

## 일반 지침: 실험 시험(20점)

2016년 7월 12일

실험 시험은 5시간 동안 진행되며 총 20점 만점입니다.

### 시험 전

- 대회 시작을 알리는 신호음이 울리기 전에 문제가 들어 있는 봉투를 개봉해서는 안 됩니다.
- 시험 시작과 종료는 음향 신호로 알려드립니다. 매 시간마다 경과 시간을 알리는 안내 방송이 나오고 시험 종료 15분 전(최종 음향 신호가 울리기 전)에도 안내 방송이 나옵니다.

### 시험 중

- 답안 작성을 위한 전용 답안지가 제공됩니다. 관찰한 내용을 해당 답안지의 해당 표, 상자 또는 그래프(A 표시)에 입력합니다. 모든 문제마다 세부 작업을 수행하기 위한 여분의 빈 문제지(W 표시)가 있습니다. 항상 현재 풀고 있는 문제에 속하는 문제지를 사용해야 합니다(헤더의 문제 번호 확인). 채점하고 싶지 않은 내용을 시트에 적었다면 지우십시오. 모든 페이지의 앞면에만 사용하십시오.
- 답안에는 가능한 한 간결하게 작성하세요. 가능한 한 수식, 논리 연산자, 스케치 사용하여 생각을 설명하세요. 긴 문장을 사용하지 마세요.
- 명시적으로 않는 한 명시적인 오류 계산은 필요하지 않습니다. 그러나 숫자를 명시할 때는 적절한 수의 유효 자릿수를 제공해야 합니다. 또한 특별한 지침이 없는 한 데이터 포인트 또는 측정 반복 횟수를 적절하게 결정해야 합니다.
- 이전 풀지 않고도 문제의 풀 수 있는 경우가 종종 있습니다.
- 허가 없이 근무 장소를 벗어날 수 없습니다. 도움이 필요한 경우(물병 보충, 계산기 고장, 화장실 방문 등) 큐비클에 부착된 3개의 깃발 중 하나를 꽂아 팀 가이드의 주의를 끌 수 있습니다("물병 보충해주세요", "화장실에 가야겠어요", "도움이 필요해요", 그 외 모든 경우에는 "도와주세요").

### 시험이 끝나면

- 시험이 끝나면 즉시 글쓰기를 중단해야 합니다.
- 모든 문제에 대해 해당 시트를 표지(C), 문제(Q), 답안지(A), 문제지(W) 순서로 정렬합니다.
- 한 문제에 모든 문제지를 같은 봉투에 넣습니다. 또한 일반 지침(G)을 나머지 별도의 봉투에 넣습니다. 각 봉투의 보기 창에 학생 코드가 표시되는지 확인합니다. 빈 시트도 제출합니다. 시험장 밖으로 어떤 용지도 가져갈 수 없습니다.

- 필기구(볼펜 2개, 펠트 펜 1개, 연필 1개, 가위 1개, 자 1개, 귀마개 2개)와 제공된 계산기 및 개인 계산기(해당되는 경우)를 투명 지퍼백에 다시 넣으세요.
- 봉투가 수거될 때까지 테이블에서 기다리세요. 모든 봉투가 수거되면 가이드가 밖으로 안내해 드립니다. 필기구 가방을 가져가서 출구에 제출하세요. 물병도 .

주제

|          |                         |     |
|----------|-------------------------|-----|
| 실험 E-I:  | 2차원 전기 전도도              | 10점 |
| 실험 E-II: | 점핑 비즈 - 위상 전환 및 불안정성 모델 | 10점 |

실험 E-I과 실험 E-II는 일부 동일한 장비를 공유합니다. 무엇보다도 두 실험에 동일한 전원 공급 신호 발생기가 사용되지만 설정은 다릅니다.

주의: 상자의 포장을 풀 때 멤브레인에 부착된 플라스틱 실린더로 라우드스피커 들어 올리지 마세요.

두 실험에 사용된 재료



그림 1: 두 실험의 공통 자료.

1. USB 케이블이 포함된 배터리 팩
2. 배터리 팩으로 구동되는 조정 가능한 신호 발생기
3. 소형 드라이버
4. 악어 클립이 있는 케이블 10개
5. 4 mm 플러그가 있는 케이블 6개
6. 디지털 멀티미터 2개

제공된 고정식 아이টে를 사용하여 실습 과제를 수행할 수도 있습니다.

## 신호 발생기

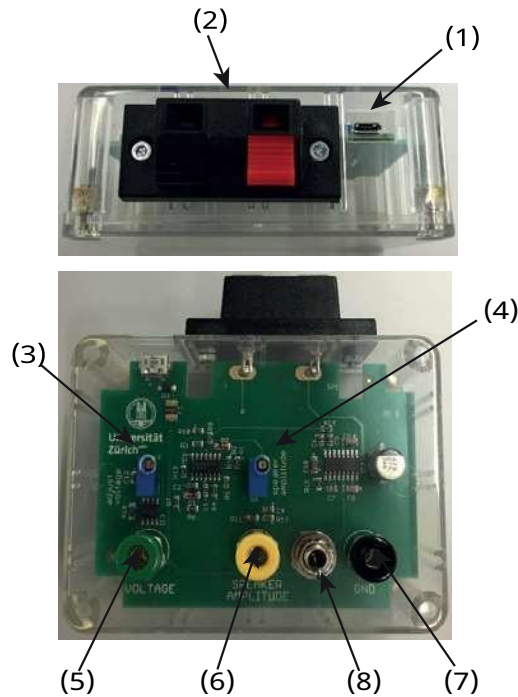


그림 2.

1. 신호 발생기에 전원을 공급하기 위한 USB 커넥터
2. 라우드스피커 단자(E-II에서만 사용)
3. 정전압 조정용 전위차계(E-I에서만 사용)
4. 스피커 진폭 조절용 전위차계(E-II에서만 사용)
5. DC 전압 출력 소켓(E-I에서만 사용)
6. 라우드스피커 드라이브 진폭을 위한 모니터 출력 단자(E-II에서만 사용)
7. 공통 접지 소켓
8. 라우드스피커 단자를 켜고 라우드스피커 진폭에 대한 모니터 출력을 켜려면 스위치를 켭니다.  
/ 끄기

신호 발생기에 전원을 공급하려면 USB 케이블을 사용하여 배터리 팩을 신호 발생기(1)의 USB 커넥터에 연결합니다.

범위의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝으로 이동하려면 포텐서미터를 여러 번 돌려야 합니다. 포텐서미터에는 범위 끝에 기계식 정지 장치가 없습니다.

## 디지털 멀티미터

디지털 멀티미터는 전류 및 전압 측정에 사용할 수 있습니다. 항상 두 개의 리드를 "VmAΩ" 및 "GND" 라벨이 붙은 소켓에 연결하고 셀렉터를 사용하여 전류/전압 및 측정 범위를 선택합니다.

## 2차원 전기 전도도()

이 문제를 시작하기 전에 별도의 봉투에 있는 일반 지침을 읽어보세요.

### 소개

컴퓨터 칩이나 태양전지와 같은 반도체 기술을 기반으로 하는 차세대 디바이스를 개발하기 위해 연구자들은 낮은 전기 저항과 같은 뛰어난 전송 특성을 나타내는 소재를 찾고 있습니다. 이러한 특성의 측정은 유한한 크기의 샘플, 유한한 접촉 저항을 가진 접점 및 특수한 기하학적 구조를 사용하여 수행됩니다. 실제 재료 특성을 추출하기 위해서는 이러한 효과를 고려해야 합니다. 또한 재료의 박막은 벌크 재료와 다르게 작동할 수 있습니다.

이 과제에서는 전기적 특성 측정에 대해 알아보겠습니다. 두 가지 다른 정의를 사용할 것입니다:

- 저항  $R$ : 저항은 시료 또는 장치의 전기적 특성입니다. 주어진 치수의 특정 시료에서 실제로 측정하는 양입니다.
- 저항률  $\rho$ : 저항률은 저항을 결정하는 재료의 특성입니다. 재료 자체와 온도와 같은 외부 매개 변수에 따라 달라지지만 샘플의 형상에 달라지지는 않습니다.

특히 소위 *시트 저항률*을 측정합니다. 이것은 저항을 매우 얇은 시트의 두께로 나눈 값입니다.

다음 매개변수가 얇은 재료 층의 전기 저항 측정에 미치는 영향을 살펴봅시다:

- 측정 회로,
- 측정 지오메트리입니다,
- 및 샘플 치수를 입력합니다.

전도성 종이 한 장과 금속 코팅 실리콘 웨이퍼가 샘플로 사용됩니다.

## 자료 목록

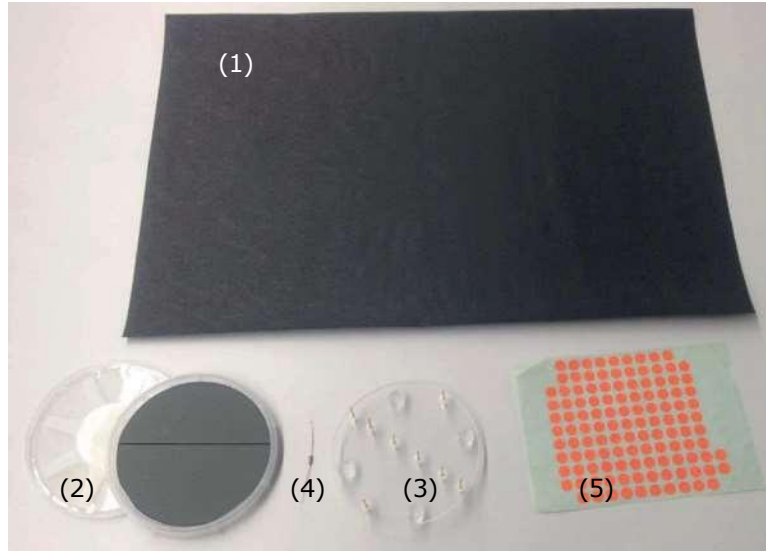


그림 1: 이 실험을 위한 추가 장비.

1. 흑연 코팅 전도성 용지
2. 얇은 크롬 필름으로 코팅된 실리콘 웨이퍼(웨이퍼 홀더에 보관)
3. 스프링이 장착된 핀 8개가 있는 플렉시글라스 플레이트
4. 오믹 저항기
5. 컬러 스티커

## 중요 예방 조치

- 제공된 실리콘 웨이퍼는 떨어뜨리거나 구부리면 쉽게 파손될 수 있습니다. 반짝이는 금속 표면을 만지거나 긁지 마세요.

## 지침

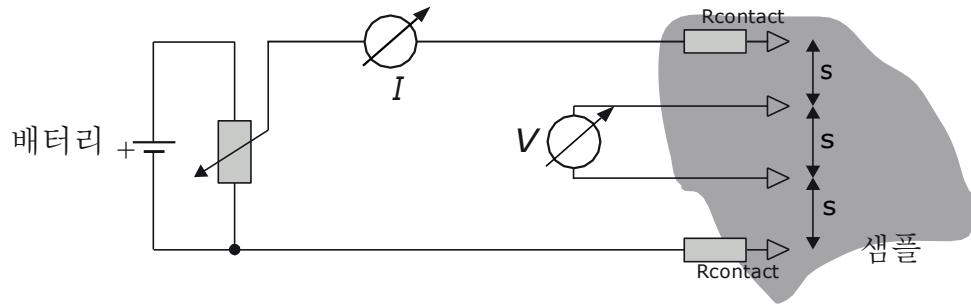
- 이 실험에서는 신호 발생기를 DC 전압 소스로 사용합니다. 이 모드에서 신호 발생기는 전압 소켓(5)과 GND 소켓(7) 사이에 일정한 전압을 출력합니다. 숫자는 일반 지침에 표시된 사진을 참조하세요.
- 전압(범위: 45 V)은 드라이버를 사용하여 전압 조정(3)이라고 표시된 왼쪽 전위차계에서 조정할 수 있습니다.
- 이 실험을 수행할 때는 토글 스위치(8)를 사용하여 신호 발생기의 스피커 드라이브 섹션이 꺼져 있는지 확인하세요. 이는 스피커 진폭 모니터 소켓(6)과 GND 소켓(7) 사이의 전압을 측정하여 확인할 수 있습니다. 라우드스피커 구동부가 꺼져 있으면 이 두 단자 사이의 전압은 0입니다.

## 파트 A. 4포인트 프로브(4PP) 측정(1.2포인트)

시료의 저항을 정밀하게 측정하려면 전압 측정에 사용되는 접점과 전류 주입에 사용되는 접점을 분리해야 합니다.

이 기술을 4포인트 프로브 기법(4PP)이라고 합니다. 네 개의 접점은 가능한 한 간단한 대칭 형상으로 배열됩니다: 전류  $I$  외부 접점 중 하나(소스)를 통해 시료로 유입된 다음 시료를 통과하는 모든 가능한 경로에서 다른 접점(드레인)을 통해 시료 밖으로 흘러 나갑니다. 그 사이에 전압  $V$ 은 샘플의 특정 경로 길이  $s$ 에서 측정됩니다.

다음 스케치와 같이 모든 접점과 샘플 중앙의 접점 사이의 거리  $s$  같은 대칭 있으면 모든 것이 매우 간단해집니다:



$I$  대  $V$  곡선은 샘플의  $I$ - $V$ -특성을 나타내며 이 샘플 세그먼트의 저항을 결정할 수 있습니다. 여기서는 4PP 기법만 사용하겠습니다. 먼저 사진에 표시된 8개의 프로브(접점) 중 4개의 선형 등거리 배열을 사용하겠습니다.

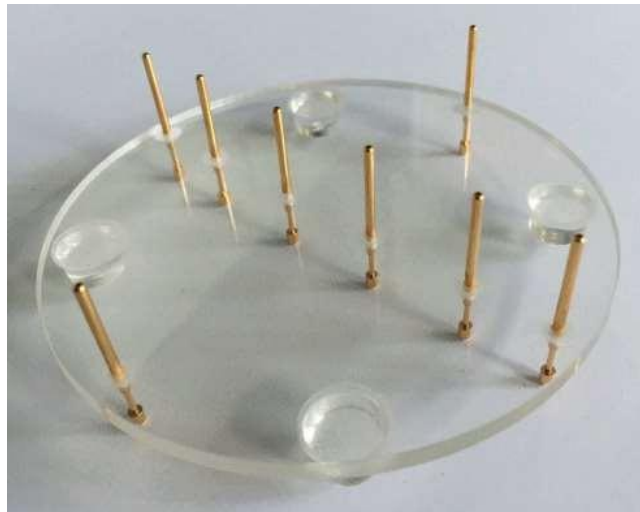


그림 2: 4PP 측정을 위한 아크릴 유리판, 4개의 고무 받침과 8개의 접점 또는 프로브가 있습니다.

다음 측정 시에는 전도성 용지 전체를 사용합니다.

다음 모든 측정에 대한 중요한 힌트입니다:

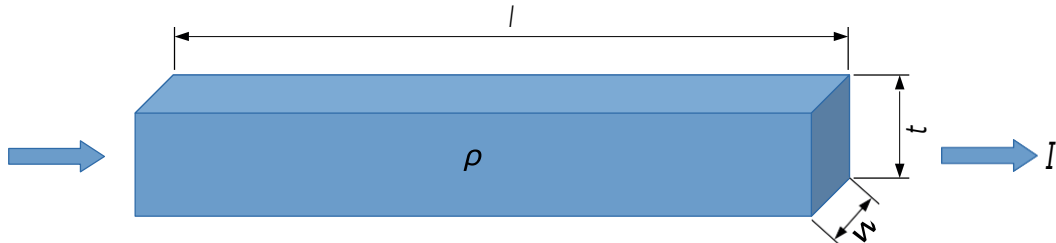
- 종이의 긴 면이 기준면입니다. 네 개의 프로브는 이 면과 평행하게 정렬되어야 합니다.
- 종이의 갈색 뒷면이 아닌 코팅된 면(검은색) 사용하도록 주의하세요! 컬러 스티커로 올바른 방향을 수 있습니다.
- 용지에 구멍이나 잘린 부분이 없는지 확인합니다.
- 이러한 측정을 위해 점점을 시료의 중앙에 가깝게 배치합니다.
- 각 점점이 잘 닿을 수 있도록 충분한 힘을 주어 누릅니다. 플라스틱 다리가 표면에 닿아야 합니다.

|     |                                                                                                                                           |                                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| A.1 | 4포인트 프로브(4PP) 측정: $V$ 세그먼트 길이가 $l$ 길이의 0.6포인트 세그먼트를 통과하는 전류의 함수 $I$ 를 측정합니다. 취하다 총 4개 이상의 값으로 표를 만들고 전압 강하 $V$ 대 전류 $I$ 를 그래프 A.1에 표시합니다. | 이                                |
| A.2 | 유효 전기 저항 결정<br>그래프 A.1.                                                                                                                   | $R = \frac{V}{I}$ 에서 얻은<br>0.2pt |
| A.3 | 그래프 A.1을 사용하여 불확실성 측정을 결정합니다.                                                                                                             | 저항에 $R$ 4PP의 경우<br>0.4pt         |

$\Delta R$

### 파트 B. 시트 저항률(0.3점)

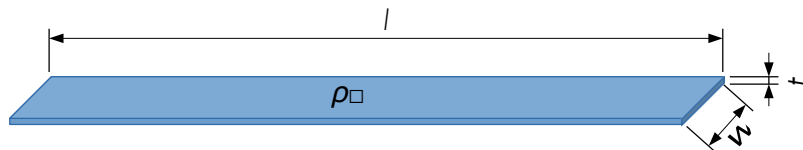
저항률  $\rho$  은 주어진 치수와 형상을 가진 3D 도체의 저항을 계산하는 재료 속성을 나타냅니다. 여기서는 길이  $l$ , 너비  $w$ , 두께  $t$  막대를 예로 들어 보겠습니다:



위쪽의 두꺼운 도체의 전기 저항  $R$  은 다음과 같습니다:

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

동일한 기준으로 두께  $t \ll w$  및  $t$ 의 2D 도체의 저항을 정의할 수 있습니다.  $\ll$



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \quad (2)$$

시트 저항을 사용하여  $\rho_{\square} \equiv \rho/t$  ("rho 상자"). 단위는 옴으로 표시됩니다:  $[\rho_{\square}] = \Omega$ .

중요: 식 2는 도체의 단면 평면에서 균일한 전류 밀도와 일정한 전위에 대해서만 유효합니다. 표면의 점과 같은 접점의 경우 이 공식은 않습니다. 대신 다음과 같이 시트 저항이 해당 경우의 저항과 관련이 있음을 보여줄 수 있습니다.

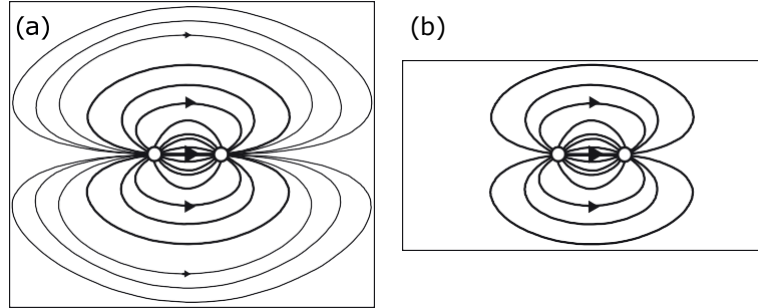
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

에 대한  $l, w \gg t$ .

- B.1 4PP 측정값에서 용지의 시트 저항률  $\rho_{\square}$  을 계산합니다. 이  
특정 값을  $\rho_{\infty}$  (그리고 측정된 저항을  
파트 A  $R_{\infty}$ ) 전체 시트의 샘플 치수가 훨씬 크기 때문입니다.  
을 점점 간격보다 더 길게 설정합니다:  $s \quad l, w \gg s$

### 파트 C. 다양한 샘플 치수에 대한 측정(3.2점)

지금까지는 유한한 샘플 크기  $w$  및  $l$  를 고려하지 않았습니다. 샘플이 작아지면 전압을 일정하게 유지하면 더 적은 전류를 전달할 수 있습니다. 두 점 점점(흰색 원) 사이에 전압을 가하면 선으로 시각화된 것처럼 샘플을 통과하는 모든 가능한 비교자 경로에 전류가 흐르게 되며, 선이 길수록 선 두께로 표시된 것처럼 전류는 더 작아집니다. 작은 샘플(b)과 동일한 인가 전압의 경우 가능한 경로가 적기 때문에 총 전류가 감소합니다. 따라서 측정된 저항이 증가합니다:



(시트) 저항은 샘플 크기에 따라 변하지 않습니다. 따라서 측정된 저항을 식 3을 사용하여 저항률로 변환하려면 보정 계수  $f(w/s)$  를 도입해야 합니다:

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

길이 샘플 경우  $l \gg s$  계수  $f$  는 비율  $w/s$  의존하며:  $1/f(w/s) \geq 1$  보다 큼. 단순화를 위해 너비  $w$  에 대한 의존성에 초점을 맞추고 측정에 충분한 길이인지 확인합니다. 큰 치수의 경우 값이 올바른 결과  $\rho_{\square}$  에 가까워진다고 가정합니다:

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

**C.1** 4PP 방법을 사용하여 저항을 측정합니다.  $R(w, s)$  4가지 값에  $w/s$  이내 범위를 0.3~5.0으로 설정하고 결과를 표 C.1에 기록합니다. 샘플 길이가 프로브 간격의 5배보다 큰지 확인합니다: 그리고 샘플의 길이는 항상 종이의 같은 (긴) 면을 따라 채취해야 합니다. 각 값에 대해  $w/s$  의 각 값에 대해 4개의 서로 다른 전류 값에 대한 전압을 측정하고 평균 저항  $R(w/s)$  를 계산합니다. 결과를 표 C.1에 . 3.0pt

**C.2** 계산  $f(w/s)$  를 계산합니다. 0.2pt

### 파트 D. 기하학적 보정 계수: 배율 법칙(1.9점)

파트 C에서 측정된 저항이 폭과 프로브 거리의 비율에 따라 스케일링되는 것을 보았습니다  $w/s$ . 파트 C에서 수집한 데이터에서 시작하여 데이터를 설명하기 위해 다음과 같은 일반 함수를 선택합니다.

를 측정 범위에 포함시킵니다:

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

매우 큰  $w/s$ ,  $f(w/s)$  는 1.0.

**D.1** 식 6과 데이터를 사용하여 모델 곡선을 맞추려면 다음과 같이  $f(w/s)$  파트 C에서 가져온 것입니다, 가장 적합한 그래프 용지를 선택하십시오 (선형 그래프 **D.1a**, 반 로그 그래프 **D.1b** 또는 이중 로그 그래프 **D1.c**)를 사용하여 데이터를 플로팅합니다.

**D.2** 매개변수 추론  $a$  와  $b$  를 추론합니다. 0.9pt

## 파트 E. 실리콘 웨이퍼와 반 데르 포우 방법(3.4점)

반도체 산업에서 반도체와 얇은 금속층의 전기(시트) 저항에 대한 지식은 소자의 특성을 결정하기 때문에 매우 중요합니다. 다음에서는 실리콘 웨이퍼를 다루겠습니다. 반도체 웨이퍼는 매우 얇은 크롬 금속 층(반짝이는 면)으로 코팅되어 있습니다.

웨이퍼 컨테이너를 열고(화살표 릴리스 방향으로 회전) 웨이퍼를 꺼냅니다. 떨어뜨리거나 깨뜨리지 않도록 주의하고 반짝이는 표면을 긁거나 만지지 않도록 주의하세요. 측정을 위해 반짝이는 면이 자신을 향하도록 테이블 위에 놓습니다.

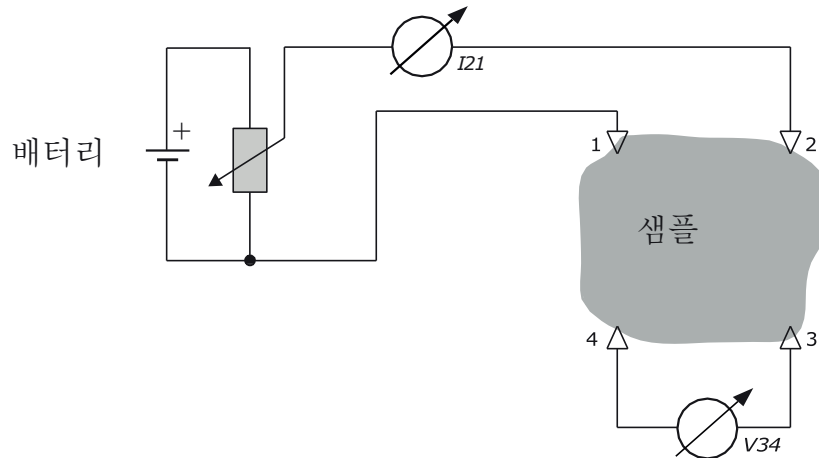
**E.1** 이전과 동일한 4PP 설정을 사용하여 전압을 측정합니다.  $V$ 의 함수로  $0.4\text{pt}$   
전류  $I$   
답안지에 웨이퍼의 참조 번호를 적습니다. 이 번호는 플라스틱 웨이퍼 홀더에서 찾을 수 있습니다.

**E.2** 그래프 E.2의 데이터를 플롯하고 저항을 결정합니다.  $R_{4PP}$   $0.4\text{pt}$

**E.3** 웨이퍼와 같은 원형 샘플에 대한 보정을 결정하기 위해 다음을 수행합니다. 샘플의 유효  
폭을 지름으로 나눈 값  $w$  샘플의 직경  $D = 100\text{ mm}$ 의  
웨이퍼. 이 가정 하에 비율을 계산합니다. 공식 6의 적합 함수와 파라미터(와  
 $a$ 를 사용하여 보정 계수를 결정합니다.  $f(w/s)$   
를 사용하여 웨이퍼를 측정합니다.

**E.4** 식 4를 사용하여 크롬 층의 시트 저항  $R_{\square}$  식 4를 사용하여 크롬 층의 시트 저항을 계산합니다.  $0.1\text{pt}$

기하학적 보정 없이 시트 저항을 정밀하게 측정하기 위해 필립스 엔지니어 L.J. van der Pauw(Philips engineer L.J. van der Pauw)는 간단한 측정 방식을 개발했습니다: 그림과 같이 4개의 프로브가 임의의 모양의 시료 둘레에 장착됩니다(1번부터 4번까지 번호가 매겨져 있음). 전류는 인접한 두 개의 프로브(예: 프로브 1과 2)를 통해 흐르고 전압은 프로브 3과 4 사이에서 측정됩니다. 이렇게 하면 저항 값  $R_{1,3} = R_{21,34}$ 이 산출됩니다.



대칭을 위해  $R_{21,34} = R_{34,21}$  와  $R_{14,23} = R_{23,14}$ . 반 데르 파우는 임의적이지만

샘플의 단순한 연결 모양(구멍이 없는)과 점과 같은 접점은 다음 방정식을 따릅니다:

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



그림 3: 금속 코팅 실리콘 웨이퍼의 4PP 장치. 원형 웨이퍼의 오른쪽에 절단된 부분을 주목하세요. 이 컷을 플랫이라고 합니다.

측정 프로브가 이루도록 4개의 스프링 접점을 연결합니다. 전류계로 두 개의 접점을 전류 소스에 연결하고 나머지 두 개의 스프링 접점을 전압계에 연결합니다. 사각형의 가장자리 중 하나가 웨이퍼의 평평한 부분과 평행이 될 때까지 사각형을 회전합니다.

|      |                                                                                                                                                                     |       |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| E.5  | 전류 전달 접점의 방향을 스케치하고<br>퍼의 평면을 0.6pt 스케치합니다. 전압을 측정합니다 $V$ 적어도 총 6개의 다른<br>크롬 층의 시트 저항률 $\rho_{\square}$ 를 측정합니다. 이 값을 평균값 $\langle \rho_{\square} \rangle$ 로 나타냅니다. | 웨이    |
| E.6  | 전류 전달 접점을 다음에 수직으로 배열하는 절차를 반복합니다.<br>이 측정값을 평균값 $\langle \rho_{\square} \rangle$ 로 나타냅니다. 이 값을 $\rho_{\square}$ 로 사용합니다.                                           | 0.6pt |
| E.7  | 서로 다른 색상을 사용하여 모든 데이터를 하나의 그래프에 함께 그리기 그래프 E.7<br>및/또는 기호를 사용합니다. 두 곡선으로부터 평균값 $\langle R \rangle$ 구합니다.                                                            | 0.5pt |
| E.8  | 모든 저항 교체하기<br>크롬 층의 시트 저항률 $\rho_{\square}$ 로 방정식 7을 풀고 $\rho_{\square}$ 로 계산하여<br>$R_{kl,mn}$                                                                      | 0.4pt |
| E.9  | 선형 배열(E.4)로 측정한 결과와 반 데르 포우 방법(E.8)으로 측정한 결과를 비교합니다.<br>와 반 데르 포우 방법(E.8)의 결과를 비교합니다. 두 측정값의 차이를 상대 오차로 백분율로<br>표시합니다.                                              | 0.1pt |
| E.10 | 크롬(Cr) 층의 공칭 두께는 다음과 같습니다. 8 nm. 이 값을 사용하고<br>를 사용하여 Cr의 저항률을 계산하는 반 데르 포우 방법의 최종 결과입니다. 1과 2를<br>사용합니다.                                                            | 0.1pt |

## 점핑 비즈 - 위상 전이와 불안정성을 나타내는 모델(10점)

이 문제를 시작하기 전에 별도의 봉투에 있는 일반 지침을 읽어보세요.

### 소개

상 전이는 일상 생활에서 잘 알려진 현상입니다. 예를 들어 물은 고체, 액체, 기체와 같은 다양한 상태를 취합니다. 이러한 서로 다른 상태는 상전으로 구분되며, 여기서 물질 내 분자의 집합적 행동이 변화합니다. 이러한 상전이에는 항상 상태가 변하는 전이 온도, 즉 위의 예에서 물의 동결 및 끓는 온도와 같은 전이 온도가 연관되어 있습니다.

그러나 상전이 현상은 훨씬 더 광범위하며 자기망이나 초전도체와 같은 다른 시스템에서도 발생하는데, 전이 온도 이하에서는 거시적 상태가 각각 상자성 자석에서 강자성 자석으로, 일반 도체에서 초전도체로 바뀝니다.

이러한 모든 전이는 소위 질서 매개변수를 도입할 때 공통된 프레임워크로 설명할 수 있습니다. 예를 들어, 자성에서 질서 파라미터는 원자의 자기 모멘트를 거시적 자화 상태로 것과 관련이 있습니다.

소위 연속 상전이에서는 아래 그림 1의 자석 모식도와 같이 임계 온도 위에서는 항상 차수 파라미터가 0이 되고 그 아래에서는 연속적으로 증가합니다. 연속 상전이 전이의 전이 온도를 임계 합니다. 이 그림은 또한 자석의 경우 개별 자기 모멘트가 강자성 상태에서 정렬되어 거시적 자화를 일으키는 반면, 상자성 상에서는 무작위로 배향되어 거시적 자화가 0이 되는 미시적 질서 또는 무질서를 도식적으로 표현한 것입니다.

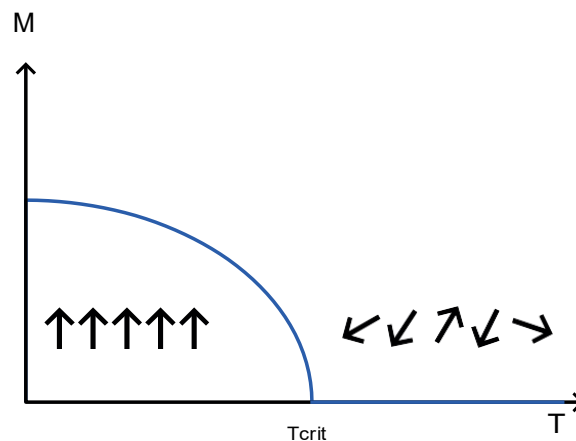


그림 1: 상전이 시 차수 매개변수  $M$  온도 의존성을 개략적으로 나타낸 도식. 임계 온도 ( $T_{\text{crit}}$ ) 이하에서는 순서 매개변수가 증가하여 0이 아닌 반면,  $T_{\text{crit}}$  이상의 온도에서는 0과 같습니다.

연속 상 전이의 경우, 일반적으로 전이에 가까운 차수 파라미터가 임계 온도인  $T_{\text{crit}}$  아래의 자화  $M$ 와 같은 전력 법칙을 따르는 것을 알 수 있습니다.

으로:

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & T < T_{\text{crit}} \\ = 0, & T > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $T$  은 온도입니다. 놀라운 점은 이러한 행동이 보편적이라는 점입니다. 이 힘의 법칙의 지수는 다양한 종류의 상전이에서 동일합니다.

### 작업

불안정성이 어떻게 입자의 집단적 행동으로 이어져 상전으로 이어지는지, 입자의 여기에 따라 거시적 변화가 어떻게 달라지는지 등 연속 상전이의 몇 가지 특징을 살펴볼 수 있는 간단한 예를 살펴봅니다.

일반적인 위상 전이에서 이 여기는 일반적으로 온도에 의해 발생합니다. 이 예에서 여기란 라우드스피커에 의해 가속된 입자의 운동 에너지로 구성됩니다. 여기서 연구하는 상전이에 해당하는 거시적 변화는 작은 벽으로 분리된 원통의 절반으로 구슬을 분류하는 것으로 구성됩니다.

입자가 원통의 절반으로 분류된 위치에서 진폭을 증가시키면 결국 입자가 두 반쪽 사이에 균등하게 분포하는 것을 볼 수 있습니다. 이는 임계 온도를 넘어 가열된 것에 해당합니다.

목표는 여기서 연구한 모델 상 전이에 대한 임계 지수를 결정하는 것입니다.

### 자료 목록

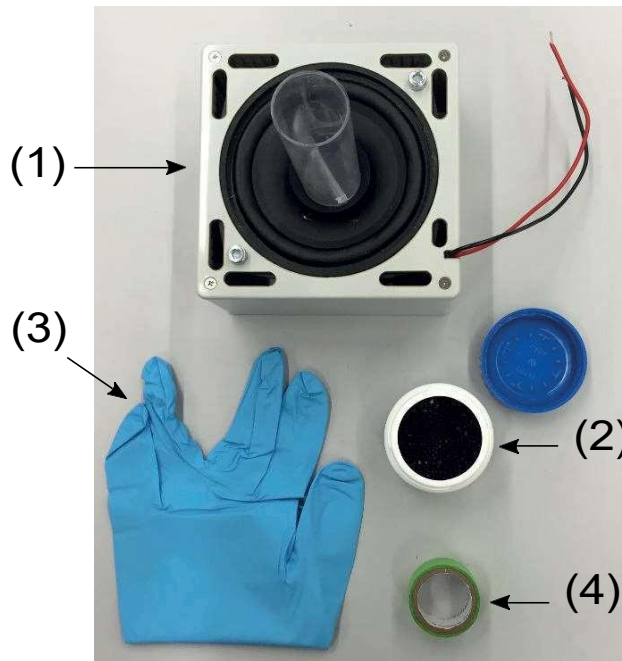


그림 2: 이 실험을 위한 추가 장비.

1. 플라스틱 실린더가 상단에 장착된 라우드스피커 어셈블리
2. 양귀비 씨앗 약 100개(플라스틱 용기)
3. 장갑
4. 스티커 테이프

## 중요 예방 조치

- 라우드스피커에 장착된 플라스틱 실린더에 과도한 측면 힘을 가하지 마세요. 라우드스피커 멤브레인이 찢어지거나 플라스틱 실린더가 찢어진 경우 교체품은 제공되지 않습니다.
- 불필요한 배터리 소모를 방지하기 위해 사용하지 않을 때는 라우드스피커 어셈블리를 끄세요.
- 이 실험에서는 신호 발생기 측면에 위치한 스피커 단자에서 4Hz 톱니 신호가 출력됩니다.
- 톱니 신호의 진폭은 *스피커 진폭*(4)이라고 표시된 오른쪽 포텐셔미터를 사용하여 조정할 수 있습니다. 신호 진폭에 비례하는 DC 전압이 *스피커 진폭* 모니터 소켓(6)에서 출력됩니다(*GND* 소켓(7) 기준). 숫자는 일반 지침에 표시된 사진(그림 2)을 참조하세요.
- 스피커 멤브레인은 섬세합니다. 어떤 방법으로든 수직 또는 측면으로 불필요한 압력을 가하지 않도록 주의하세요.

### 파트 A. 임계 여기 진폭(3.3점)

이 문제의 실제 작업을 시작하기 전에 라우드스피커를 신호 발생기 측면의 단자에 연결하세요(올바른 극성을 사용해야 합니다). 양귀비 씨앗(예:50)을 확성기에 장착된 원통에 넣고 제공된 장갑에서 잘라낸 조각을 사용하여 원통의 상단을 닫아 양귀비 씨앗이 원통에 들어가지 않도록 합니다. 토글 스위치를 사용하여 여기를 켜고 제공된 드라이버를 *스피커 진폭(4)*이라고 표시된 오른쪽 포텐서미터를 돌려 진폭을 조정합니다. 다양한 진폭을 테스트하여 구슬이 정렬되는 것을 관찰합니다.

첫 번째 작업은 이 전이의 임계 여기 진폭을 결정하는 것입니다. 이를 위해서는 *스피커 진폭* 소켓(6)에서 측정된 전압인 표시된 진폭  $A_D$ 의 함수로서 두 구획 ( $N_1 \leq N_2$ )의 구획 레이블을 선택하여  $N_1$  및  $N_2$ 의 구슬 수를 결정해야 합니다. 이 전압은 라우드스피커를 구동하는 톱니 파형의 진폭에 비례합니다. 전압당 최소 5회 이상 측정합니다.

힌트:

- 연구하는 입자에 항상 움직임이 하려면 0.7 V 을 초과하는 *스피커 진폭* 전압에 해당하는 진폭만 조사하세요. 구슬을 세지 않고 전압을 천천히 변화시키면서 시스템의 동작을 관찰하는 것부터 시작하세요. 정전기 때문에 일부 구슬이 바닥에 달라붙을 수 있습니다. 이 세지 마세요.

|     |                                                                                                                               |             |                 |       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|-------|
| A.1 | 다양한 진폭에 대한 용기의 입자 수 측정값을 표 A.1( $A_D$ )에 기록합니다.                                                                               | 그리<br>$N_1$ | 각 절반에<br>$N_2$  | 1.2pt |
| A.2 | $N_1$ 및 $N_2$ 측정값의 표준 편차를 계산하고 나열합니다<br>결과를 표 A.1에 표시합니다. 불확실성을 포함하여 그래프 A.2에 표시된 증폭도( $A_D$ )의<br>함수로 $N_1$ 및 $N_2$ 을 플롯합니다. |             |                 | 1.1pt |
| A.3 | 그래프를 바탕으로 정지 상태에 도달할 때까지 기다린 후 표시되는 임계<br>진폭 $N_1$ $N_2$ 을 결정합니다.                                                             |             | $A_{D,crit}$ 어느 | 1pt   |

### 파트 B. 보정(3.2점)

표시된 진폭  $A_D$  는 라우드스피커에 인가된 전압에 해당합니다. 그러나 물리적으로 흥미로운 양은 라우드스피커 진동의 최대 변위  $A$  이며, 이는 비드가 얼마나 강하게 여기되는지와 관련이 있기 때문입니다. 따라서 표시된 진폭을 보정해야 합니다. 이를 위해 제공된 자료와 도구를 사용할 수 있습니다.

|     |                                                                                    |       |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| B.1 | 여기 측정하는 데 사용하는 설정(예: 최대<br>엄마 이동 거리 $A$ (in mm))의 한 진동 주기에서 라우드스피커의 최대 진동 진폭을      | 0.5pt |
| B.2 | 진폭 결정 $A$ mm 를 적절한 점수, 즉, 기록<br>진폭 $A$ 을 표 B.2의 진폭 $A_D$ 함수로 표시하고 측정의 불확실성을 표시합니다. | 0.8pt |
| B.3 | 불확실성을 포함하여 그래프 B.3에 데이터를 플롯합니다.                                                    | 1.0pt |

**B.4** 적절한 맞춤을 사용하여 결과 곡선의 매개 변수를 다음과 같이 결정합니다. 0.8pt  
보정 기능 결정  $A(A_D)$ .

**B.5** 양귀비 씨앗의 임계 여기 진폭 결정하기  $A_{\text{crit}}$  임계 여기 진폭을 구합니다. 0.1pt

## 파트 C. 중요 지수(3.5점)

우리 시스템에서 온도는 여기의 입력 운동 에너지에 해당합니다. 이 에너지는 라우드스피커의 속도 제곱에 비례합니다(예:  $v^2 = A^2 f^2$ , 여기서  $f$ 은 진동 주파수입니다). 이제 이 의존성을 테스트하고 오더 파라미터의 동작을 지배하는 거듭제곱 법칙의 지수  $b$  결정합니다(방정식 1 참조).

**C.1** 불균형  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$ 는 우리 시스템의 주문 매개변수에 적합한 후보입니다. 1.1pt  
임계 진폭보다 0이고 낮은 여기 시와 같다는 점에서 0입니다. 이 차수 파라미터를 진폭의 함수로 결정합니다. 결과를 표 C.1에 .  $A$

**C.2** 불균형 플롯  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$ 의 함수로  $|A_{\text{crit}}^2 - A^2|$  그래프 C.2에서 두 1pt  
축에는 로그 눈금(이중 로그 플롯)이 있습니다. 표  
C. 사용하여 계산합니다. 플롯의 점이 선형 관계를 따르지 않는 것처럼 보일 수 있지만  
그럼에도 불구하고 임계 지수 공식과 일치하도록 선형 회귀를 수행해야 합니다.

**C.3** 지수  $b$ 를 구하고 오차를 추정합니다. 1.4pt