

중이 트랜지스터(10점)

현대 사회의 전자 기술은 스위치와 증폭기로 모두 사용할 수 있는 간단하지만 강력한 장치인 트랜지스터를 기반으로 합니다. 스위치 모드는 디지털 정보를 저장하고 처리하는 데 사용됩니다.

여기서는 두 가지 유형의 전계 효과 트랜지스터(FET)를 분석하겠습니다: JFET(접합 전계 효과 트랜지스터)와 TFT(박막 트랜지스터)입니다.

여기서는 FET의 작동 원리를 간략하게 설명하겠습니다. FET는 게이트와 소스 사이에 인가된 전압에 작용하여 소스와 드레인 사이의 전류 흐름을 제어할 수 있는 비선형 3단자 장치(이름은 게이트: G, 소스: S, 드레인: D)입니다. 불완전하지만 간단하게 비유하자면, FET는 수도꼭지와 유사하게 작동하며 손잡이가 물의 흐름을 제어하는 게이트 역할을 합니다.

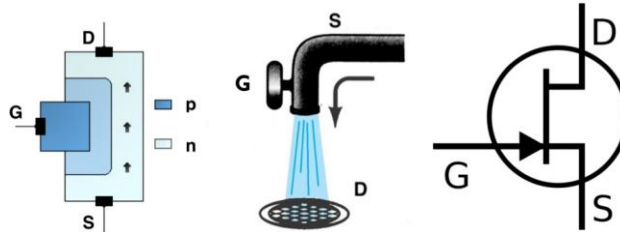


그림 1. n채널 JFET의 구성도(왼쪽), 유압식 비유(가운데) 및 전기 회로 기호(오른쪽). JFET 구성도의 화살표는 좁은 n채널을 통해 소스(S)와 드레인(D) 사이의 전류 흐름을 나타냅니다. 채널의 폭은 게이트(G)와 소스(S) 사이의 인가 전압에 따라 달라집니다.

접합 FET(Junction-FET)는 p와 n이 도핑된 실리콘과 같은 두 가지 유형의 반도체 물질 사이의 접합 특성에 의존하기 때문에 이름이 붙여졌습니다. JFET에는 소스와 드레인 사이에 전류가 흐르는 좁은 채널이 있으며, n채널 FET에서 이 채널은 n형 재료로 만들어집니다. 이러한 채널의 폭은 게이트와 소스 사이에 음의 전압을 적용하여 정밀하게 제어할 수 있습니다 $V_{GS}=V_G-V_S$. 고정 V_{GS} 의 경우 소스 및 드레인 사이에 흐르는 전류는 드레인과 소스 사이의 인가 전압에 비선형적으로 의존합니다 ($V_{DS}=V_D-V_S$). 그러나 작은 V_{DS} 전압의 경우 전류는 인가 전압에 선형적으로 의존하므로 JFET은 옴 동작을 표시합니다. 그러나 출력 저항인 $R_{DS}=V_{DS}/I_{(DS)}$ 는 인가된 V_{GS} 전압에 따라 크게 달라지며, 이는 법칙을 거의 따릅니다:

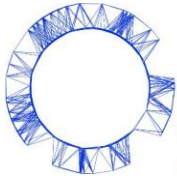
$$R_{DS} = \frac{R_{DS}^0}{1 - V_{GS}/V_P}, \quad (1)$$

where R_{DS}^0 는 $V_{GS}=0$ 의 출력 저항이고 $V_P < 0$ 은 **핀치오프 전압**이라고 하는 JFET 파라미터입니다.

분명히 핀치오프 전압에서 FET는 전류 흐름을 차단합니다.

고정된 $V_{GS} > V_P$ 의 경우 소스 및 드레인 사이의 전류는 V_{DS} 를 증가시키면서 선형 거동을 벗어나기 시작하고 어느 시점에서 거의 일정한 값으로 포화됩니다. $V_{GS}=0$ 일 때 $I_{(DSS)}$ 를 포화 전류라고 가정합니다. 포화 영역(크게 적용된 V_{DS})에서 포화 전류는 다음과 같은 방식으로 V_{GS} 에 따라 달라집니다:

$$I_{DS} = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)^2. \quad (2)$$



JFET의 매우 중요한 두 가지 특성을 강조해야 합니다. 전압 제어 출력 저항은 매우 낮을 수 있지만 입력 저항($R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$)은 일반적으로 $10^9 \Omega$ 보다 매우 높기 때문에 이 소자는 입력 전류를 매우 적게 사용합니다. 또한 소형 JFET의 커패시턴스는 매우 낮기 때문에 MHz 속도를 넘어 '개폐'할 수 있는 매우 빠른 장치입니다.

이제 다른 유형의 FET인 TFT가 어떻게 작동하는지 설명하겠습니다.

다른 FET와 마찬가지로 TFT는 세 번째 전극인 게이트에 가해진 전위를 통해 두 접점인 드레인 및 소스 전극 사이의 전류를 제어할 수 있습니다.

게이트 전극은 반도체에 존재하는 자유 전하 캐리어를 제어할 수 있는 수직 전기장을 형성할 수 있는 유전체에 의해 반도체 층과 물리적으로 분리되어 있습니다(전계 효과). 유전체 층은 이동 이온이 존재하는 종이와 같은 전해막으로 대체할 수 있으며(그림 2 참조), 이 경우 게이트에 가해지는 전압은 반대 전하를 가진 이온을 반도체 계면으로 밀어내어 반도체 내에 존재하는 자유 캐리어의 밀도를 조절하는 이온전하 시트를 생성합니다(전해질 게이트 트랜지스터 - EGT - Electrolyte Gated Transistors). 리스본 노바 대학교의 연구원들은 2008년에 '종이 트랜지스터'를 개발한 선구자이며 이 분야의 세계적인 리더입니다.

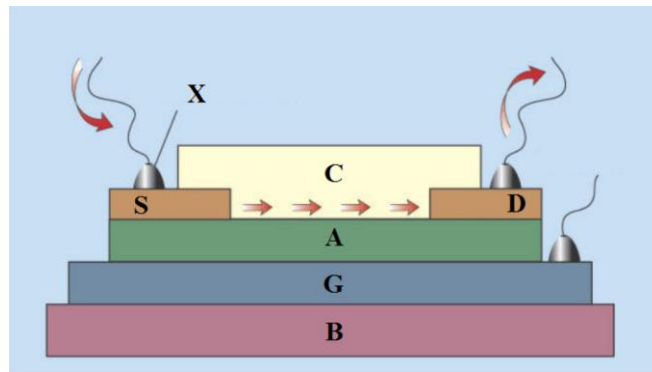


그림 2. 이 문제에 사용되는 종이 박막 트랜지스터(TFT)의 구성도. S - 소스; D - 드레인; G - 게이트; A - 종이(유전체); B - 기판; C - 반도체 층(갈륨-인듐-아연 산화물(GIZO)); X - 금속 접점. 화살표는 기존 전류 흐름을 나타냅니다.

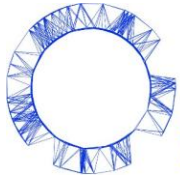
JFET와 마찬가지로 TFT 트랜지스터는 선형 모드와 포화 모드의 두 가지 기본 작동 모드로 작동할 수 있습니다. JFET와 달리 TFT 고유 커패시턴스는 디바이스 성능과 관련된 파라미터입니다.

이 실험 문제에서는 n-채널 JFET과 종이 TFT가 어떻게 작동하는지 살펴봅니다.

$G(V_{GS})$ 및 $D(V_{DS})$ 에서 서로 다른 전압을 적용하여 S와 D(I_{DS}) 사이의 전류를 측정하여 이러한 디바이스의 특성 곡선(CC)을 결정합니다.

가장 중요한 두 가지 CC는 출력과 전송 곡선입니다:

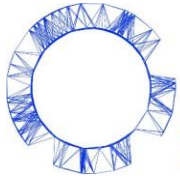
- **출력 커브:** 이 곡선의 경우 소스-드레인 간 전류(I_{DS})가 측정되고 소스-드레인 간 전압(V_{DS})의 함수로 플롯되며, V_{DS} 는 0V에서 최대로 스위칭됩니다. +3V, 단계적으로 V_{GS} 를 일정하게 유지합니다.
- **전송 곡선:** 이 곡선의 경우 I_{DS} 를 측정하고 V_{GS} 에 대해 플롯합니다. V_{DS} 는 포화 모드에서 트랜지스터가 작동하기에 적합한 값으로 유지되고 V_{GS} 는 -3에서 0V까지 단계적으로 스위칭됩니다.



장비

이 실험 문제를 위해 다음 장비 세트(그림 3)가 제공됩니다:

1. 멀티미터
2. JFET 트랜지스터(라벨이 부착된 비닐봉지 안에 제공)
3. 악어 클립이 있는 케이블(10)
4. 납작한 악어 클립(4개, 비닐봉지 안에 제공)
5. 배터리 팩(4개×1.5V)
6. 배터리 홀더
7. 미니 브레드보드 지원
8. 미니 브레드보드에 연결하기 위한 점퍼 와이어(3)
9. HB 연필
10. 은색 잉크 전도성 펜(회로 스크라이브)
11. 크로노미터
12. 인쇄 회로가 있는 종이 시트와 종이를 유전체 층으로 사용하는 내장형 TFT(그림 4)
13. 필기구가 들어 있는 가방(펜 1개, 연필 1개, 지우개/샤프펜슬 1개, 자 1개)



Q1-4

영어(공식)

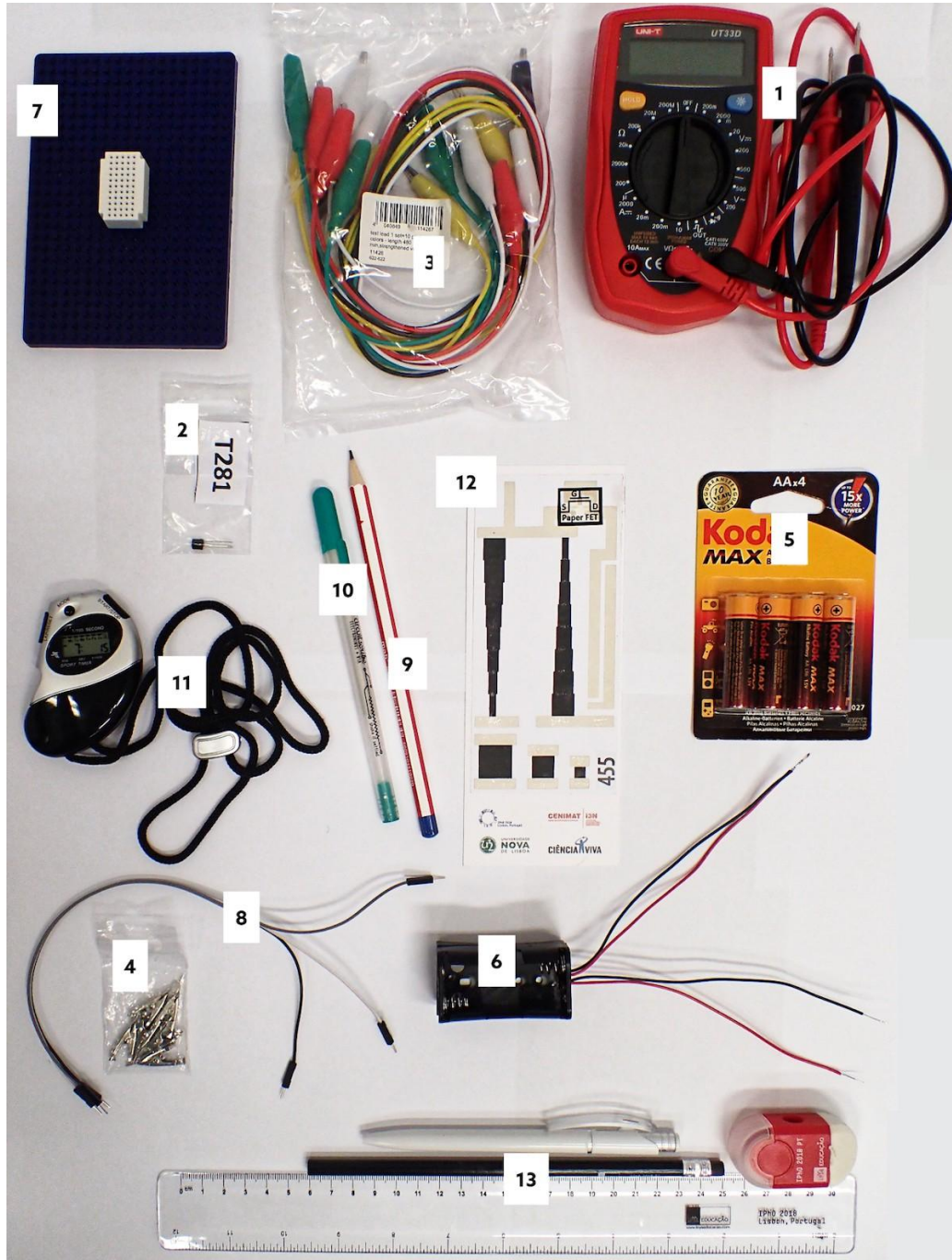


그림 3. 장비 세트.

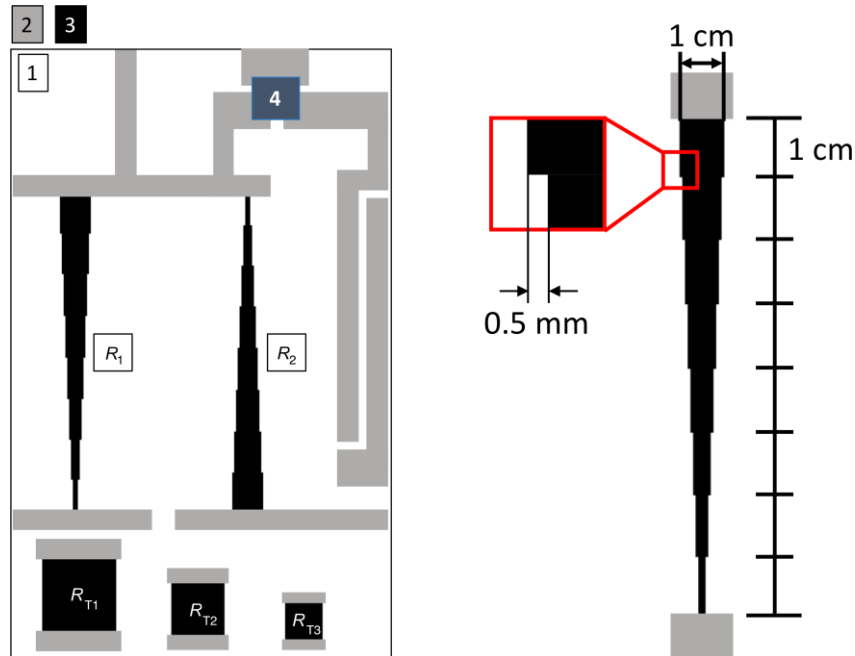
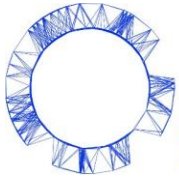
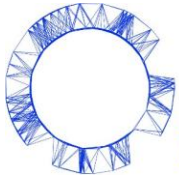


그림 4. 왼쪽: 장비에 인쇄 회로가 포함된 (1), 은 전도성 트랙(2), 탄소 저항성 트랙(3), 종이 트랜지스터(4), 전압 분배기(R_1 및 R_2). 오른쪽: 전압 분배기 저항의 물리적 치수(각 세그먼트에 대해 0.5mm의 단계가 일정함).

중요한 예방 조치입니다:

인쇄 회로와 내장된 트랜지스터가 있는 종이를 **접으면** 쉽게 손상될 수 있으므로 **접지 마세요**. 최상의 결과를 얻으려면 측정하는 동안 가능한 한 평평하게 유지하세요.

측정을 위해서는 다음과 같은 **중요한 정보**를 고려하는 것이 중요합니다:



- 멀티미터는 항상 **DC 모드**에서 작동해야 합니다.
- 멀티미터는 자동 범위 조정 기능이 없으므로 측정에 가장 적합한 범위를 신중하게 선택해야 합니다. 오버플로가 발생하면 디스플레이에 양수 및 음수 값에 대해 각각 "1" 또는 "-1"(디스플레이에 왼쪽으로 맞춤)이 표시되며, 더 낮은 범위로 변경해야 합니다.
- 저전류 범위는 315mA 퓨즈로 보호됩니다. 높은 전류가 흐르면 퓨즈가 끊어질 수 있으므로 배터리와 멀티미터 사이에 **단락을 일으키지 않도록** 주의하세요!
- 전압계 모드에서 작동할 때 멀티미터의 내부 저항은 10M Ω 입니다.
- 전류계로 작동할 때 멀티미터의 내부 저항은 다음 표와 같이 범위에 따라 달라집니다:

범위	R_{int}/Ω
200 mA	1.0
20mA	10
2mA	100

표 1. 전류계로 작동할 때 제공된 멀티미터의 내부 저항.

따라서 멀티미터를 DC 전류계 모드로 사용하는 경우, 사용 가능한 3가지 DC 범위 중 하나에서 작동할 때 단자 간에 최대 200mV의 전압 강하가 발생합니다.

파트 A. 회로 치수 측정(2.5점)

필요한 V_{DS} 및 V_{GS} 전압을 얻기 위해 종이에 인쇄된 두 개의 탄소 저항기(R_1 및 R_2 (그림 4 참조)와 전압 분배기 회로를 사용하여 적절한 전위 강하를 위한 회로 치수를 결정합니다. R_1 및 R_2 는 전압 분배기 회로의 총 저항(R_{tot})이 됩니다. 예를 들어 R_1 에 일정한 전압(이 경우 배터리에서 약 3V)을 인가하면 3V(V_{in} , 배터리의 양극 접점)에서 접지(0V, 이제부터는 두 배터리 팩의 공통 접점을 접지로 지정)로 전압 강하를 볼 수 있습니다. $R_{합계}$ 는 본질적으로 두 가지 저항으로 나눌 수 있습니다(R_x 및 R_y)를 눌러 원하는 V_{out} 을 얻습니다(그림 5).

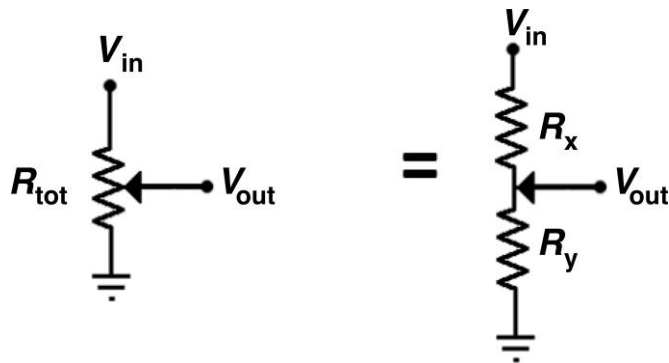
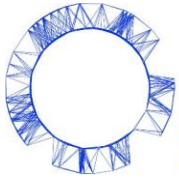


그림 5. 전압 분배기 회로.



A.1	출력 전압 $V_{\text{출력}}$ 에 대한 표현식을 $V_{\text{입력}}$ 및 저항 R_x 및 R_y .	0.2pt
A.2	하단에 있는 세 개의 테스트 저항의 저항을 측정합니다. 시트 (R_{T1}, R_{T2} 및 R_{T3})를 멀티미터로 측정합니다. 충분한 측정을 수행합니다. 은색 접점의 위치가 다릅니다. 답변에 값을 입력합니다. 시트. 평균값을 계산하고 각 테스트 저항의 저항에 대한 불확실성을 추정합니다.	0.5pt
A.3	특정 저항률을 갖는 정사각형 박막의 저항(ρ)은 다음과 같아야 함을 보여줍니다. 는 변의 길이에 독립적이어야 합니다. 이 크기 독립적인 저항은	0.3pt
A.4	에서 탄소 필름의 시트 저항의 평균값을 계산합니다. 데이터에서 탄소 필름의 시트 저항의 평균값을 계산하고 ρ , 탄소 필름의 저항을 다음과 같이 추정합니다.	0.4pt
A.5	R_1 및 R_2 저항의 이론적 값은 $R_1 = R_2 = \frac{1}{nR_{\square}}$ 임을 보여줍니다. $nR_{\square} \sim 14.2897$. R_1 과 R_2 를 측정하고 그 값을 답안지에 적습니다. n 의 실험값을 구하고 이론값과 비교합니다.	0.5pt

제공된 은색 잉크 펜을 사용하여 제공된 각 저항을 따라 동일한 간격으로 7개의 전도성 선을 그립니다(그림 6에 예시된 대로). 이 개별 선은 전압 분배기의 접점 역할을 합니다.

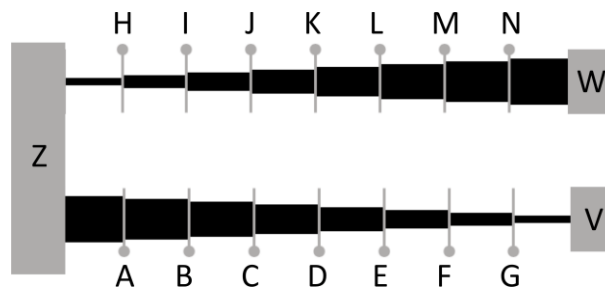
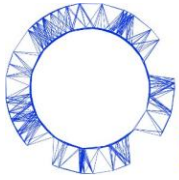


그림 6. 접점의 선 그리기 예시 및 명명 체계.

A.6	모든 접점에 대해 R_x 및 R_y 저항을 측정합니다. R_x 은 다음과 같이 정의됩니다. 과 포인트 V(저항 1) 또는 W(저항 2) 사이의 0.3pt 저항입니다, 와 R_y 는 접점과 점 Z 사이의 저항으로 정의됩니다. 답안지에 제공된 표를 채우세요.	접점
------------	--	----

배터리 홀더에 AA 배터리 4개를 삽입합니다. 올바른 배터리 극성을 주의 깊게 관찰하고



단락이 발생하지 않도록 하세요. 그런 다음 그림 7에 표시된 대로 배터리 팩을 물리적으로 연결합니다. 악어 클립으로 은색 트랙이 손상되지 않도록 주의하세요.

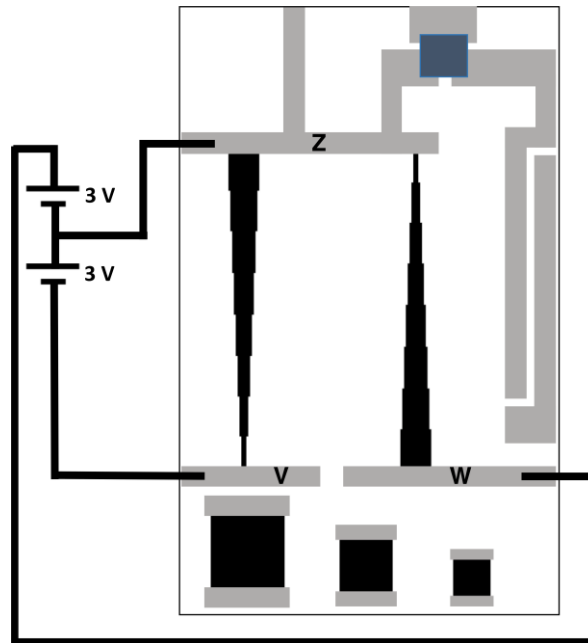


그림 7. 배터리 연결

- A.7** 각 접점에서 $V_{\text{출력}}$ 을 측정하고, $V_{\text{출력}}$ 은 다시 측정된 전압입니다. 스펙트럼으로 측정된 전압을 포인트 Z로 변환하고 답안지의 제공된 표에 값을 입력합니다.

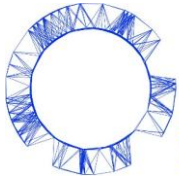
0.3pt

이것으로 회로 치수 측정 부분을 마쳤으며 이제 JFET 트랜지스터의 CC를 측정할 수 있습니다.

파트 B. 상용 JFET 트랜지스터의 특성 곡선(4.5점)

JFET 트랜지스터를 특성화하기 위해 그림 8에 표시된 설정을 사용합니다. 먼저 제공된 JFET 트랜지스터의 세 접점(S, D, G)을 식별하는 것으로 시작하세요. **장치가 대칭이 아니므로 접점을 올바르게 식별하는 데 주의하세요!** 제공된 미니 브레드 보드를 지지대와 함께 사용하여 JFET 트랜지스터를 장착할 수 있습니다. 제공된 점퍼 와이어는 미니 브레드 보드와 함께 사용해야 합니다.

제공된 케이블을 사용하여 트랜지스터의 게이트와 소스를 접지(0V에서 서킷의 Z 지점)에 연결합니다. 이 문제를 해결하는 동안 JFET의 소스는 항상 접지에 연결된 상태를 유지해야 합니다.



Q1-9

영어(공식)

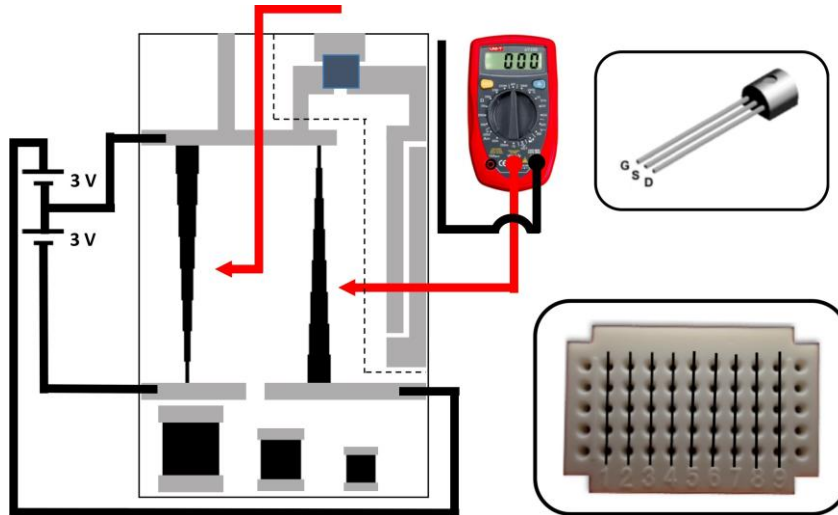


그림 8. JFET 특성 곡선 결정을 위한 설정. 점선 영역 내부의 회로 중 TFT가 포함된 부분은 문제의 파트 B에서 사용하지 않습니다. 상단 삽입물은 JFET 트랜지스터의 게이트, 소스 및 드레인을 식별하는 방법을 보여줍니다. 하단 삽입물은 미니 브레드보드의 구멍이 어떻게 연결되는지 보여줍니다. 번호가 매겨진 열의 모든 구멍은 내부적으로 상호 연결되고 다른 열의 구멍과 분리되어 있습니다. 멀티미터의 그림은 단지 예시일 뿐이며 멀티미터의 회전식 선택기에서 적절한 측정 모드와 범위를 선택해야 합니다.

- B.1** 트랜지스터의 게이트를 접지에 연결합니다($V_{GS}=0$). 그런 다음 DC 전류 모드에서 사용해야 하는 멀티미터의 케이블 중 하나를 0.2pt로 연결합니다. 트랜지스터의 드레인과 다른 케이블로 전압 분배기에서 사용 가능한 가장 높은 전압을 가진 지점을 터치합니다. 답안지에 전류 값 I_{DS} 를 적으세요.

- B.2** $V_{GS}=0$ 을 유지하면서 드레인에 적용되는 다른 양의 전압에 대해 전류 $I_{(DS)}$ 를 측정합니다. 그런 다음 회로를 변경하여 음의 전압을 적용합니다. 트랜지스터의 게이트와 소스 사이 ($V_{GS}<0$)를 계산하고, 드레인과 소스 사이의 양의 인가 전압의 함수로서 I_{DS} 의 계산을 반복합니다. 답안지에 제공된 표에 자신의 값을 채우세요.

전압 분배기 회로가 저저항 부하에 연결되면(그림 9), 전압 값이 프로-
전압 분배기에 의해 제공된 V_{in} 은 부하가 다음과 같은 경우 측정된 공칭 값 V_{out} 과 다릅니다.
높은 임피던스 전압계의 경우와 같이 저항이 높은 경우.

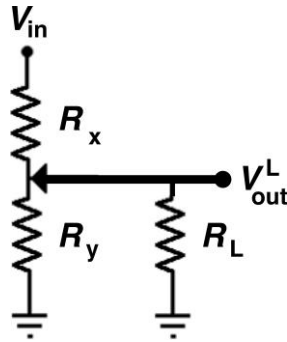
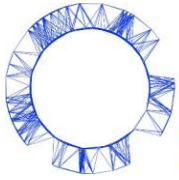


그림 9. 부하가 있는 전압 분배기.

- B.3** 전압 분배기가 부하에 연결되어 있다고 가정합니다. R_L 출력값을 구합니다.
보정 계수 $f = V_{out}^L / V_{in}$ 을 R_L, R_x 및 R_y 의 함수로 표현한 값입니다.

0.2pt

JFET 트랜지스터는 $V_{GS} = 0$, 즉 $R^0 \sim 50\Omega$ 일 때 출력 저항이 낮습니다. 그러나 이 저항은 $V_{GS} < 0$ 게이트가 소스에 대해 음극으로 편광될 때 크게 증가합니다. 출력 저항은 방정식 (1)의 법칙을 거의 그대로 따릅니다.

- B.4** 적절한 보정 계수를 사용하여 V_{DS} , 전압 강하를 계산합니다.

B.2에

이 측정된 모든 기판에 대해 R^0 는 소스-게이트 전압이 0V일 때의 저항입니다. 이 문제에 사용된 JFET의 공칭 데이터 낮추기: $R^0 = 50\Omega, V_p = -1.4V$.

- B.5** JFET 트랜지스터의 출력 곡선 $I_{(DS)}(V_{(DS)})$ 를 플롯합니다.

0.5pt

- B.6** 작은 V_{DS} 에서 작동 중인 트랜지스터를 고려합니다. 실험값을 구합니다.

0. $R_{(DS)}$

- B.7** $V_{DS} \sim +3V$ 에 대한 JFET 트랜지스터의 전달 곡선 $I_{(DS)}(V_{(GS)})$ 를 플롯합니다.

0.3pt

JFET 트랜지스터가 포화 모드에 있을 때 전류 I_{DS} 는 방정식 (2)로 표현되는 법칙을 그대로 따릅니다.

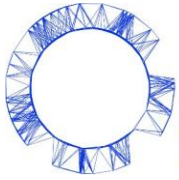
- B.8** 측정된 데이터에서 I_{DSS} 와 켄치오프 전압 V_p 를 구합니다.
바이스. V_p 에서 얻은 값을 공칭 값과 비교합니다.

0.4pt

특히 증폭기에 사용되는 경우 JFET 트랜지스터의 중요한 파라미터는 소위 트랜지스터 트랜스 컨덕턴스(g , 다음과 같이 정의됨)입니다.

$$g = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \quad (3)$$

두 변수 $f(x, y)$ 의 함수에서 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 표기는 다음과 같은 경우 x 에 대한 f 의 미분을 의미합니다.
 y 는 일정하게 유지됩니다.



B.9 측정된 전송 곡선으로부터 디퓨저의 트랜스 컨덕턴스를 얻습니다.
바이스 $V_{GS} = -0.50V$ 에서 얻은 계산된 값과 비교합니다.
모델 방정식 (2).

0.4pt

파트 C. 종이 박막 트랜지스터(2.0점)

이제부터 JFET를 버리고 다음 작업과 질문은 모두 인쇄 회로의 상단 모서리에 있는 종이 박막 트랜지스터(TFT)와 관련이 있습니다. TFT 게이트, 소스 및 드레인은 그림 10에 표시되어 있습니다. TFT 게이트와 소스를 접지에 연결합니다. 또한 이 문제에서 종이 TFT의 소스는 항상 배터리 팩의 공통 접점에 연결해야 합니다, 즉, 그림 10과 같이 0V로 설정합니다. 전압 회로 분배기 중 하나를 통해 트랜지스터를 $V_{DS} > 0$ 으로 극성화합니다(그림 10). 전류계에 전류가 흐르는지 확인합니다.

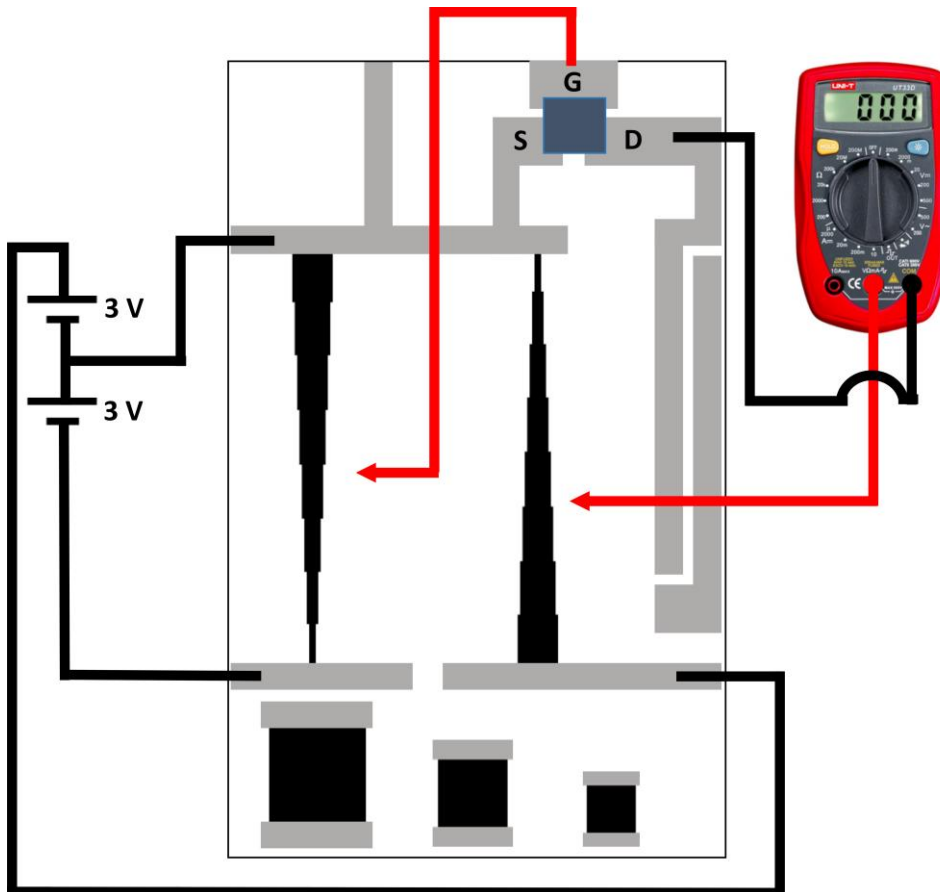
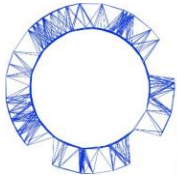


그림 10. 종이 TFT에서 측정을 위한 설정. 멀티미터의 그림은 단지 예시일 뿐이며, 멀티미터의 회전식 선택기에서 적절한 측정 모드와 범위를 직접 선택해야 합니다.



C.1 $V_{DS}=+3.0\text{ V}$ 를 적용합니다. $V_{GS}=-3.0\text{ V}$ 를 적용하여 트랜지스터를 닫습니다. 기다립니다. 트랜지스터가 닫힐 때까지 0.8pt 1분을 기다립니다. 답안지에 전류의 잔류 값 $I_{\text{닫힘}}$ 을 적습니다. 그런 다음 V_{GS} 를 넣어 트랜지스터를 엽니다. = 0, $V_{DS}=+3.0\text{ V}$ 를 유지합니다. 시간 함수로 전류를 측정합니다. 트랜지스터를 여는 순간 최소 5분 동안 $I_{(DS)}(t)$ 데이터를 답안지에 수집합니다.

C.2 플롯 $I_{DS}(t)$. 시간에는 두 개의 지수 과정이 중첩되어 있습니다. 1.2pt
의존성을 가지며, 하나는 다른 하나(τ_1)보다 훨씬 더 큰 시간 상수(τ_2)를 가집니다. 더 짧은 시간 상수인 τ_1 을 제거합니다.

파트 D. 인버터 회로(1.0점)

마이크로 전자 회로에서 가장 중요한 회로 중 하나는 디지털 입력을 반전시킬 수 있는 인버터입니다. 예를 들어 $V_{\text{입력}}=\text{높으면 } V_{\text{출력}}=\text{낮고}$ 그 반대의 경우도 마찬가지입니다. 다시 한 번 회로의 기본이며 가장 간단한 설계 중 하나는 그림 11에 표시된 트랜지스터와 부하 저항을 사용하는 소위 공통 소스 증폭기입니다(R_L). 이 경우 $V_{\text{인}}=V_{GS}$ 및 $V_{\text{아웃}}=V_{\text{드레인}}$ 은 트랜지스터의 드레인 전극에서 측정된 전압입니다. 따라서 이 부분에서는 $V_{(GS)}$ 를 -3V에서 0V로 스위칭하는 동안 V_{out} 에 어떤 일이 발생하는지 모니터링합니다.

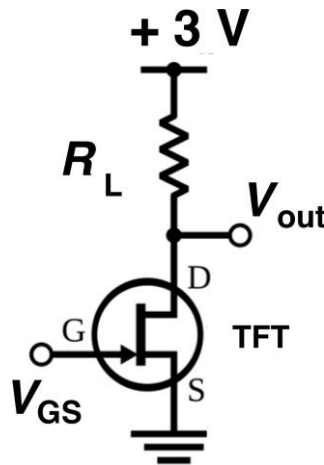


그림 11. 공통 소스 증폭기 및 인버터 회로.

그림 11의 설정에서 트랜지스터는 종이 TFT이고 R_L 은 그림 12에 표시된 대로 연필 트랙을 사용하여 트랜지스터의 드레인 접점과 V_{in} 접점을 연결하여 이제 수동으로 추가할 부하 저항입니다. 글을 쓰는 동안 실제로 종이에 얇은 전도성 흑연 층을 쌓는 것이므로 층을 겹쳐 그릴수록 저항이 R_L 을 그리는 동안 저항을 계속 모니터링하세요. V_{out} 을 가능한 한 0V에 가깝게 끌어올리려면 부하 저항이 충분히 커야 합니다. 따라서 저항을 그리는 동안 목표 값 $R_L=200\text{ k}\Omega$ 에 가까운 값을 목표로 하세요.

연필을 사용하여 R_L 을 줄이거나 지우개를 사용하여 늘릴 수 있습니다. 목표 값과 10% 이상 차이가 나지 않는 값을 얻는 것을 목표로 해야 합니다.

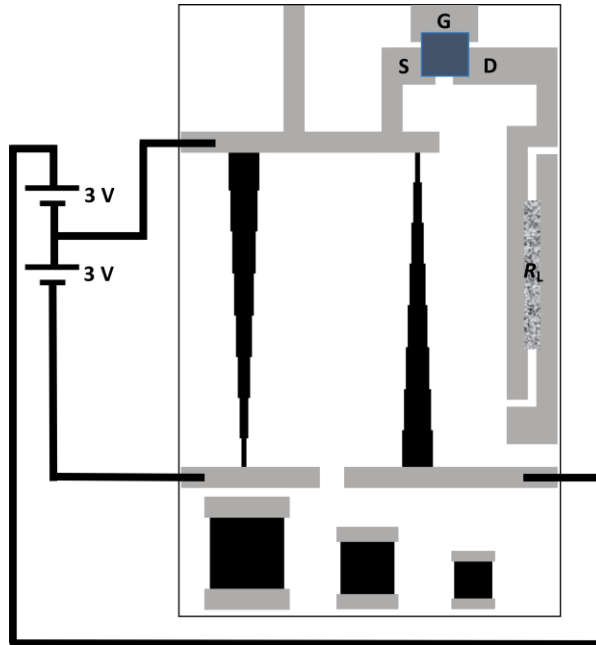
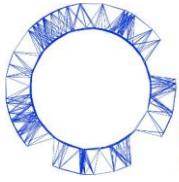


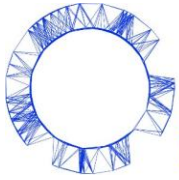
그림 12. 인버터/공통 소스 증폭기 구성 설정.

포함된 HB 연필을 사용하여 종이 TFT의 부하 저항으로 사용할 $R_L \approx 200 \text{ k}\Omega$ 값의 탄소 저항을 손으로 그려서 인버터 회로를 구축합니다(그림 12 참조).

- D.1** 답안지에 측정된 R_L 값을 적습니다. 0.5pt 카본 트랙 저항을 사용하여 인버터 회로(그림 12)를 설정하고 종이 TFT. 측정하기 전에 트랜지스터를 완전히 켜고 $V_{GS} = -3\text{V}$ 를 적용하고~ 1분 동안 기다려야 한다는 점을 기억하세요. 그런 다음 V_{GS} 를 -3V에서 0V로 스위칭하면서 $V_{\text{출력}}$ 을 측정하고 각 지점의 안정화 시간을 최대 100초까지 설정하여 $V_{\text{출력}}$ 의 관독값을 측정한 후 답안지에 측정값을 입력합니다.

- D.2** 측정된 $V_{\text{아웃}}(V_{\text{인}})$ 전압 전달 곡선을 플롯하고 부드러운 추세를 그립니다. 곡선을 그립니다.

0.5pt



폴리머 실의 점탄성(10점)

실험을 시작하기 전에 실에 힘을 주어서는 안 된다는 점에 유의하세요!

지금 바로 체중계를 켜니다(예열 시간은 약 정도 소요됩니다). 저울의 설정을 변경하지 마세요.

소개

고체 물질은 외부의 힘을 받으면 변형됩니다. 작은 힘이 가해질 경우 이러한 변형은 힘에 비례하며(후크의 법칙) 가역적이므로 힘을 제거하면 재료가 초기 모양을 회복합니다.

고체의 경우 응력과 변형률의 개념을 사용하여 더 편리하게 설명할 수 있습니다. 응력은 단위 면적당 힘, 즉 힘 F 를 작용하는 면적 S 으로 나눈 값으로 정의됩니다.

변형률 ϵ 은 길이의 상대적인 변화입니다:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{그리고} \quad \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad , \quad (1)$$

여기서 l 및 l_0 은 각각 최종 길이와 원래 길이입니다. 단순 탄성 동작에서 스트레스는 단순히 균주에 비례하며 $\sigma = E\epsilon$ (후크의 법칙) 비례 계수인 E 는 다음과 같이 명명됩니다.
영의 계수.

후크의 법칙으로 표현되는 탄성 거동은 충분히 작은 대해서만 유효한 근사치입니다. 더 높은 변형률의 경우 소성 영역에 도달하면 변화는 점차 되돌릴 수 없게 되며, 이 경우 분자 움직임은 점성 유체의 움직임과 유사하게 제약이 풀리기 시작합니다. 즉, 탄성 한계 이상으로 늘어나거나 압축되면 재료는 점근적으로 유동적이 됩니다.

점탄성 소재

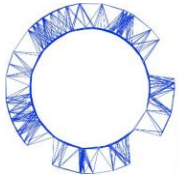
특정 재료는 탄성 고체의 측면과 점성 유체와 유사한 특징을 결합하여 점탄성이라고 합니다.

점탄성 재료를 다룰 때는 순수 탄성 거동 변형률 ϵ 은 순수 탄성 항 $\sigma_0 = E_0\epsilon_0$ 과 점탄성 항 σ_1 의 합입니다:
그리고 추가적인 점성 행동, 따라서 주어진 스트레스를 개발하는 데 필요한 총 σ

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (2)$$

두 응력 항은 동일한 변형률에 해당하는 것으로 가정합니다($\epsilon = \epsilon_0 = \epsilon_1$). 그러나 변형률 ϵ_1 , 점탄성 항에 해당하는 값은 일반적으로 순수 탄성 변형률의 합인 $\epsilon_1^e = \sigma_1 / E_1$ 로 모델링됩니다, 순수 점성 균주, ϵ_1^v , (둘 다 동일한 스트레스를 받음 $\sigma = \sigma^e = \sigma^v$):

$$\epsilon_1 = \epsilon_1^e + \epsilon_1^v \quad (3)$$



순수한 점성 공정에서는 점성 유체에서 발견되는 것과 유사하게 응력과 변형률의 시간 미분 사이의 선형 관계가 인정됩니다,

$$\sigma_1 = \eta_1 \frac{d\epsilon_1^v}{dt}$$

여기서 η_1 은 점도 계수입니다.

이 현상학적 모델은 선형 점탄성의 표준 선형 고체 모델이라고 불리며, 그림 1에서 스프링은 순수한 탄성 성분을 나타내고 댐퍼는 순수한 점성 성분을 나타냅니다.

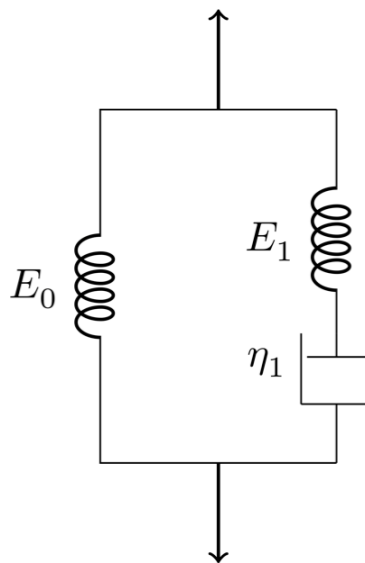


그림 1. 선형 점탄성의 표준 선형 솔리드 모델.

위의 방정식에서 다음과 같은 관계를 구할 수 있습니다:

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} \quad (4)$$

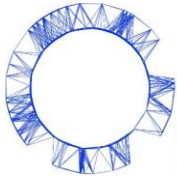
따라서 점탄성의 표준 선형 모델 내에서 다음을 보여줄 수 있습니다.

$$\sigma = E_0 \epsilon + \tau_1 (E_1 \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_1}) \quad (5)$$

여기서 $\tau_1 = \eta_1 / E_1$. 이 미분 방정식은 변형률과 응력 사이의 관계가 다음과 같다는 것을 보여줍니다.

가 더 이상 선형이 아니며 변형률과 응력은 모두 시간의 일반 함수라는 것을 알 수 있습니다. $\epsilon(t)$ 를 구하려면 다음과 같은 초기 조건을 지정하는 데 필요한 $\sigma(t)$ 또는 그 반대의 경우도

발생할 수 있습니다. 따라서 두 가지 특별한 경우가 있는데, 각각 응력 완화 조건과 $\epsilon(t=0) = \epsilon_0$ 또는 $\sigma(t=0) = \sigma_0$ 조건에 해당합니다. 응력 완화 재료에 갑작스러운 변형률 ϵ_0 이 가해지며 시간이 지나도 일정하게 유지되므로 $\frac{d\epsilon}{dt} = 0$ 또는 $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ 로 $t=0$ 에서 시작합니다.



이러한 경우 함수

$\sigma(t)$ 는 매체의 점탄성 파라미터에만 의존하며 방정식 (5)의 해는 다음과 같습니다.

$$\sigma(t) = \epsilon(E(0) + E_1) e^{-t/\tau_1} \quad (6)$$

여기서 $t=0$ 에서는 탄성 성분만이 응력에 기여하고 따라서

$\sigma(t=0) = \epsilon(E(0) + E_1)$. 이 솔루션은 점탄성 응력이 시간에 따라 기하급수적으로 감소한다는 것을 보여줍니다, WITH AOTME O ST AN τ .

다중 탄성 프로세스

표준 선형 모델은 그림 2에서 제시된 것처럼 많은 점탄성 프로세스를 포함하도록 쉽게 확장할 수 있습니다.

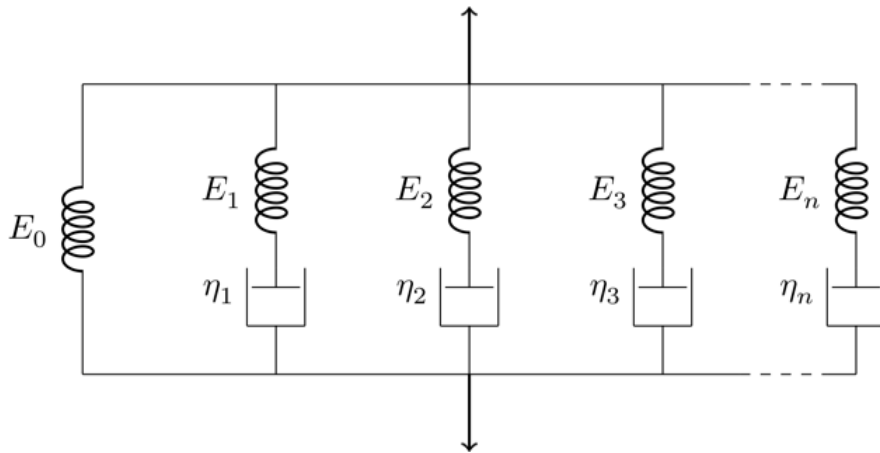


그림 2. 다중 점탄성 프로세스를 위한 일반화된 모델.

따라서 N 다른 점탄성 구성 요소를 고려합니다,

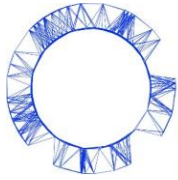
$$\sigma = \sigma_0 + \sum_k \sigma_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

여기서 $\frac{d\epsilon_h}{dt} = \frac{1}{h} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{h}$, 그리고 위와 같이 $\frac{d\epsilon_0}{dt} = \frac{d\epsilon_h}{dt} = \frac{d\epsilon}{dt}$.

따라서 식 (5)를 다음과 같이 일반화할 수 :

$$\sigma = E_0 \epsilon + \sum_k \eta_k \frac{d\epsilon}{dt} + \sum_k \tau_k \frac{d\sigma_k}{dt}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

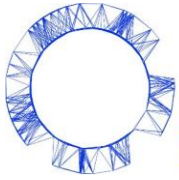
$$\eta_i = \sum_k \eta_k, \quad \tau_k = \eta_k / E_k$$



일정한 변형률 조건에서 다양한 점탄성 응력은 시간이 지남에 따라 기하급수적으로 감소해야 합니다,
 $\sigma_k = A_k e^{-t/\tau_k}$ 를 통해 해를 구할 수 있습니다:

$$\sigma(t) = \epsilon(E_0 + \sum_k E_k e^{-t/\tau_k}) , \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

where it was as follows: if $t=0$ then only the elastic component contributes to the stress, so that
 $\sigma_0 = \epsilon(E_0 + \sum_k E_k)$. The result shows that the viscoelastic response is clearly non-linear.



장비

이 실험 문제를 위해 다음과 같은 장비 세트가 제공됩니다(그림 3 참조):

1. 레이저 포인터를 배치하는 지지 시스템과 수직으로 늘어진 실을 저울 위에 일정한 변형으로 고정하는 또 다른 상부 지지 시스템이 있는 스탠딩 구조물 1개;
2. 속이 빈 원통형 덩어리와 나사산을 부착하는 고정 나사로 구성된 매스 세트 1개;
3. 매스 세트에 부착된 긴 열가소성 폴리우레탄(TPU) 나사 1개와 나사산을 상단 지지대에 걸 때 사용하는 다른 고정 나사 1개;
4. 하나의 고정 나사에 부착된 짧은 TPU 나사 1개;
5. 레이저 포인터 1개와 각 지지대;
6. 디지털 저울 1개;
7. 평면 거울 2개;
8. 스톱워치 1개;
9. 자 1개;
10. 금속 1개;
11. 화면 역할을 할 A4 용지 1장;
12. 레이저를 제자리에 고정하고 전원을 켜기 위한 스프링 클램프 1개.

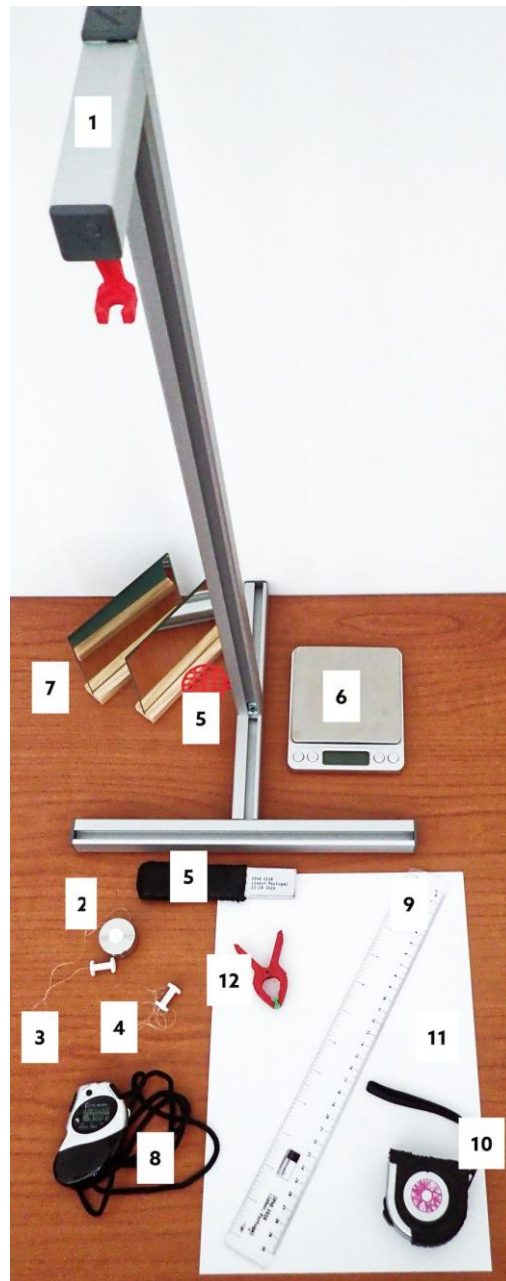
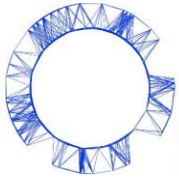
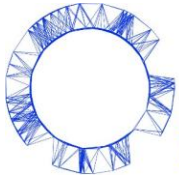


그림 3. 이 실험 문제를 위한 장비.



파트 A: 스트레스 이완 측정(1.9점)

실험을 시작하기 전에 실에 힘을 주어서는 안 된다는 점에 유의하세요! 실이 실수로 스트레스를 받은 경우 여러분의 실을 요청하되, 시간이 걸리므로 실험 시간이 줄어든다는 점을 기억하세요.

측정을 시작하기 전에 '파트 D. 데이터 분석'에 나와 있는 지시 사항을 주의 깊게 읽어야 합니다: 데이터 분석"의 표시를 주의 깊게 읽고 이 부분의 측정을 전에 측정 방법을 계획해야 합니다.

A.1 나사 머리 사이의 늘어지지 않은 나사산의 길이를 측정합니다. To 나사 안쪽 길이를 포함하여 총 나사 길이 l_0 을 구한 다음 5를 더합니다. 각 나사마다 mm. 답안지에 측정값을 적습니다. l 그리고 그 불확실성. 0.3pt

A.2 질량 세트(P)의 총 중량을 그래프스(gf) 단위로 측정합니다. Remem- 1그램의 힘은 질량 1의 무게에 해당하는 힘입니다. 그래프 ($1 \text{ gf} = 9.80 \times 10^{-3} \text{ N}$). 답안지에 측정값을 적습니다. 그리고 그 불확실성에 대한 추정치입니다. 0.3pt

다양한 이완 요소를 실험적으로 관찰하려면 충분한 시간 동안 스트레스를 측정해야 합니다. 이 경우 약 **45분** 동안 스트레스 변화를 샘플링하는 것으로 충분합니다.

이제 두 가지 작업 **1. 및 2**를 동시에 수행해야 합니다. 시작하기 전에 지침을 자세히 읽어주세요.

중요: 어떤 이유로든 실험이 중단되면 다시 시작할 수 없습니다. 새 스프레드로 다시 시작해야 합니다. 이 경우 여러분의 스프레드를 요청하세요.

다음과 같은 동시 조치를 취하세요:

- 저울 플랫폼에 질량 세트를 유지하면서 반대쪽의 고정 나사가 스탠딩 구조의 나사산 지지 시스템에 놓이도록 나사산을 늘립니다(그림 4).
- 동작 1과 동시에 크로노미터를 시작합니다.

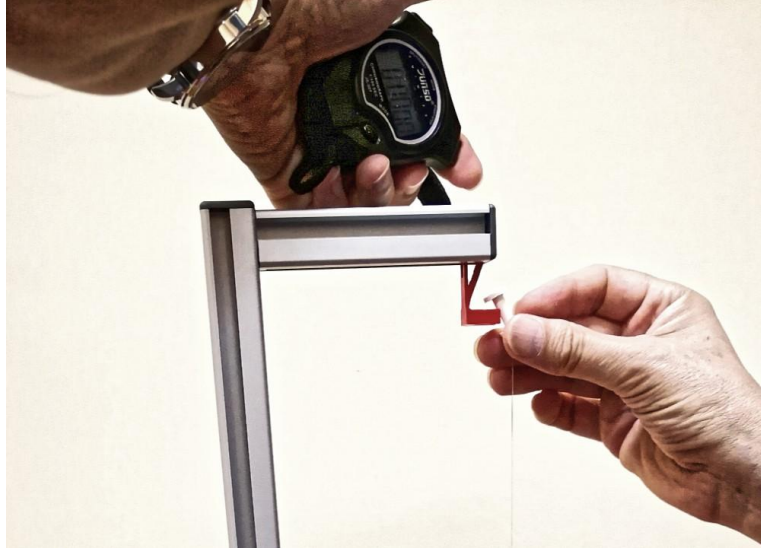
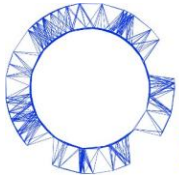


그림 4. 지지대에 실을 걸고 측정을 시작합니다.

A.3	눈금의 판독값 $P(t)$ 과 해당 판독값의 순간을 기록합니다, t 를 약 45분 동안 답안지에 제공된 표에 입력합니다.	1.0pt
A.4	늘어난 실의 길이를 측정(l)하고, 그에 해당하는 불확실성. 답안지에 l 의 측정 값과 그 불확실성.	0.3pt

파트 B: 늘어난 실의 직경 측정(1.5점)

레이저를 직접 쳐다보지 마세요! 사용하지 않을 때는 레이저 포인터를 꺼야 합니다. 회절 패턴을 얻는 데 어려움이 있는 경우 새 레이저를 요청하세요.

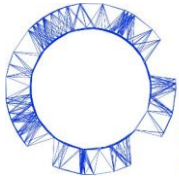
이 부분에서는 광 회절을 사용하여 폴리머 직경을 측정합니다. 공칭 늘어나지 않은 실의 직경은 0.. 아시다시피 직사각형의 회절 패턴은 너비의 슬릿(d)은 슬릿 너비와 직경이 같은 원통형 물체()의 슬릿 너비와 유사합니다. 원거리(프라운호퍼) 영역에서 물체의 직경보다 훨씬 큰 거리에 배치된 타겟 스크린에서 회절 패턴이 관찰되는 경우, 작은 각도의 회절 최소값 사이의 거리는 슬릿과 물체 모두에 대해 동일하며 다음과 같이 주어집니다.

$$d \sin \theta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (10)$$

여기서 θ 은 회절 각도입니다.

파장 $\lambda = 650 \pm 10 \text{ nm}$ 의 레이저 광을 사용합니다. 이 부분을 수행하려면 다음과 같이 진행하세요:

1. 스프링 클램프를 사용하여 레이저를 켭니다(그림 5 참조).
2. 레이저가 늘어난 실에 직접 닿도록 레이저를 배치합니다.



3. 주어진 자료를 사용하여 회절 패턴을 종이 스크린에 투사하고 식 (10)을 사용하여 실의 직경을 결정하는 데 필요한 데이터를 측정하는 방법을 고안합니다.



그림 5. 스프링 클램프를 사용하여 레이저 커기.

B.1	답안지에 자신의 방법을 스케치합니다.	0.6pt
B.2	스레드와 투영된 회절 사이의 광학 거리(D)를 측정합니다. 패턴을 확인합니다. 답안지에 해당 패턴을 예상치와 함께 적습니다.	0.3pt
B.3	평균 거리를 결정합니다 회절 최소값과 회절 최대값 사이에는 tainty. 불확실성의 추정치와 함께 답안지에 적습니다.	0.3pt
B.4	방정식 (10)을 회절 데이터에 적용하여, 직경(d)을 구합니다. 늘어난 폴리머 실과 그 불확실성. 그 불확실성의 추정치와 함께 답안지에 적으십시오.	0.3pt

파트 C: 새 스레드로 변경하기(0.3점)

데이터 분석(파트 D)을 진행하기 전에 더 짧은 나사산(파트 E)으로 측정을 위한 설정을 준비해야 합니다.

긴 나사산에서 매스 세트를 분리하고(나사를 풀고) 짧은 나사산의 자유 끝으로 옮깁니다(구멍을 통해 나사산을 삽입하고 나사산으로 고정합니다, 그림 6 참조).

구멍을 통해 실을 삽입할 수 없는 경우 도움을 요청하세요.

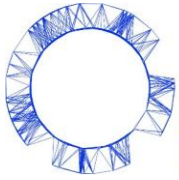


그림 6. 고정 나사에 TPU 나사산 장착하기.

- C.1** A.1에서와 같이 실의 길이(l)를 측정합니다. 답안지에 적습니다.
의 불확실성을 추정합니다.

0.3pt

이 새 실을 상단 지지대에 걸어서 질량이 일정한 ~~응력~~ σ 을 가할 수 있도록 합니다. 실은 결국 고정 변형률에 도달할 것입니다.
에 도달하게 됩니다(최소 30분 동안 중단해야 합니다).

파트 D: 데이터 분석(5.7점)

참고: 리스본의 중력 가속도는 $g=9.80 \text{ ms}^{-2}$ 입니다.

- D.1** 모든 데이터 포인트에 대해 스프레드 시트에 가해지는 힘(Γ , gf)을 계산하고 상관 관계를 채웁니다.
스펀딩 컬럼은 A.3에 사용된 표에 있습니다.

0.3pt

- D.2** 제공된 그래프 용지에 $\Gamma(t)$ 를 플롯하십시오.

0.4pt

저울 플랫폼이 움직이지 않기 때문에 측정값을 일정하게 고려할 수 있습니다.
식 (9)를 사용할 수 있습니다. 비율 σ_e 은 $\sigma_e = \beta \Gamma$ 으로 쓸 수 있으며, 여기서 β 은 상수입니다. 따라서

변형 및

$$\sigma_e = \beta \Gamma(t) = E_0 + E_1 e^{-t/\tau_1} + E_2 e^{-t/\tau_2} + E_3 e^{-t/\tau_3} + \dots \quad (11)$$

$\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 > \dots$ 의 합계가 주문된 곳입니다(편의를 위해 $\tau(1)$ (2) (3)).

- D.3** 상수 변형률(ϵ)과 그에 따른 불확실성을 결정합니다. 작성
를 답안지에 적어 불확실성을 추정합니다.

0.3pt

- D.4** 답안지(없음). σ SI 단위로, Γ 을 gf 단위로 사용하여 β 계수를 계산합니다. 이를

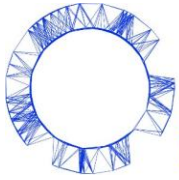
0.3pt

- D.5** D.2에 사용된 그래프의 데이터를 보세요. 순전히
탄성 과정. 순수 탄성인 경우 $\Gamma(t)$ 에 대해 예상되는 값을 답안지에 제공된 그래프 용지에
정성적으로 스케치하세요.

0.4pt

$\Gamma(t)$ 대신 σ 를 고려하면 데이터 분석이 더 쉬워집니다. 즉, 릴렉스 매개변수
를 연속적으로 추출할 수 있습니다. 이를 위해 시간 도함수인

$\frac{d\Gamma}{dt}$ 는 다음과
같아야 합니다.



모든 지점에서 계산됩니다. 이 작업은 그래픽 또는 수치로 수행할 수 있습니다. 데이터 집합에서 $(t_{(1)}, f_1), (t_{(2)}, f_2), (t_{(3)}, f_3), \dots$, 데이터 포인트는 동일한 간격으로 취해지며, 함수 $f(t)$ 의 미분 값은 다음과 같습니다. 점 t_i 이 있는 간단한 경우 대략 다음과 같이 주어집니다.

$$\frac{df}{dt} \bigg|_{t_i} = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta t} \quad i = 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

여기서 h 는 점 사이의 (일정한) 간격이고 N 는 점의 수입니다.

데이터 포인트 사이의 간격이 같지 않은 경우 미분값의 수치는 대략 다음과 같이 주어집니다:

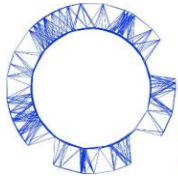
$$\frac{df}{dt} \bigg|_{t_i} = \frac{h_{+}^2 f_{i+1} - h_{-}^2 f_{i-1} + h_{+} h_{-} (f_{i+1} - f_{i-1})}{h_{+}^2 + h_{-}^2} \quad i = 2, \dots, N-1 \quad (13)$$

where $h_{+} = (t_{i+1} - t_i)$ 및 $h_{-} = (t_i - t_{i-1})$ 와 N 는 데이터 포인트의 수입니다. 이 표현식은 역 시간 간격으로 가중치를 부여한 왼쪽과 오른쪽의 평균 도함수를 나타냅니다.

데이터를 분석하고 관련 파라미터를 추출하려면 일련의 단계를 따라야 합니다. 따라서 방정식 (11)의 정렬된 합이 주어지면 다음을 수행합니다:

D.6	데이터 집합이 τ_2 보다 오래 지속된다고 가정하고 다음을 계산합니다. 파생, $\frac{d\Gamma}{dt}$ 의 데이터 포인트에 대한 값을 $t > 1000$ 초에 등록합니다. 사용된 테이블은 A.3 . 계산을 위해 그래픽 방법을 사용하는 경우 $\frac{d\Gamma}{dt}$ 를 그래프 제공된 용지입니다.	0.5pt
D.7	답지에 다음 중 예상되는 시간 종속성에 대한 식을 작성하십시오. $\frac{d\Gamma}{dt}$ 단일 점탄성 공정의 경우.	0.3pt
D.8	그래픽 방법을 사용하여 SI 단위로 E_1 및 τ_1 매개 변수를 추출합니다. D.6 에 참조된 데이터 포인트. 답안지에 E 및 τ 를 작성하십시오(불확실성 없음 필수).	1.0pt
D.9	D.6 에 참조된 데이터 포인트에서 SI 단위로 E 파라미터를 추출합니다. Write 답안지에 적습니다(없음).	0.3pt
D.10	A.3 에서 사용한 표의 $y(t)$ 열을 탄성체와 최장 길이를 빼서 채웁니다. 의 점탄성 성분 $\Gamma(t)$ (D.6 에서 사용되는 포인트는 다음과 같을 필요가 없습니다. 여기에서 고려).	0.3pt
D.11	그래픽 방법을 사용하여 $y(t)$ 에서 추출합니다(D.10 참조). 두 번째 점탄성 성분인 E 및 τ 을 SI 단위로 표기합니다. E 및 τ 을 답안지(없음).	1.0pt

비슷한 방식으로 점탄성 성분을 추가로 추출할 수 있습니다.



D.12	세 번째 구성 요소와 관련된 시간 창 $[t_i, t_f]$ 을 식별합니다. t_i 를 답안지에 입력합니다(없음).	t_i	t_f	0.3pt
-------------	--	-------	-------	-------

D.13	D.11 의 그래프에서 SI 단위로 τ 을 추정합니다. 답안지에 적습니다. (없음).			0.3pt
-------------	---	--	--	-------

파트 E: 일정한 스트레스 조건에서 E 측정(0.6점)

파트 C에서 일시 중단된 더 짧은 스톱으로 돌아가서 스톱이 일시 중단된 후 최소 30분이 지났는지 확인합니다. 이제 이 스톱이 스트레인의 정지 값인 ϵ .

$$\epsilon = \sigma/E$$

E.1	늘어난 실의 길이에서 직접 E 을 결정합니다. 에 적습니다. 얻은 값 E 과의 상대적 차이와 함께 답안지를 표시합니다. 의 파트 D (없음)에 있습니다.	0	0.6pt
------------	--	---	-------