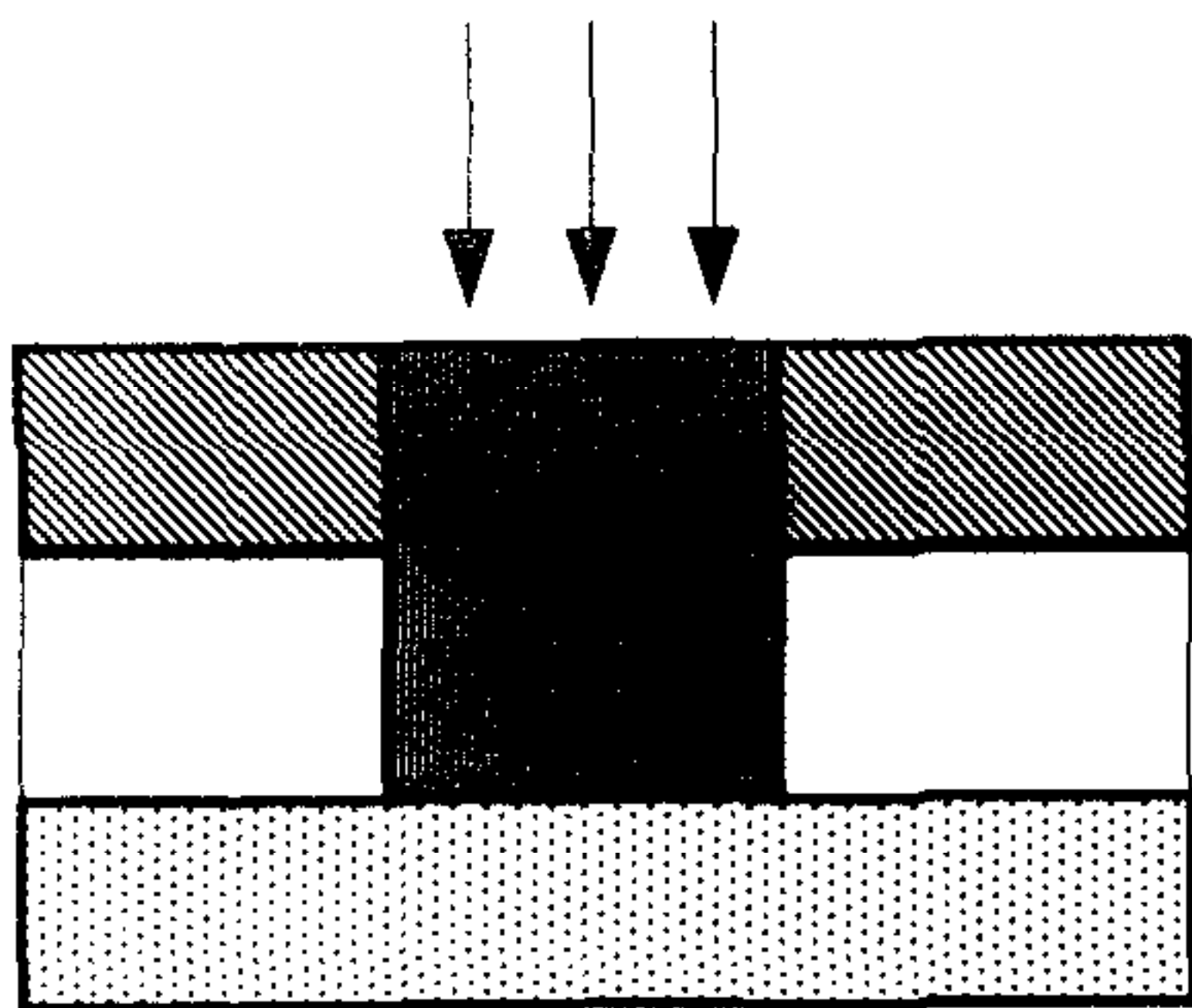


그림 4-1. 광 식각법과 lift-off법으로 제작된 Au전극과 align key의 SEM (Scanning Electron Microscope)사진.

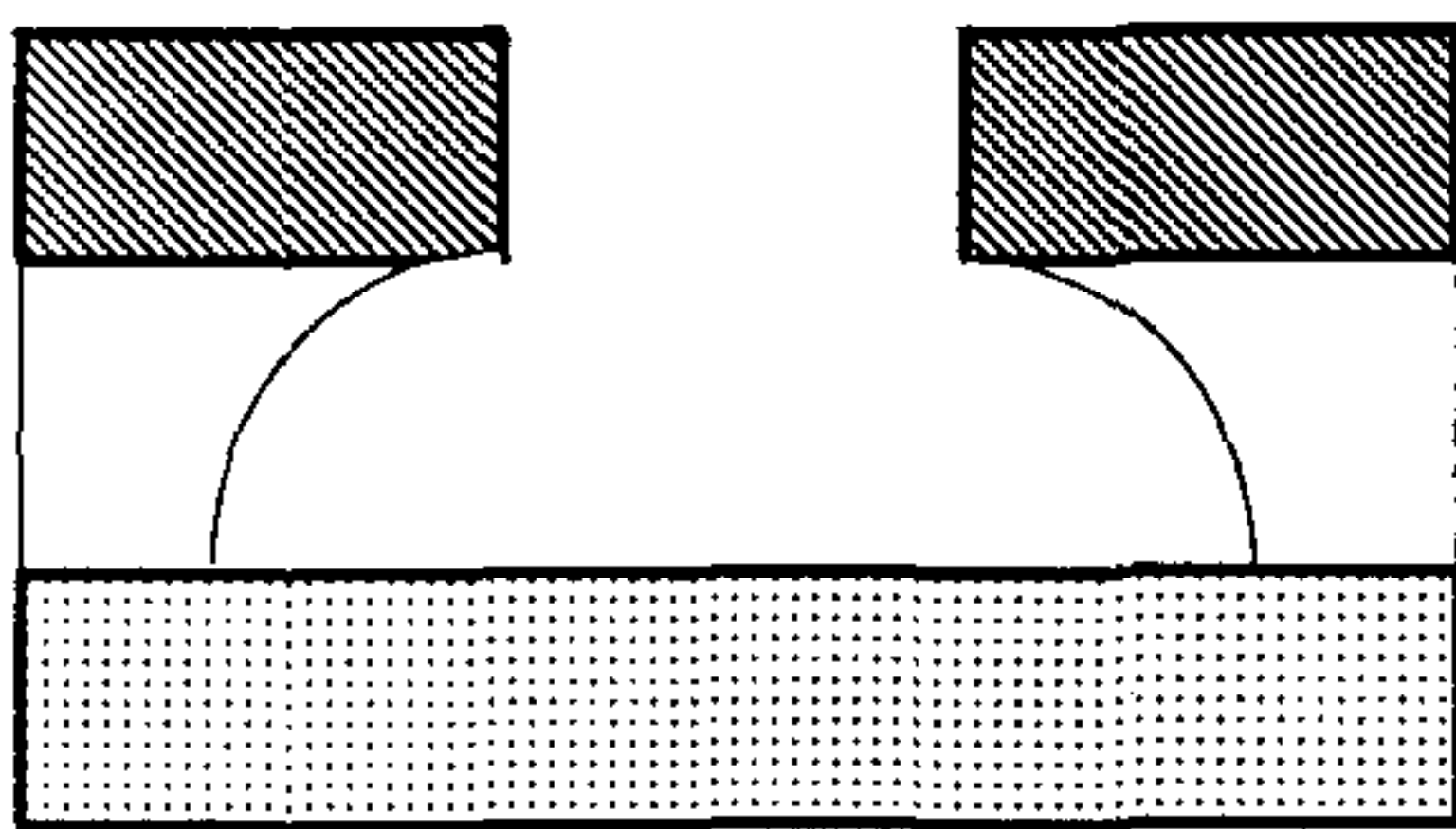
(a) Resist coating



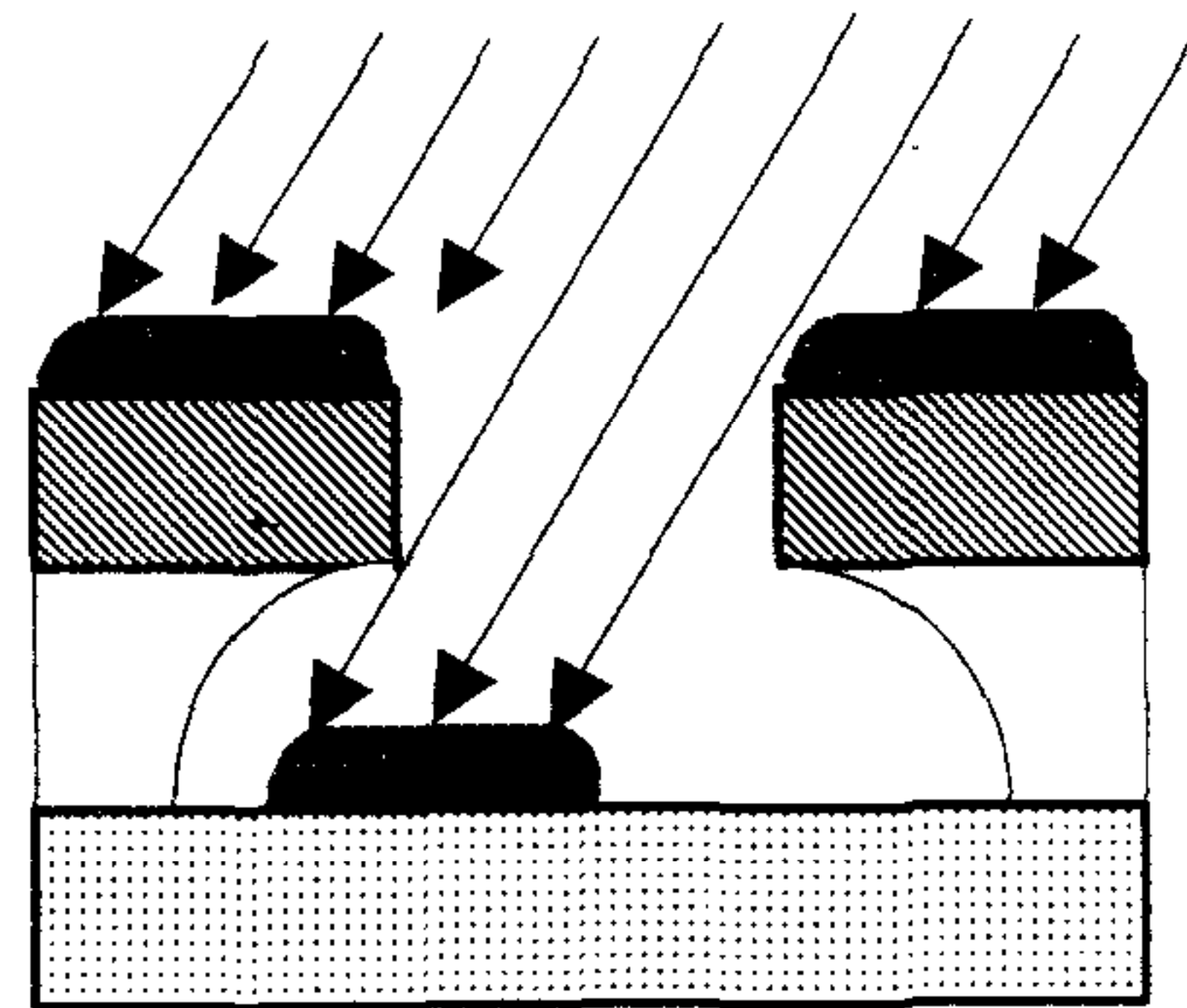
(b) e-beam exposure



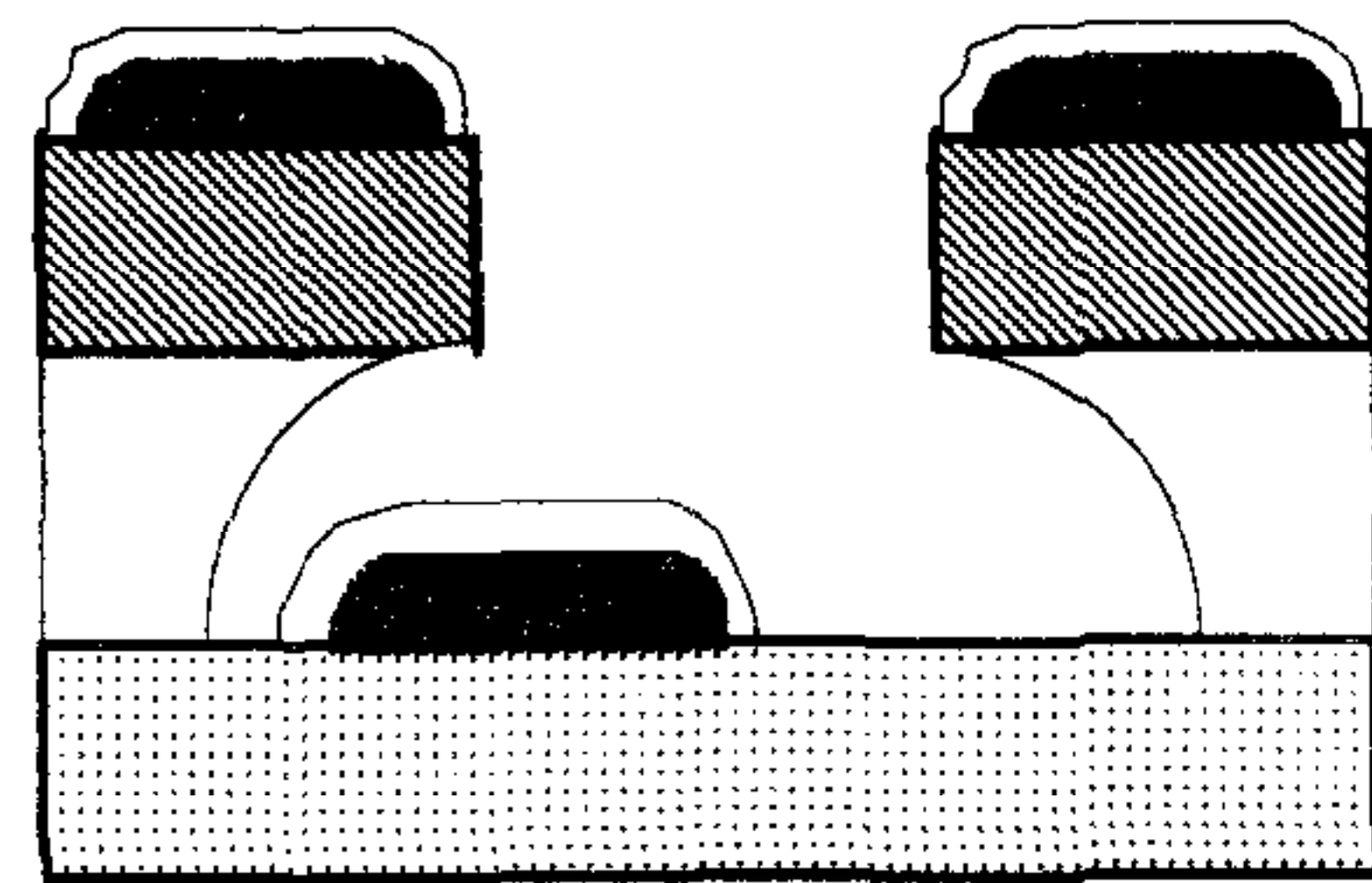
(c) Develop



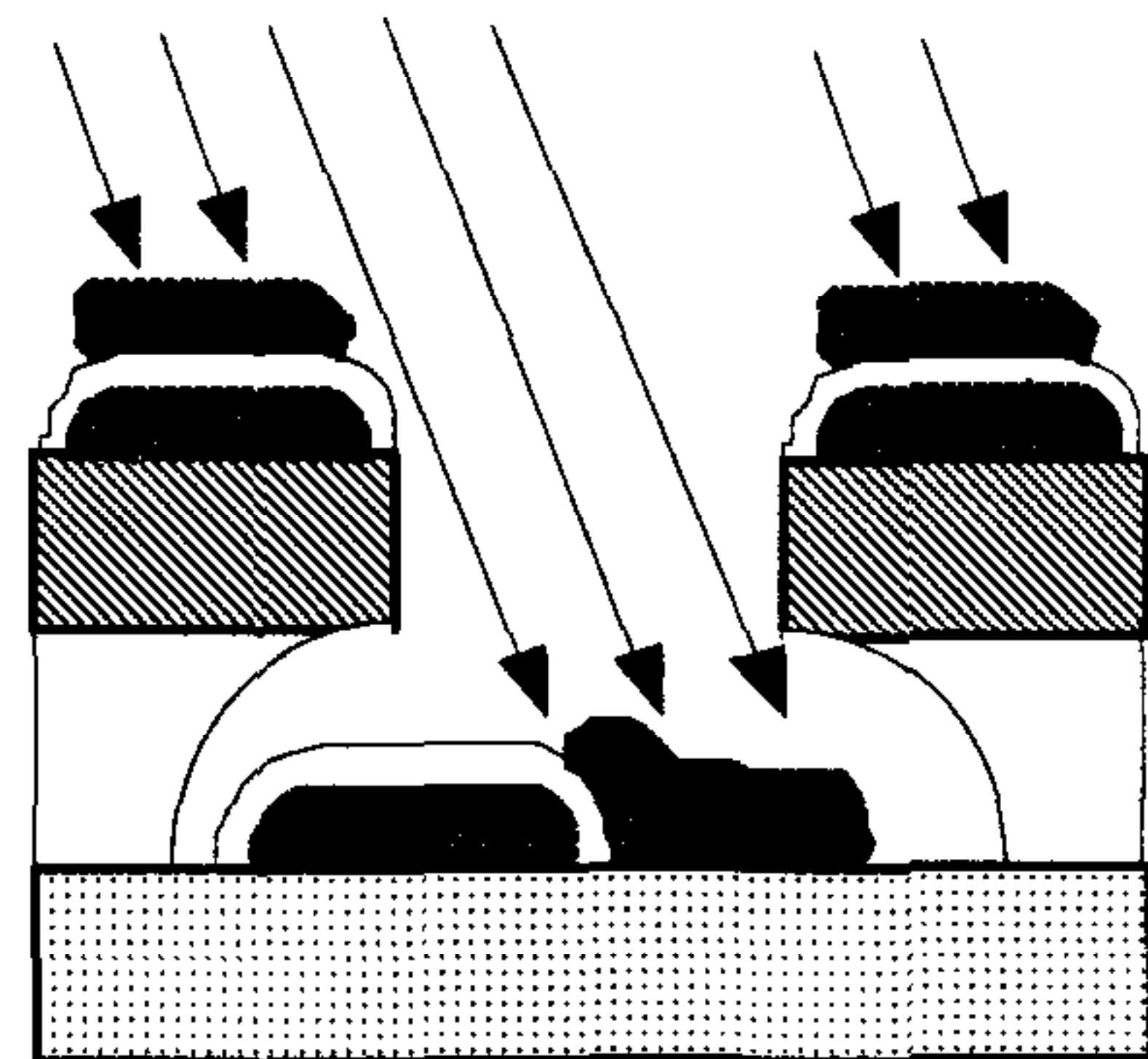
(d) Al evaporation



(e) Oxidization



(f) Al evaporation



(g) Lift-off

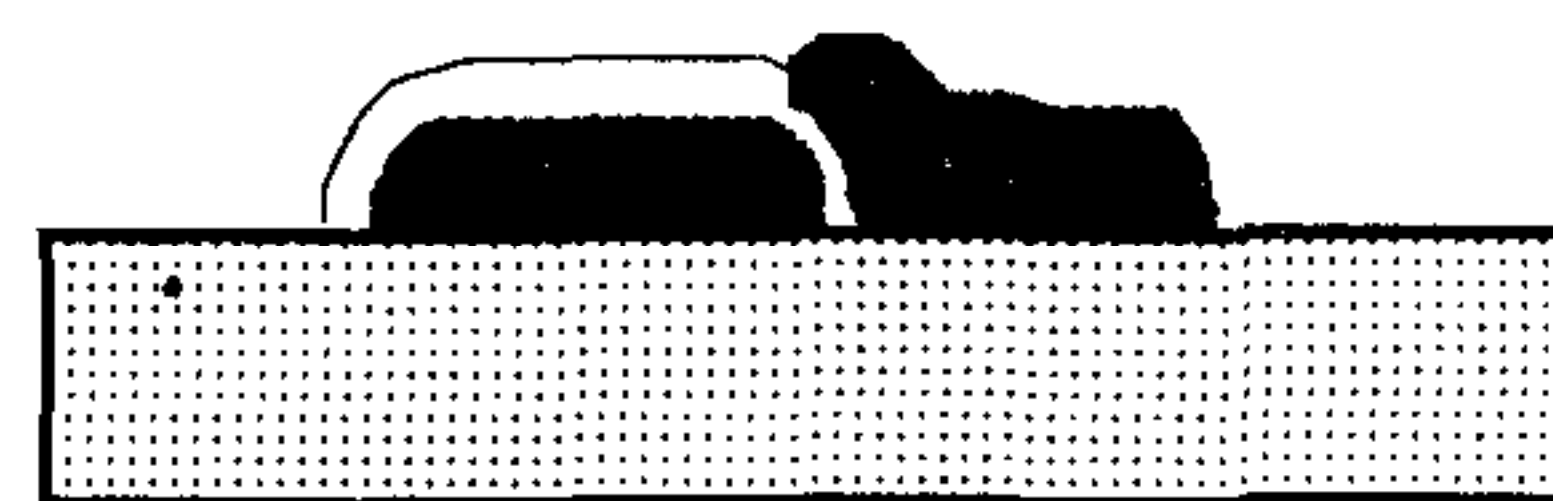


그림 4-2. 시료 제작 공정 개략도

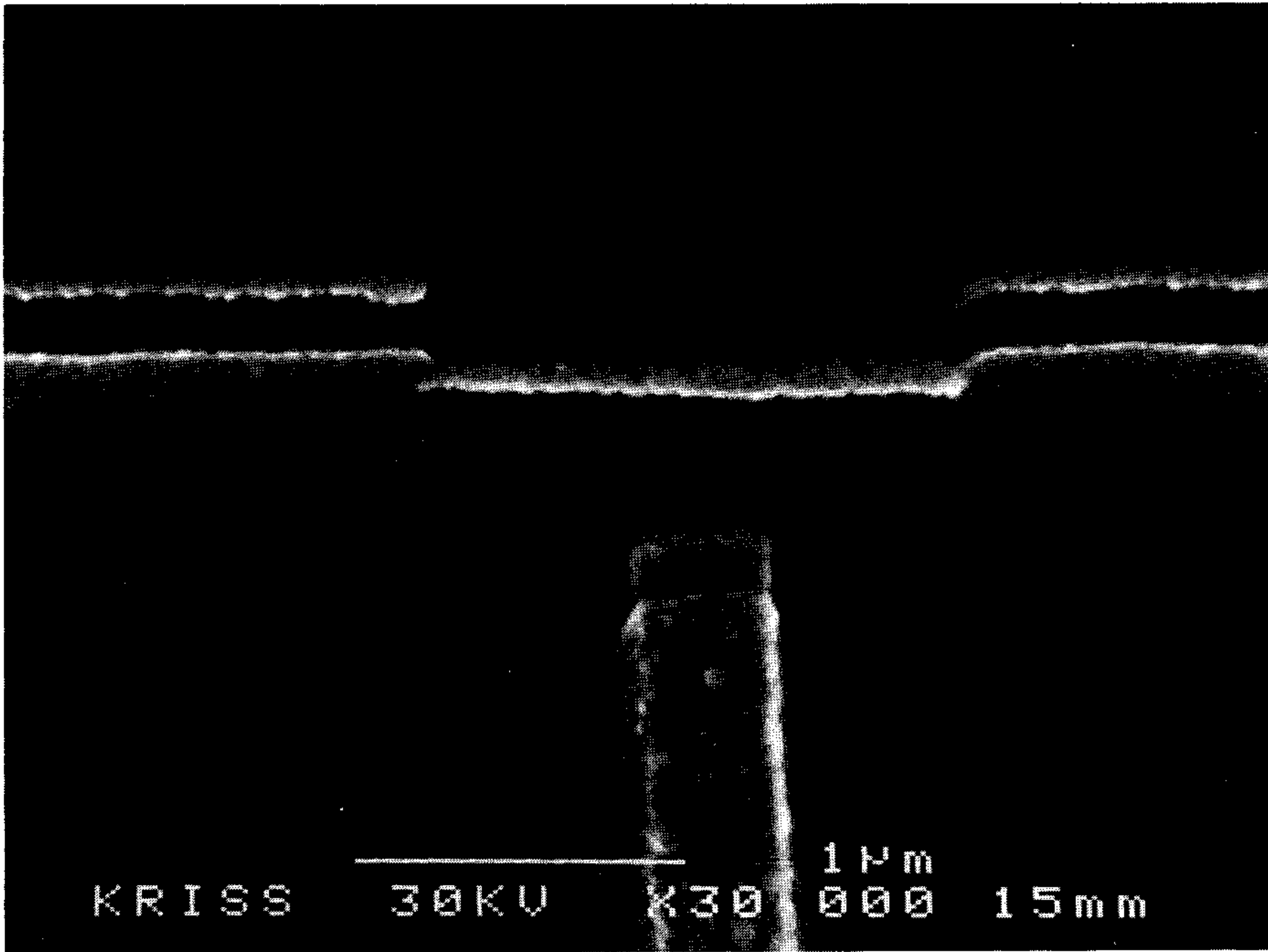
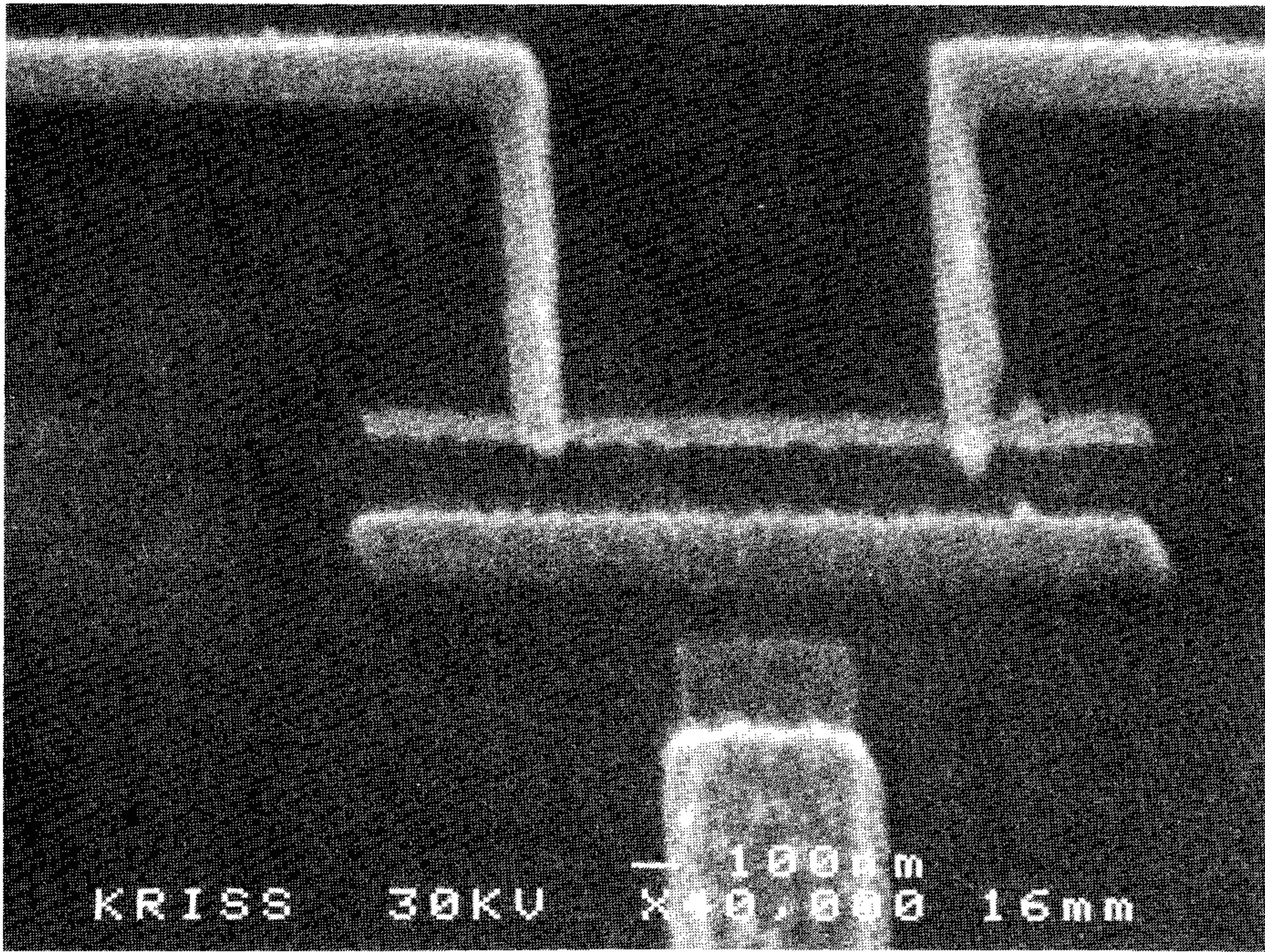


그림 4-3. 제작된 시료의 SEM사진.

없었다. 전극으로 쓰이는 Au가 Si기판에 잘 부착하지 않아 일종의 buffer로 Ti를 사용했다.

전극을 제작한 후 다음과 같은 방법으로 접합을 제작하였다. 우선 Si 기판위에 CVD방법으로 약 100 nm정도 두께의 SiO₂ 절연층을 증착시킨다. Si기판은 상온에서 전기 전도도를 가지기 때문에 접합 제작후 상온에서 접합 저항을 측정할 수 없으므로 절연층을 증착하였다.

전자빔 식각용 resist는 Co-PMMA(PMAA/MAA)와 PMMA(4%) 두 층을 사용하였다. 먼저 Co-PMMA를 입히고 150 °C에서 20분간 열처리한 후 그 위에 PMMA를 다시 입히고 마찬가지로 150 °C에서 20분간 열처리하였다. Co-PMMA와 PMMA 두 층을 사용한 까닭은 Co-PMMA가 PMMA보다 훨씬 더 작은 분자량을 가지고 있기 때문에 PMMA보다 용매에 더 빨리 용해되어 우리가 원하는 undercut 이 만들어지기 때문이다. 이 undercut은 양각 증착법(double-angle evaporation)을 이용한 미소접합 제작에 중요한 역할을 한다.

Resist를 입힌후 원하는 패턴을 그리는데 먼저 align key를 이용하여 그릴 위치를 찾은 후, 가속전압 30 kV, 전류 10 pA의 전자 빔으로 패턴을 그린다. 노광후에 MIBK(Methyl Iso-Buthyle Ketone): IPA(Iso-Prophyl Alcohol)=1 : 3 용액에 약 50 초간 담가 현상(develop)한다.

전자빔 식각후 단전자 소자는 Al/AlO_x/Al 접합을 그림 4-2와 같이 양각 증착법으로 제작하였다. Al을 선택한 이유는 양질의 산화막(AlO_x)을 만들기 쉬워서 증착시 진공을 깨지않고 in-situ로 접합을 제작할 수 있기 때문이다. 그림 4-3은 제작된 단전자 소자의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이다. 접합의 크기가 50~100 nm인 시료가 제작되었다.

제 5 장 단전자 소자 특성 측정

제 1 절 측정 장치

단전자 소자의 특성은 그림 5-1-1과 같은 회로를 이용하여 측정하였다. 전압원(bias source)으로는 Keithley 213 Quad Voltage Source를 사용하였는데 4개의 bias source중 하나를 source와 drain간에 또 하나를 gate에 걸

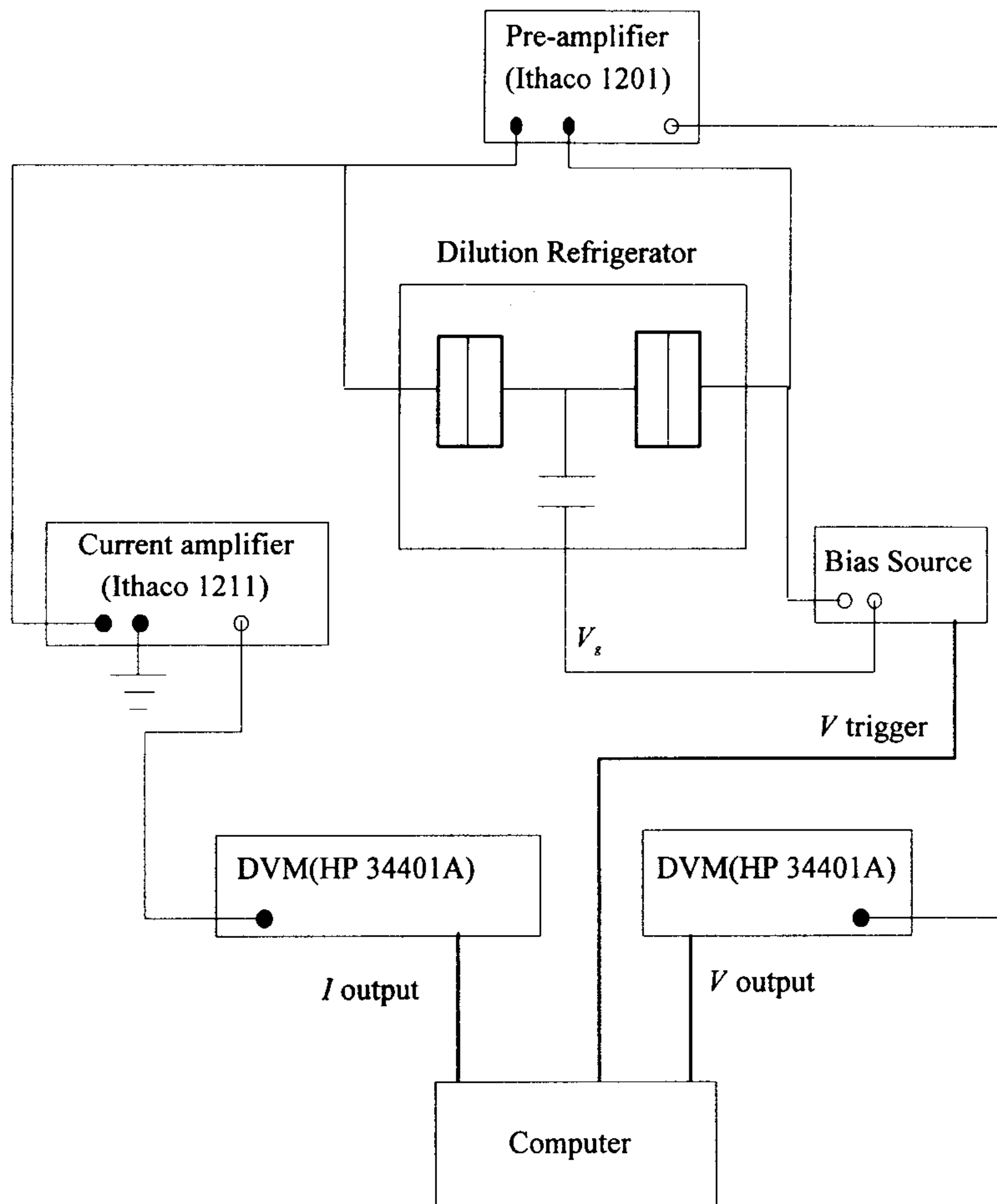


그림 5-1-1. 단전자 특성 측정 회로 개략도.

어주는 전압원으로 사용하였다. source와 drain간의 전류와 전압은 각각 Ithaco 1211 current amplifier와 Ithaco 1201 low noise pre-amplifier를 통과한 출력을 HP 34401A DVM(Digital VoltMeter)를 사용하여 측정하였다. DVM과 bias source는 GPIB card를 통해 컴퓨터와 연결되고 단전자 특성 측정을 위해 제작한 LabView 프로그램으로 제어된다. 소자의 $I-V_g-V$ 특성을 보기 위해서는 source와 drain간에 인가하는 전압 V 를 바꿔주면서 $I-V_g$ 특성을 측정하는데 이를 수동으로 하면 많은 시간과 노력이 든다. 본 측정에 사용한 LabView 프로그램은 자동적으로 $I-V_g-V$ 특성을 측정할 수 있도록 만들어져서 야간에 실험자없이 자동측정이 가능하다.

제 2 절 측정 결과

그림 5-2-1은 온도 10 mK에서 시료 S1의 전류-전압 특성곡선이다. AI은 약 1.2 K에서 초전도 전이를 하므로 10 mK에서 단전자 트랜지스터는 S-I-S-I-S의 접합 형태를 갖는다. 일반적으로 접합저항이 $R_Q \sim 26 k\Omega$ 보다 훨씬 큰 경우 쿠퍼쌍(Cooper pair) 투과에 의한 초전류(supercurrent)는 발생하지 않지만 준입자(quasi-particle) 투과에 의한 초전도 갭(superconducting gap)은 뚜렷하게 나타난다. 그림 5-2-1에서 보듯 전류-전압 곡선의 양끝에서 그은 접선이 전압축에 만나는 점은 식 (2-1-1)에서처럼 단순히 E_c 로 주어지는 것이 아니라

$$E'_c = E_c + 2n\Delta = \frac{e^2}{2C_\Sigma} + 2n\Delta \quad (5-2-1)$$

가 된다[6]. 여기서 n 은 접합의 개수(=2), Δ 는 초전도 갭, C_Σ 는 금속섬의 총 전기용량 $C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_g$ 이 된다. 자기장을 걸어서 AI을 정상상태로 만들면 초전도 갭이 사라지고 쿨롱갭만이 나타난다[그림 5-2-2]. 양 끝에서 그은 접선이 전압축에 만나는 두 점을 잡아 평균값을 구하면 $E_c = 0.23 \pm 0.03$

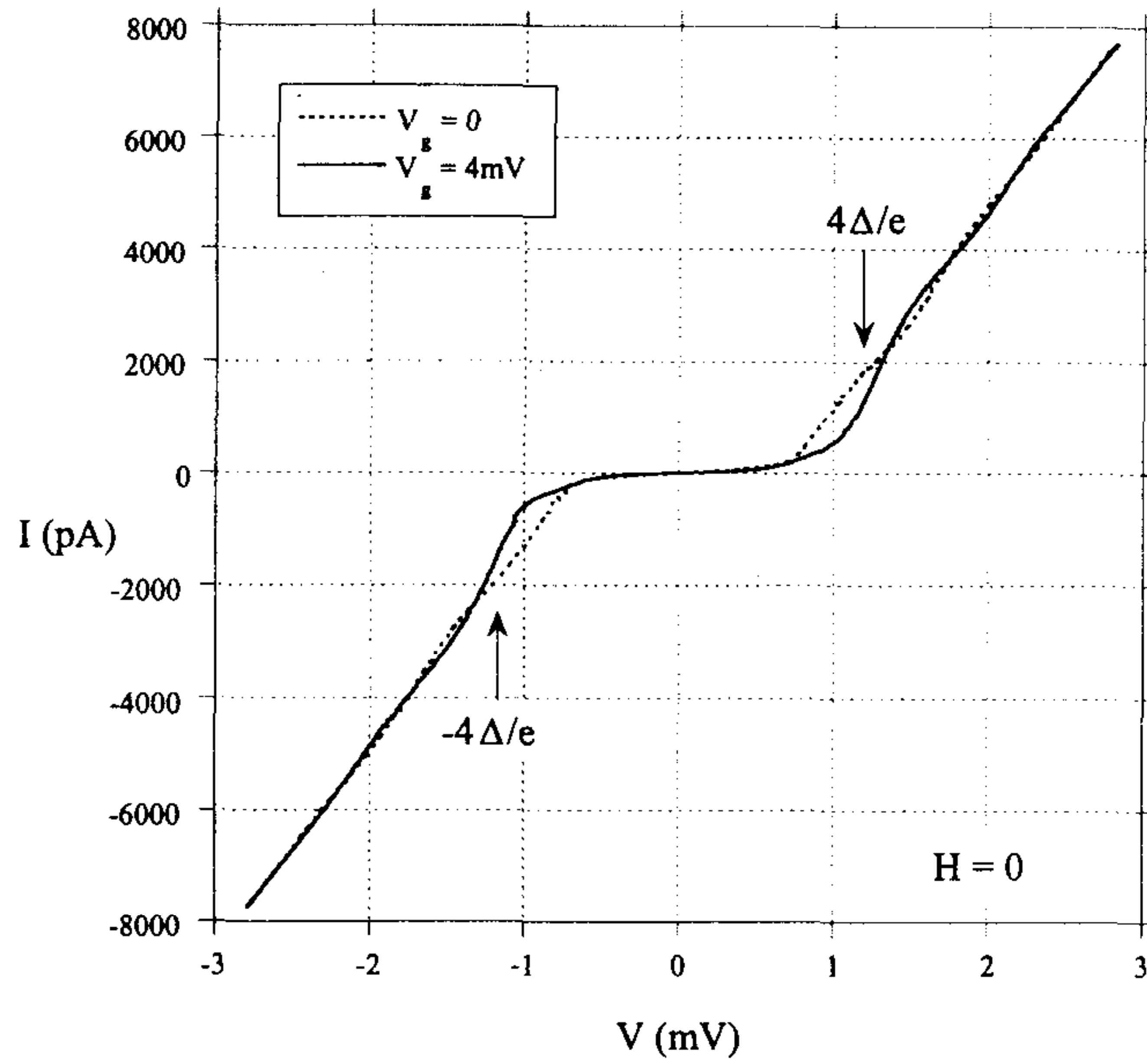


그림 5-2-1. $T=15$ mK일 때 초전도 상태인 시료 S1의 전류-전압 곡선.

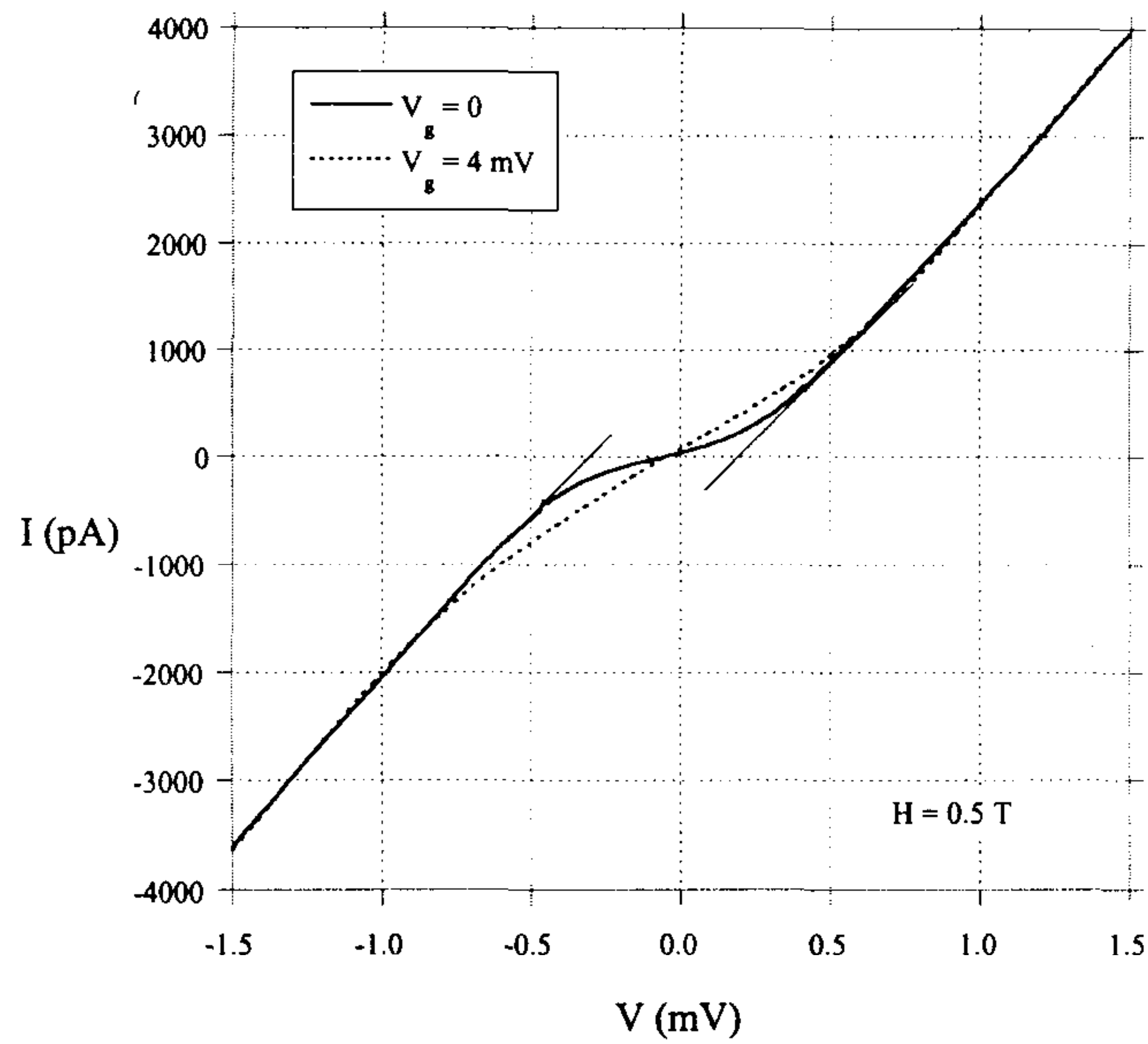


그림 5-2-2. $T=15$ mK일 때 정상 상태인 시료 S1의 전류-전압 곡선. Al을 정상상태로 만들기 위해 0.5 T의 자기장을 걸었다.

meV을 얻고 $E_c=e^2/2C_\Sigma$ 를 이용하면 $C_\Sigma=0.32\pm 0.3$ fF을 얻는다.

게이트에 전압을 걸어주고 전류-전압 곡선을 측정하면 그림 5-2-2의 점선처럼 저전압에서 전류가 증가한다. $V_g\approx 4\text{mV}$ 근처에서 전류가 최대값이 되는데 두 접합이 동일하다고 가정하면($C_1=C_2, R_1=R_2$) 이 값에서 $C_g V_g \approx e/2$ 를 만족하고 따라서 $C_g \approx 0.02$ fF를 얻는다. 위에서 구한 C_Σ 에 이 값을 대입하면 $C_1=C_2=0.15\pm 0.2$ fF을 얻는다. 그림 4-3에서 보듯이 금속섬은 source나 drain과는 수 nm 두께의 AlOx와 연결되어 있으나 게이트와는 $0.5 \mu\text{m}$ 정도 떨어져 있어서 본 실험에서 제작한 시료와 같은 모양에서는 게이트 전기용량 C_g 가 접합 전기용량 C_1, C_2 보다 훨씬 적을 것이 예상된다.

접합 저항은 전류-전압 곡선의 양끝에서 그은 점선의 기울기를 접합의 개수로 나눈 값이 된다. 이런 식으로 측정에 사용한 각 시료의 접합 매개변수값을 추정할 수 있는데 두 접합이 동일하다고 가정하고서 구한 접합 특성 변수(Junction parameters)를 표 5-2-1에 정리하였다. 유효접합 크기 l_{eff} 는 SEM사진으로 추정한 접합면 넓이 A의 제곱근을 취한 값이다.

게이트 전압을 변화 시키며 source와 drain사이에 발생하는 전류를 측정하면 주기적인 전류의 변화를 볼 수 있다. 그림 5-2-3은 시료 S1의 온도에 따른 $I-V_g-V$ 특성곡선이다. Al을 정상상태로 만들기 위해 0.5T의 자기장을 걸었다. 온도가 증가할수록 전류 변화폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 전류 변화의 주기는 온도에 상관없이 일정하며 $\Delta V=8.0\pm 0.5$ mV로 이로부터 $C_g \sim 0.02$ fF 임

표 5-2-1. 시료의 접합 특성변수

Sample	$C_1=C_2(\text{fF})$	$C_g(\text{fF})$	$R_T(\text{M}\Omega)$	$l_{\text{eff}}(\text{nm})$
S1	0.15 ± 0.2	~ 0.02	0.35 ± 0.04	60 ± 5
S2	0.23 ± 0.3	~ 0.017	6.1 ± 0.6	100 ± 10
S3	0.017 ± 0.002	~ 0.028	1.9 ± 0.2	50 ± 5

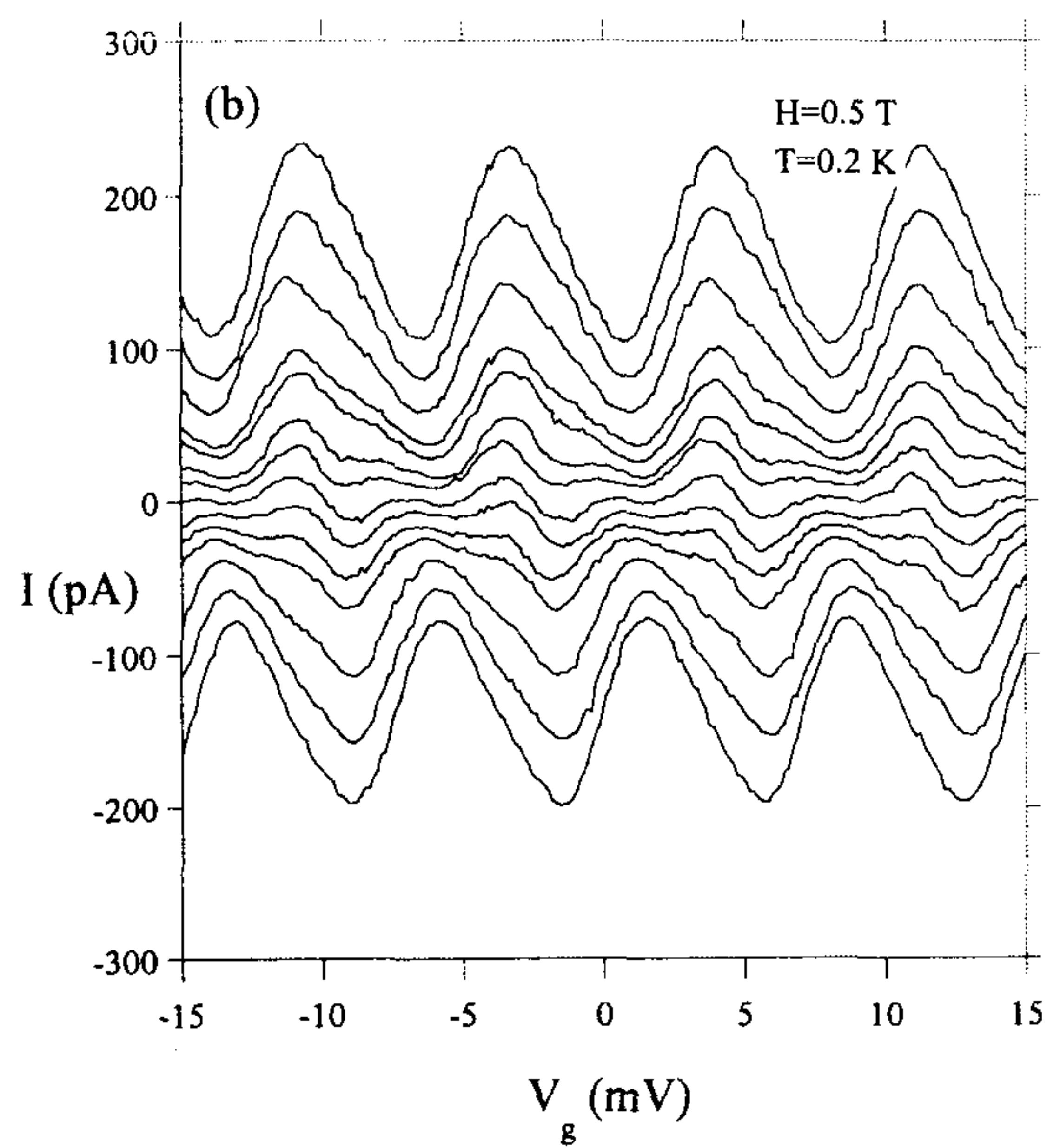
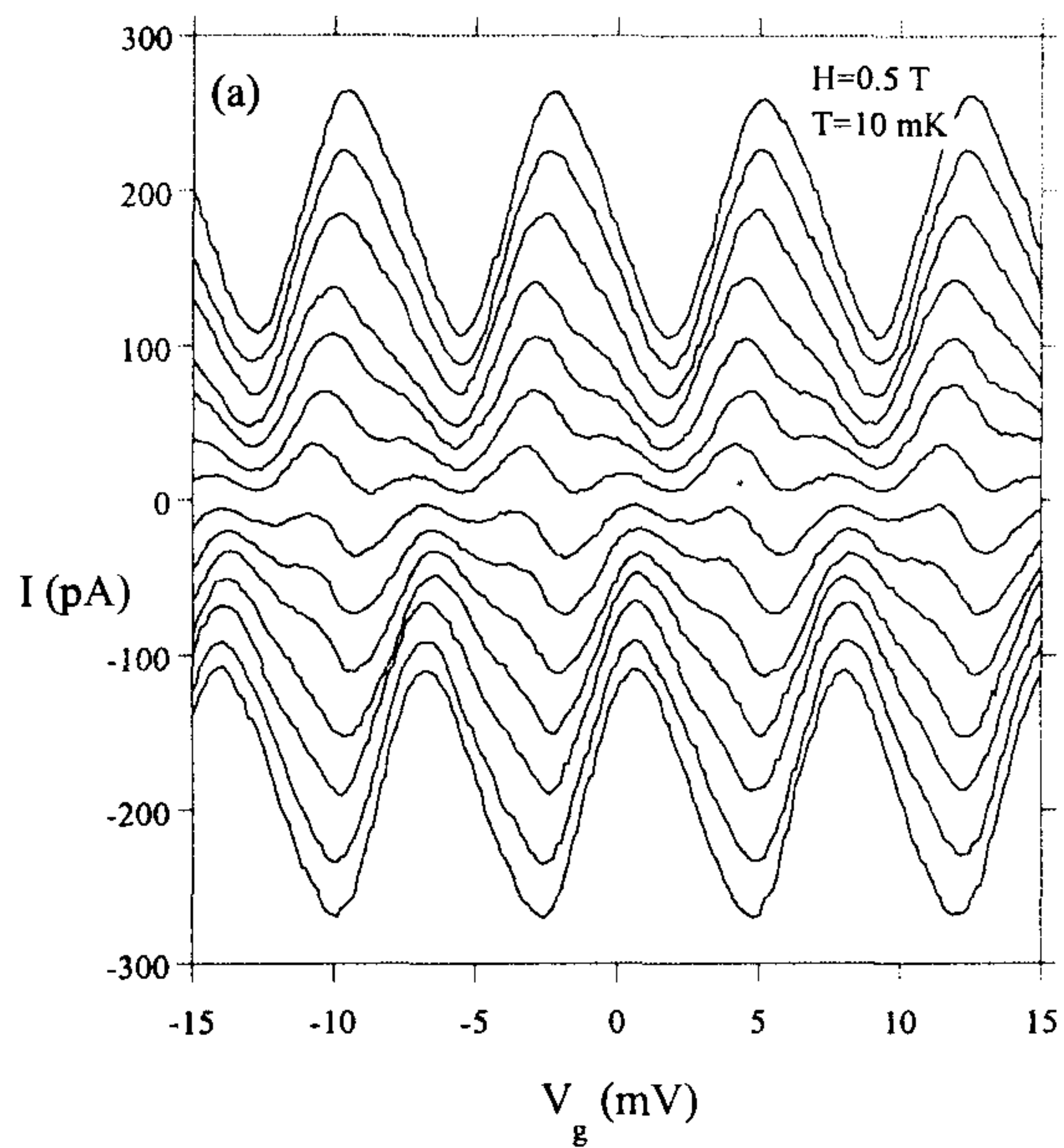


그림 5-2-3. 시료 S1의 온도에 따른 $I-V_g-V$ 특성곡선 변화: $T=(a)$ 10 mK
(b) 0.2 K, (c) 0.5 K, (d) 0.77 K.

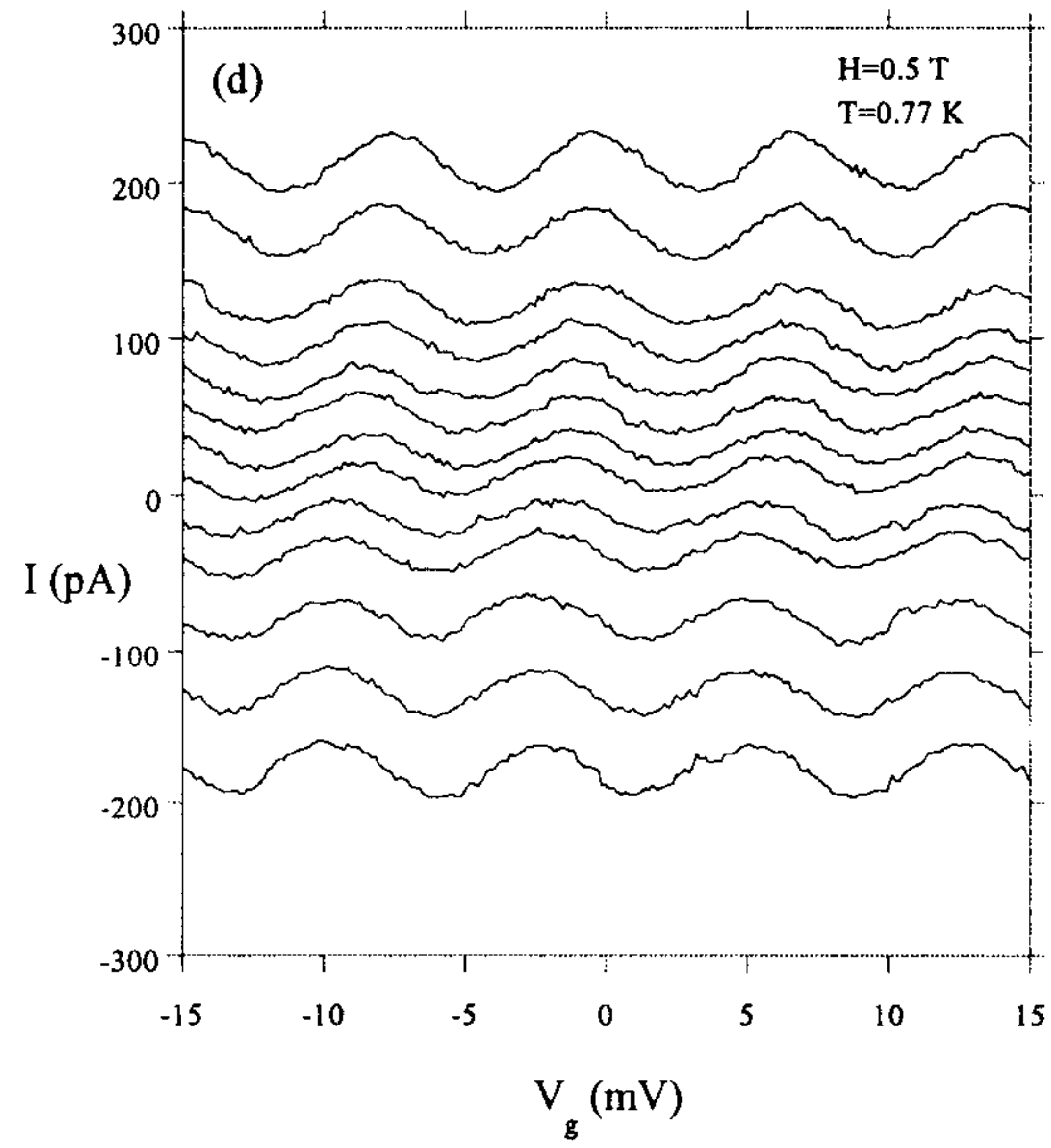
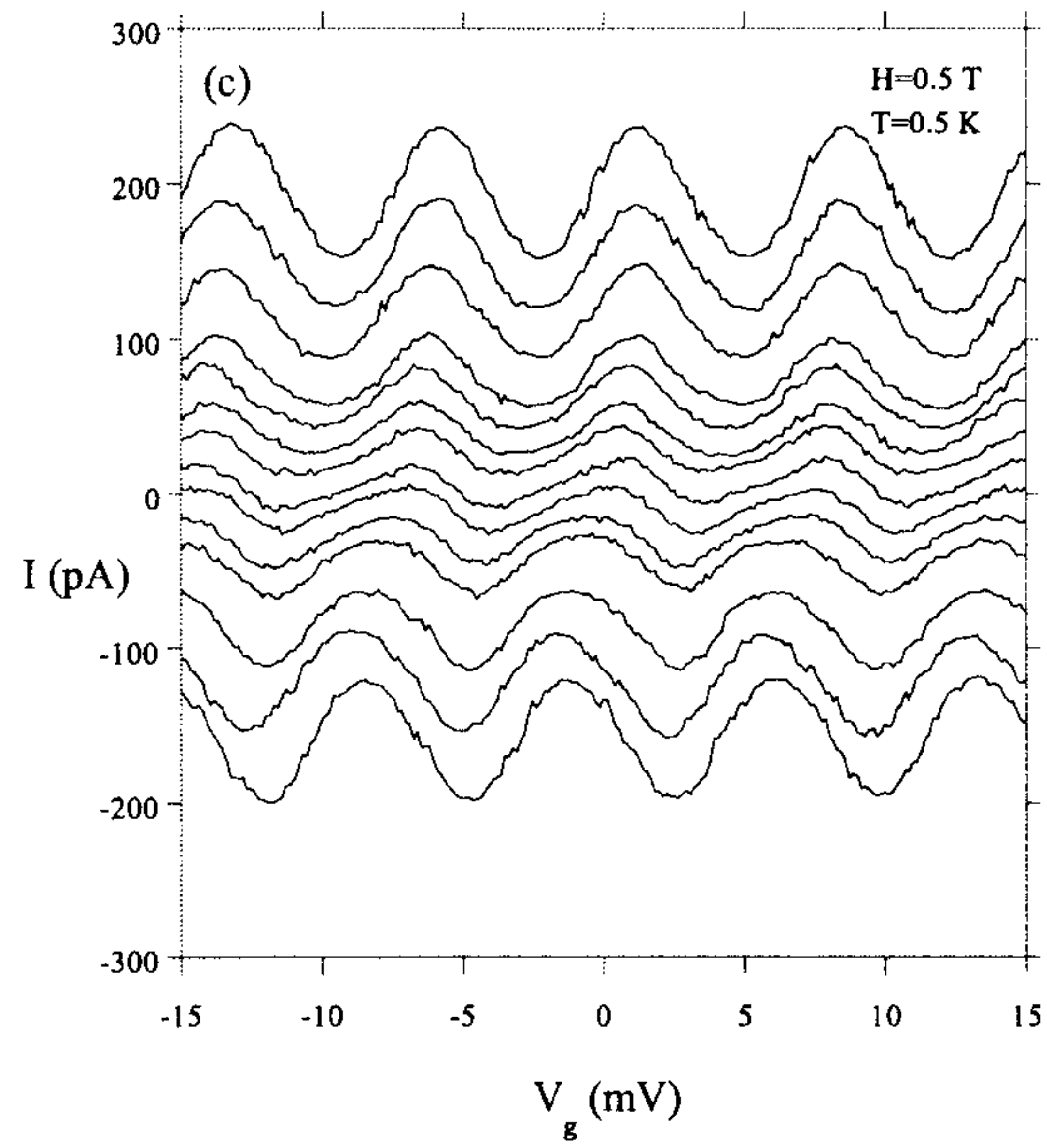


그림 5-2-3. Continued

을 알 수 있다. 특기할 점은 낮은 온도에서 source-drain 사이에 인가한 전압이 적을 때 main peak외에 작지만 뚜렷한 또 하나의 sub-peak가 나타나는 것이다. 이와 같은 sub-peak의 존재는 다른 그룹이 행한 실험에서도 관찰되었는데 Hergenrother등은[16] photon-assisted tunneling으로 설명하였다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 전자빔 식각장치와 양각증착법을 이용하여 크기가 50~100 nm인 두 개의 미소접합을 가지는 단전자 트랜지스터를 제작하고 특성을 측정하였다. 전자빔 식각기술 및 측정장치를 개선하여 50~100 nm 수준의 접합을 안정적으로 제작할 수 있었으며 단전자효과를 뚜렷히 관측하는데 성공하였다. 접합저항은 0.35~6.1 M Ω 이었고 쿨롱갭의 크기는 0.23~0.57 meV였다. 저온에서 $I-V_g-V$ 특성을 살핀 결과 게이트 전압 V_g 의 변화에 따른 전류 I 의 진동을 관찰 할 수 있었고 전압 주기로 계산한 게이트 전기용량은 0.017~0.028 fF 정도였다.

참 고 문 헌

- [1] D. V. Averin and K. K. Likharev, "Coulomb blockade of single-electron tunneling, and coherent oscillation in small tunnel junctions," *J. Low Temp. Phys.* 62, 345 (1986).
- [2] K. K. Likharev, "Correlated discrete transfer of single electrons in untrasmall tunnel junctions," *IBM J. Res. Develop.* 32, 144 (1988).
- [3] *Single charge tunneling*, edited by H. Grabert and M. H. Devoret (Plenum, New York, 1992).
- [4] C. J. Gorter, "A possible explanation of the increase of the electrical resistance of thin metal film at low temperatures and small field strengths," *Physica* 17, 777 (1951).
- [5] T. A. Fulton and G. J. Dolan, "Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions," *Phys. Rev. Lett.* 59, 109 (1987).
- [6] D. Song, "Properties of Coulomb-blockade electrometers in the superconducting state," Ph. D. thesis, Univ. of Maryland (1997).
- [7] A. Clark *et al.*, "Application of single-electron tunneling: precision capacitance ration measurement," *Appl. Phys. Lett.* 66, 2588 (1995).
- [8] See for example, R. Pöpel, *Metrologia* 29, 153 (1992).
- [9] H. Pothier *et al.*, "Single electron pump fabricated with untrasmall normal tunnel junctions," *Physica B* 169, 573 (1991).
- [10] H. Pothier, *et al.*, "Single-electron pump based on charging effects," *Europhys. Lett.* 17, 249 (1992).
- [11] J. M. Martinis, M. Nahum, and H. D. Jensen, "Metrological accuracy

- of the electron pump,” *Phys. Rev. Lett.* 72, 904 (1994).
- [12] M. W. Keller, *et al.*, “A seven-junction electron pump: design, fabrication, and operation,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 46, 307 (1997).
- [13] L. J. Geerigs *et al.*, “Frequency-locked turnstile devices for single electrons,” *Phys. Rev. Lett.* 64, 2691 (1990).
- [14] H. D. Jensen and J. M. Martinis, “Accuracy of the electron pump,” *Phys. Rev. B* 46, 13407 (1992).
- [15] E. R. Williams, R. N. Ghosh, and J. M. Martinis, “Measuring the electron’s charge and the fine-structure constant by counting electrons on a capacitor,” *J. Res. NIST* 97, 299 (1992).
- [16] J. M. Hergenrother, “Parity effects and charge transport in the single-electron transistor,” Ph. D. thesis, Harvard University (1995).

여 백

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. 관리번호	2. 수행부서 전기그룹	3. 발행일 1998. 1
4. 제목/부제 초전도 기술 개발 연구			7. 주제분야	
5. 저자 (공저자) 박용기, 김규태, 권혁찬, 박종완, 박종철		8. 수행기관 보고서번호 KRISS-98-025-IR		
6. 수행기관 (KRISS 이외의 공동 혹은 위촉연구기관)		9. 계약번호		
		10. 자료내역		
11. 위탁기관 과 학 기 술 처				
12. 보충사항				
13. 초록 (주요 참고문헌이나 관련문헌이 있을 경우 여기에 명시한다) 전자빔 식각기술 및 양각증착법을 개선하여 50~100 nm 수준의 단전자접합을 안정적으로 제작할 수 있게 되었다. 크기가 50~100 nm인 두 개의 Al/AlOx/Al 접합이 직렬로 연결된 단전자 트랜지스터를 제작하였다. 접합저항은 0.35-6.1 MΩ 이었고 쿨롱갭의 크기는 0.23~0.57 meV였다. $I-V_g-V$ 특성을 살핀 결과 게이트 전압 V_g 의 변화에 따른 전류 I 의 진동을 관찰 할 수 있었고 전압 주기로 계산한 게이트 전기용량은 0.017~0.028 fF 정도였다. 개발된 단전자소자 제작기술은 전기표준용의 electrometer 로 활용될 수 있을 것으로 기대되며 앞으로 새로운 전기용량 표준, fine structure constant의 정밀 측정을 위해 저온 표준용량기 및 정밀측정시스템의 개발도 함께 이루어져야 할 것으로 보인다.				
14. 키워드 (6~12개) 단전자 터널링, 쿨롱차폐, Al/AlOx/Al 접합, 전류표준, 용량표준, 미세구조상수				
15. 배포구분 01		16. 해제기간		17. 면수 42
				18. 가격

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. REPORT NO.	2. PERFORMING LAB. Electricity Group	3. REPORT DATE Jan 1998
4. TITLE/SUBTITLE Development of Superconducting Technology			7. SUBJECT CATEGORY	
5. AUTHOR (S) Y. K. Park, K-T. Kim, H. C. Kwon, J. W. Park, J. C. Park		8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. KRISS-98-025-IR		
6. PERFORMING ORGANIZATION NAME Korea Research Institute of Standards and Science		9. CONTRACT OR GRANT NO.		10. TYPE OF REPORT
11. SPONSORING ORGANIZATION Ministry of Science and Technology				
12. SUPPLEMENTARY NOTES				
13. ABSTRACT We improved the e-beam lithography and double angle evaporation technology to reproducibly fabricate an Al/AlOx/Al single electron junction with size of 50~100 nm. The Coulomb blockade effects have been observed on the SET transistors whose junction resistance was in the range of 0.35~6.1 M Ω and the Coulomb gap 0.23~0.57 meV. The gate capacitances, inferred from the period of the $I-V_g$ curves, were 0.017~0.028 fF. The developed fabrication technology could be used for future application to high-sensitivity electrometer for electrical metrology. Further development of cryo-capacitance standard and precision measurement technology should be included for a new capacitance standard and determination of fine structure constant.				
14. KEYWORDS Single electron tunneling, Coulomb blockade, Al/AlOx/Al junction, Current Standard, Capacitance Standard, Fine structure constant				
15. CLASSIFICATION 01		16. SCHEDULE OF DECLASSIFICATION		17. NO. OF PAGES 42
				18. PRICE

KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE