2차원에서의 전기 전도도 (10점)

이 문제를 시작하기 전에 별도의 봉투에 든 일반 지침을 읽으시오.

서론

컴퓨터 칩이나 태양 전지처럼 반도체 기술에 바탕을 둔 차세대 소자를 개발하려는 노력 속에서, 연구자들은 낮은 전기 비저항처럼 뛰어난 수송 성질을 보이는 물질을 찾고 있다. 이런 성질의 측정은 크기가 유한한 시료, 접촉 저항이 유한한 접점, 그리고 특별한 기하 구조에서 이루어진다. 참된 물질의 성질을 뽑아내려면 이런 효과를 고려해야 한다. 게다가 물질의 얇은 막은 덩어리 물질과 다르게 행동할 수 있다.

이 문제에서는 전기적 성질의 측정을 살펴본다. 두 가지 다른 정의를 쓸 것이다:

- **저항 R:** 저항은 시료나 소자의 전기적 성질이다. 주어진 크기의 특정 시료에서 우리가 실제로 재는 양이다.
- **비저항 ρ:** 비저항은 저항을 결정하는 물질의 성질이다. 물질 자체와 온도 같은 외부 변수에 의존하지만 시료의 기하 구조에는 의존하지 않는다.

특히 이른바 *면 비저항*(sheet resistivity)을 잰다. 이는 비저항을 매우 얇은 판의 두께로 나눈 값이다.

물질의 얇은 층에서 전기 저항을 측정할 때 다음 변수들이 어떤 영향을 주는지 알아본다:

- 측정 회로,
- 측정 기하 구조,
- 그리고 시료의 크기.

전도성 종이 한 장과 금속을 입힌 실리콘 웨이퍼를 시료로 쓴다.

실험
Korean (Korea (Republic of))

Q1-2

재료 목록

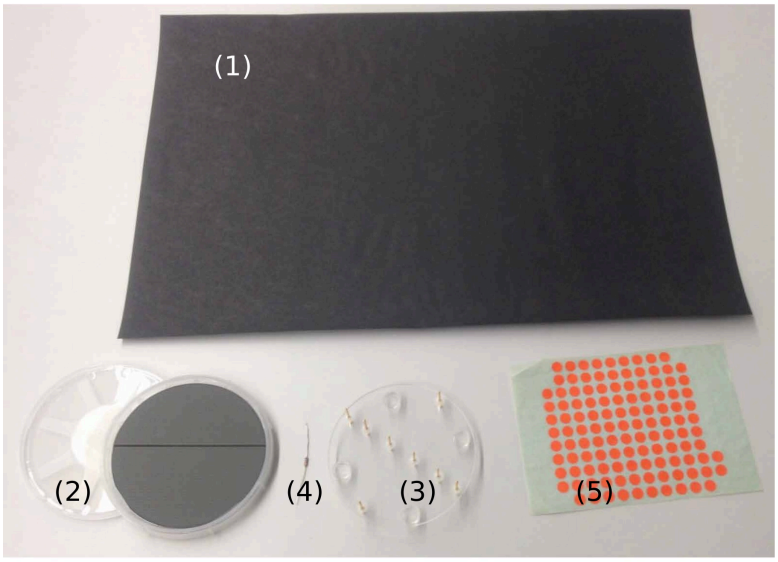


그림 1: 이 실험에 쓰는 추가 장비.

1. 흑연을 입힌 전도성 종이
2. 얇은 크로뮴 막을 입힌 실리콘 웨이퍼(웨이퍼 홀더에 들어 있음)
3. 스프링이 달린 핀 8개가 있는 플렉시글라스 판
4. 옴 저항기 하나
5. 색깔 스티커

중요한 주의 사항

- 제공된 실리콘 웨이퍼는 떨어뜨리거나 구부리면 쉽게 깨진다. 반짝이는 금속 표면을 만지거나 긁지 말 것.

지시 사항

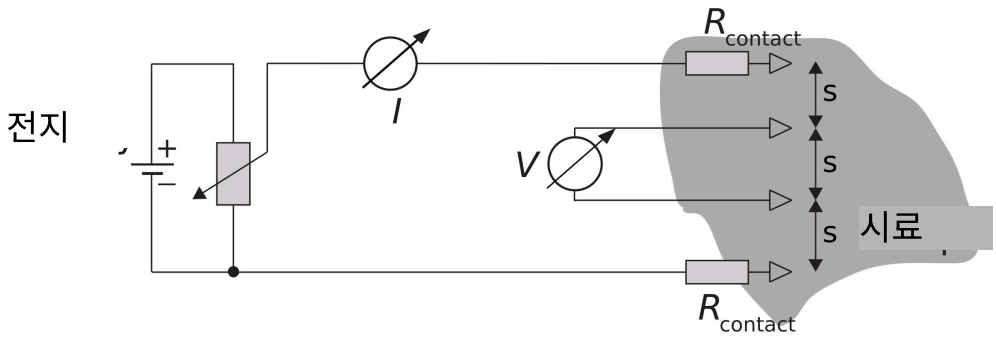
- 이 실험에서 신호 발생기는 직류 전압원으로 쓴다. 이 모드에서 신호 발생기는 *voltage* 소켓 (5)과 *GND* 소켓 (7) 사이에 일정한 전압을 낸다. 번호는 일반 지침에 실린 사진을 가리킨다.
- 전압(범위 $0\text{-}5\ \mathrm{V}$)은 *adjust voltage* (3)라고 표시된 왼쪽 전위차계를 드라이버로 돌려 조절할 수 있다.
- 이 실험을 할 때는 신호 발생기의 스피커 구동부가 토글 스위치 (8)로 꺼져 있는지 확인하여라. *speaker amplitude* 감시 소켓 (6)과 *GND* 소켓 (7) 사이의 전압을 재면 확인할 수 있다. 스피커 구동부가 꺼져 있으면 두 단자 사이의 전압은 0이다.

A 부분. 4점 탐침(4PP) 측정 (1.2점)

시료의 비저항을 정밀하게 재려면 전압 측정에 쓰는 접점과 전류 주입에 쓰는 접점을 분리해야 한다.

이 기법을 4점 탐침 기법(4PP)이라고 한다. 네 접점은 될 수 있는 대로 단순한 대칭 구조로 배열한다. 전류 I 가 바깥쪽 접점 하나(소스라고 한다)를 통해 시료로 흘러 들어가 시료 안의 가능한 모든 경로를 지난 뒤 다른 접점(드레인)을 통해 시료를 빠져나간다. 그 사이에서 시료 위의 어떤 경로 길이 s 에 걸친 전압 V 를 잰다.

모든 접점 사이의 거리 s 가 같고 접점이 시료의 한가운데에 있는 대칭 구조라면 모든 것이 아주 간단해진다. 다음 그림과 같다:



I 대 V 곡선은 시료의 $I-V$ 특성을 나타내며, 이로부터 이 시료 구간의 저항을 정할 수 있다. 앞으로는 4PP 기법만 쓴다. 먼저 사진에 보이는 여덟 개의 탐침(접점) 가운데 네 개를 *등간격*으로 일직선으로 배열해 쓴다.

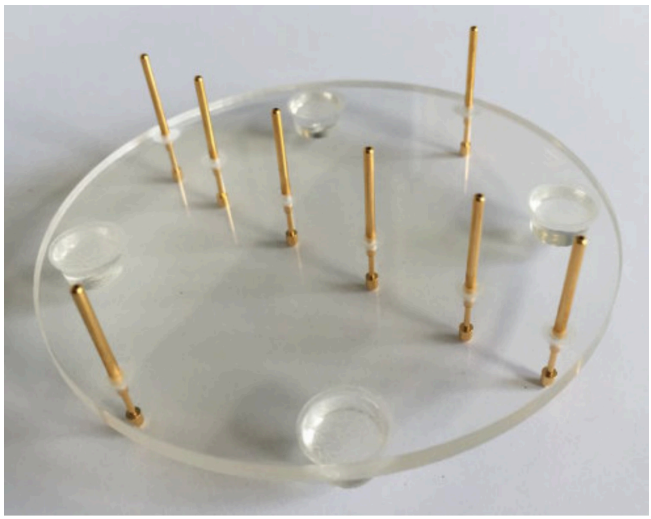


그림 2: 4PP 측정을 위한 아크릴 유리 판. 고무 발 네 개와 접점(탐침) 여덟 개가 보인다.

다음 측정에서는 전도성 종이 전체를 쓴다.

실험
Korean (Korea (Republic of))

Q1-4

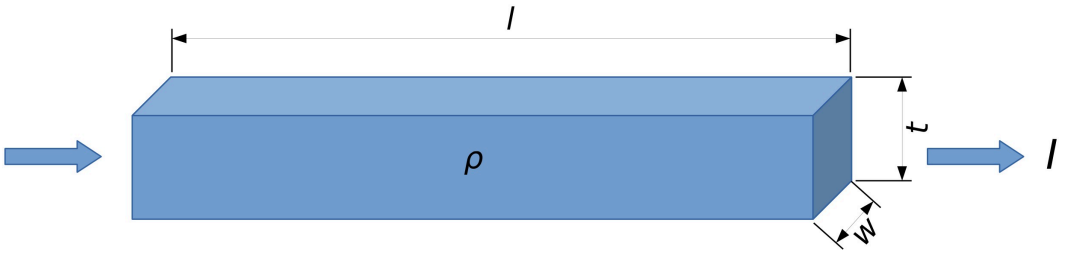
앞으로의 모든 측정에 대한 중요한 힌트:

- 종이의 긴 변이 기준 변이다. 네 탐침은 이 변과 나란하게 정렬해야 한다.
- 종이의 갈색 뒷면이 아니라 코팅된 면(검은색)을 쓰도록 주의할 것! 올바른 방향을 색깔 스티커로 표시해도 좋다.
- 종이에 구멍이나 잘린 곳이 없는지 확인하여라.
- 이 측정에서는 접점을 될 수 있는 대로 시료의 한가운데에 놓아라.
- 각 접점이 잘 닿도록 충분한 힘으로 눌러라. 플라스틱 발이 표면에 겨우 닿을 정도면 된다.

A.1	4점 탐침(4PP) 측정: 이 구간을 지나는 전류 I 의 함수로서 길이 s 인 구간에 걸린 전압 강하 V 를 재어라. 모두 합해 적어도 4개의 값을 재어 표를 만들고, **그래프 A.1** 에 전류 I 에 대한 전압 강하 V 를 그려라.	0.6pt
A.2	**그래프 A.1** 에서 얻은 유효 전기 저항 $R = \frac{V}{I}$ 을 구하여라.	0.2pt
A.3	**그래프 A.1** 을 써서 4PP 측정에서 저항 R 의 불확도 ΔR 를 구하여라.	0.4pt

B 부분. 면 비저항 (0.3점)

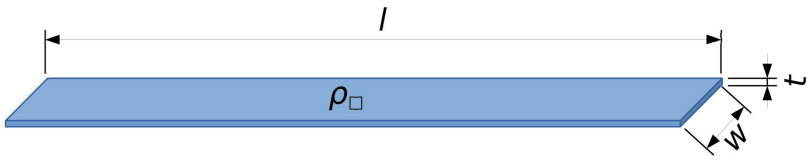
비저항 ρ 는 물질의 성질을 나타내며, 이를 써서 주어진 크기와 기하 구조를 가진 3차원 도체의 저항을 계산한다. 여기서는 길이 l, 너비 w, 두께 t 인 막대를 생각한다:



위에 있는 두꺼운 도체의 전기 저항 R 는 다음과 같이 주어진다:

$$R = R_{3\mathrm{D}} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \tag{1}$$

같은 방식으로 두께가 $t \ll w$ 이고 $t \ll l$ 인 2차원 도체의 저항을 정의할 수 있다



$$R = R_{2\mathrm{D}} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \tag{2}$$

여기서 *면 비저항* $\rho_{\square} \equiv \rho/t$ ("rho box")를 썼다. 그 단위는 옴으로 주어진다: $[\rho_{\square}] = 1\,\Omega$.

중요: 식 2는 도체의 단면 평면에서 전류 밀도가 균일하고 전위가 일정할 때만 성립한다. 표면에 점 모양의 접점이 있으면 이는 성립하지 않는다. 그 대신 그 경우 면 비저항은 저항과 다음 관계에 있음을 보일 수 있다

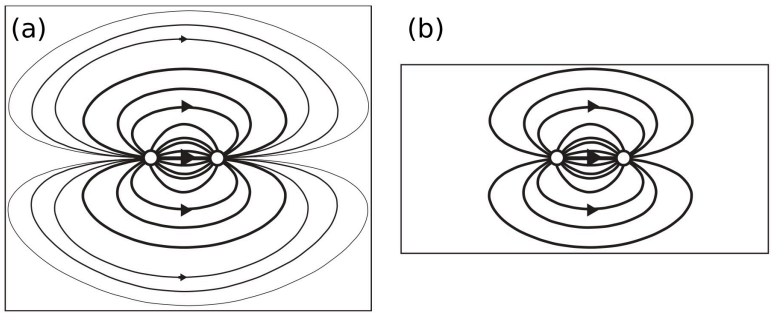
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \tag{3}$$

단, $l, w \gg t$ 이다.

B.1	A 부분의 4PP 측정으로부터 종이의 면 비저항 $\rho_{\square}$ 를 계산하여라. 종이 전체의 크기가 접점 사이의 간격 s 보다 훨씬 크므로($l, w \gg s$) 이 값을 특별히 ρ_{∞} 라 하고, A 부분에서 잰 저항을 R_{∞} 라 하자.	0.3pt

C 부분. 시료 크기를 바꾼 측정 (3.2점)

지금까지는 시료의 유한한 크기 w 와 l 을 고려하지 않았다. 시료가 작아지면 전압을 일정하게 유지할 때 흐를 수 있는 전류가 줄어든다. 두 점 접점 사이에 전압을 걸면 전류는 그림의 선으로 나타낸 것처럼 시료를 지나는 가능한 모든 서로 만나지 않는 경로로 흐른다. 선이 길수록 선의 두께로 나타낸 전류는 작다. 작은 시료 (b)에서 같은 전압을 걸면 가능한 경로가 적으므로 전체 전류가 줄어든다. 따라서 측정한 저항은 커진다:



(면) 비저항은 시료 크기의 함수로 변하지 않는다. 따라서 식 3을 써서 측정한 저항을 비저항으로 바꾸려면 보정 인자 $f(w/s)$ 를 도입해야 한다:

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)}. \tag{4}$$

길이가 $l \gg s$ 인 시료에서 인자 f 는 비 w/s 에만 의존하며 1 보다 크다: $f(w/s) \geq 1$. 간단히 하기 위해 너비 w 에 대한 의존성에만 집중하고, 시료가 측정에 충분히 길기만 하면 된다고 하자. 큰 크기에서는 값이 올바른 결과 $\rho_{\square}$ 에 다가간다고 가정한다:

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{이고} \quad f(w/s \to \infty) \to 1.0. \tag{5}$$

C.1	4PP 방법을 써서 0.3 에서 5.0 사이의 w/s 값 4개에 대해 저항 $R(w,s)$ 을 재고 그 결과를 **표 C.1** 에 적어라. 시료의 길이가 탐침 간격의 다섯 배보다 크도록 ($l > 5s$) 하고, 시료의 길이 l 은 언제나 종이의 같은 (긴) 변을 따라 잡도록 하여라. 각 w/s 값에 대해 서로 다른 전류 값 4개에서 전압을 재고 그 4번의 측정으로부터 평균 저항 $R(w/s)$ 를 계산하여라. 결과를 **표 C.1** 에 적어라.	3.0pt

C.2	이 측정 각각에 대해 $f(w/s)$ 를 계산하여라.	0.2pt

D 부분. 기하학적 보정 인자: 축척 법칙 (1.9점)

C 부분에서 측정한 비저항이 너비와 탐침 간격의 비 w/s 에 따라 축척됨을 보았다. C 부분에서 얻은 자료에서 출발하여, 측정 범위에서 자료를 기술할 다음과 같은 일반적인 함수를 고른다:

일반 맞춤 함수: $$f(w/s) = 1.0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

w/s 가 아주 클 때 $f(w/s)$ 는 반드시 1.0 이어야 함에 유의하여라.

D.1	식 6과 C 부분에서 얻은 자료 $f(w/s)$ 를 써서 모형 곡선을 맞추기 위해, 자료를 그릴 가장 알맞은 모눈종이(선형 **그래프 D.1a**, 반로그 **그래프 D.1b**, 양쪽 로그 **그래프 D1.c**)를 골라라.	1.0pt

D.2	맞춤으로부터 변수 a 와 b 를 구하여라.	0.9pt

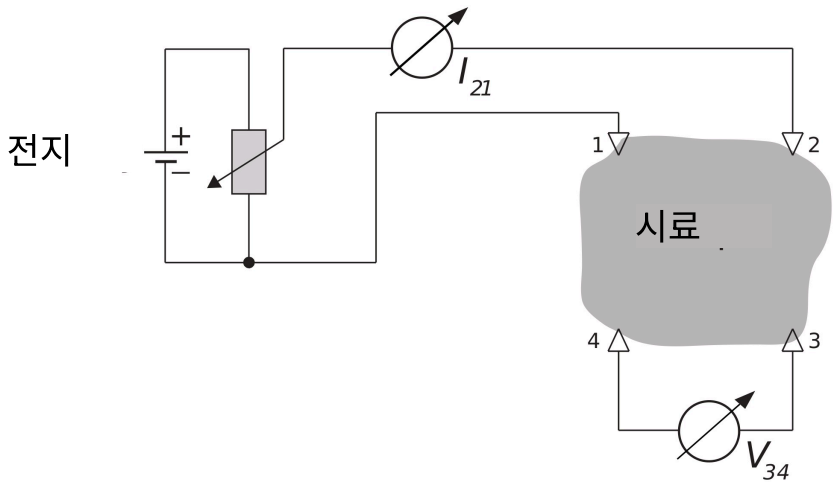
E 부분. 실리콘 웨이퍼와 판 데르 파우 방법 (3.4점)

반도체 산업에서 반도체와 얇은 금속층의 전기 (면) 저항을 아는 일은 소자의 성질을 결정하므로 매우 중요하다. 다음에서는 실리콘 웨이퍼를 다룬다. 이 반도체 웨이퍼는 (반짝이는 면에) 매우 얇은 크로뮴 금속층이 입혀져 있다.

웨이퍼 통을 열고(RELEASE 화살표 방향으로 돌린다) 웨이퍼를 꺼내어라. 떨어뜨리거나 깨뜨리지 않도록, 그리고 반짝이는 면을 긁거나 만지지 않도록 조심하여라. 측정할 때는 반짝이는 면이 위를 향하도록 책상에 놓아라.

E.1	앞에서와 같은 4PP 장치를 써서 전류 I 의 함수로 전압 V 를 재어라. 답안지에 웨이퍼의 기준 번호를 적어라. 이 번호는 플라스틱 웨이퍼 홀더에 있다.	0.4pt
E.2	**그래프 E.2** 에 자료를 그리고 저항 R_{4PP} 를 구하여라.	0.4pt
E.3	웨이퍼처럼 원형인 시료에 대한 보정을 구하기 위해, 시료의 유효 너비 w 를 웨이퍼의 지름 $D = 100\,\mathrm{mm}$ 로 어림한다. 이 가정을 써서 비 w/s 를 계산하여라. 식 6의 맞춤 함수와 변수 a, b 를 써서 웨이퍼 측정에 대한 보정 인자 $f(w/s)$ 를 구하여라.	0.2pt
E.4	식 4를 써서 크로뮴 층의 면 비저항 $\rho_{\square}$ 를 계산하여라.	0.1pt

기하학적 보정 없이 면 비저항을 정밀하게 재기 위해, 필립스의 기술자 L.J. 판 데르 파우는 간단한 측정 방법을 고안하였다. 그림(1부터 4까지 번호를 붙였다)처럼 임의의 모양을 가진 시료의 둘레에 네 탐침을 놓는다. 전류는 이웃한 두 탐침, 예를 들어 탐침 1과 2를 통해 흐르고, 전압은 탐침 3과 4 사이에서 잰다. 이로부터 저항값 $R_{I,V} = R_{21,34}$ 를 얻는다.



대칭성에 의해 $R_{21,34} = R_{34,21}$ 이고 $R_{14,23} = R_{23,14}$ 이다. 판 데르 파우는 시료의 모양이 임의이지만

단순 연결(구멍이 없음)이고 접점이 점 모양이면 다음 식이 성립함을 보였다:

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_\square} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_\square} \equiv 1. \tag{7}$$

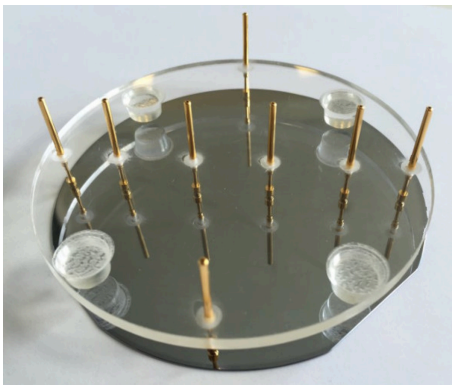


그림 3: 금속을 입힌 실리콘 웨이퍼 위의 4PP 장치. 원형 웨이퍼의 오른쪽에 잘린 부분이 있음에 유의하여라. 이 잘린 부분을 플랫(flat)이라고 한다.

측정 탐침이 정사각형을 이루도록 네 스프링 접점을 연결하여라. 이웃한 두 접점을 전류원과 전류계에 연결하고, 남은 두 스프링 접점을 전압계에 연결하여라. 정사각형의 한 변이 웨이퍼의 플랫과 나란해질 때까지 정사각형을 돌려라.

E.5	전류가 흐르는 접점의 방향과 웨이퍼 플랫의 방향을 그려라. 대략 같은 간격의 서로 다른 전류 I 값 6개 이상에 대해 전압 V 를 재어라. 결과를 **표 E.5** 에 적어라.	0.6pt
E.6	첫 단계에서 쓴 접점과 수직이 되도록 전류가 흐르는 접점을 배치하여 같은 과정을 되풀이하여라. 결과를 **표 E.6** 에 적어라.	0.6pt
E.7	서로 다른 색이나 기호를 써서 모든 자료를 하나의 그래프 **그래프 E.7** 에 함께 그려라. 두 곡선으로부터 평균값 $\langle R \rangle$ 를 구하여라.	0.5pt
E.8	모든 저항 $R_{kl,mn}$ 을 $\langle R \rangle$ 로 바꾸고 식 7을 $\rho_\square$ 에 대해 풀어 크로뮴 층의 면 비저항 $\rho_\square$ 를 계산하여라.	0.4pt
E.9	일직선 배열로 잰 결과(**E.4**)와 판 데르 파우 방법의 결과(**E.8**)를 비교하여라. 두 측정의 차이를 상대 오차로 퍼센트로 나타내어라.	0.1pt
E.10	크로뮴(Cr) 층의 공칭 두께는 $8\,\mathrm{nm}$ 이다. 이 값과 판 데르 파우 방법의 최종 결과를 써서 식 1과 2로 Cr의 비저항을 계산하여라.	0.1pt