

LED의 색

발광 다이오드(light-emitting diode, LED)는 순방향으로 전류가 흐를 때 빛을 방출하는 반도체 소자이다. p-n 접합을 가로질러 전류가 흐르면 전자와 정공이 충돌하여 재결합하고, 반도체의 띠폭(bandgap) 폭과 같은 에너지 E_g 를 방출한다. 띠폭은 이상적인 결정 안에서 전자가 점유할 수 없는 에너지 범위이다. 그 폭은 결정의 전기적·광학적 성질을 결정한다. 따라서 LED의 방출 스펙트럼은 비교적 좁은 선이며, 그 파장은 $\lambda = 2\pi\hbar c/E_g$ 로 주어진다. 여기서 $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 이다.

서로 다른 반도체 물질을 사용하면 띠폭 폭과 방출 파장이 다른 LED를 제작할 수 있다.

띠폭 폭 E_g 의 온도 의존성을 기술하는 다음과 같은 경험식이 있다.

$$E_g(T) = E_0 \left(1 - \frac{\alpha T^2}{\theta + T} \right), \quad (1)$$

여기서 E_0 는 0 K에서의 띠폭 폭, α 는 전자-포논 상호작용의 크기를 나타내는 상수, θ 는 디바이 온도(Debye temperature)이다.

반도체 다이오드의 전류-전압 특성은 다음과 같이 표현할 수 있다.

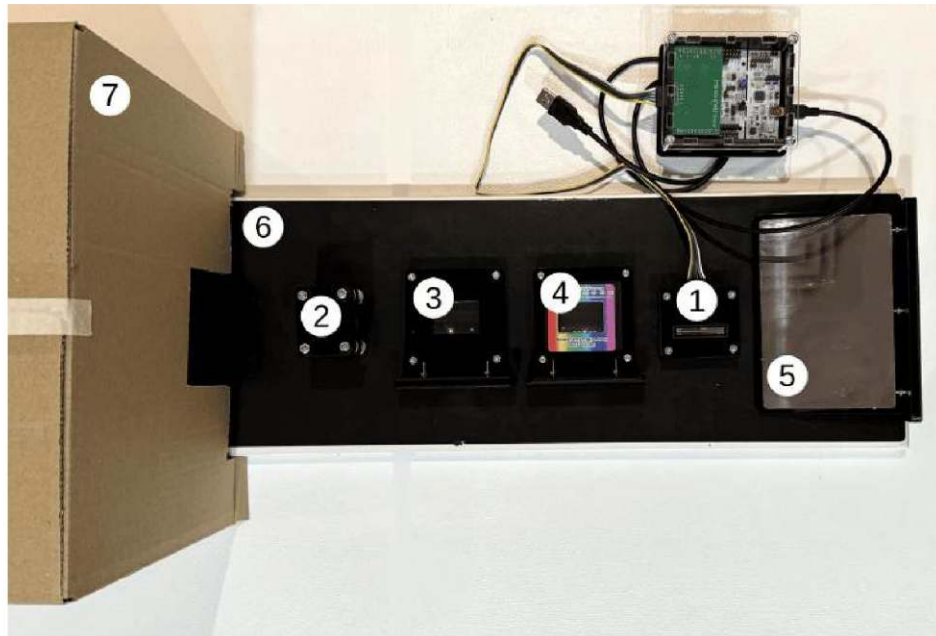
$$I(U) = I_0 \left(\exp \left[\frac{eU}{\eta k_B T} \right] - 1 \right). \quad (2)$$

이 식은 쇼클리 방정식(Shockley equation)이라 불리며, I_0 는 포화 전류, η 는 이상도 인자(ideality factor), $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ 는 볼츠만 상수, T 는 다이오드의 온도이다. 이 식에서 I_0 와 η 는 모두 온도에 의존한다.

상온은 $T_0 = 298 \text{ K}$ 이다.

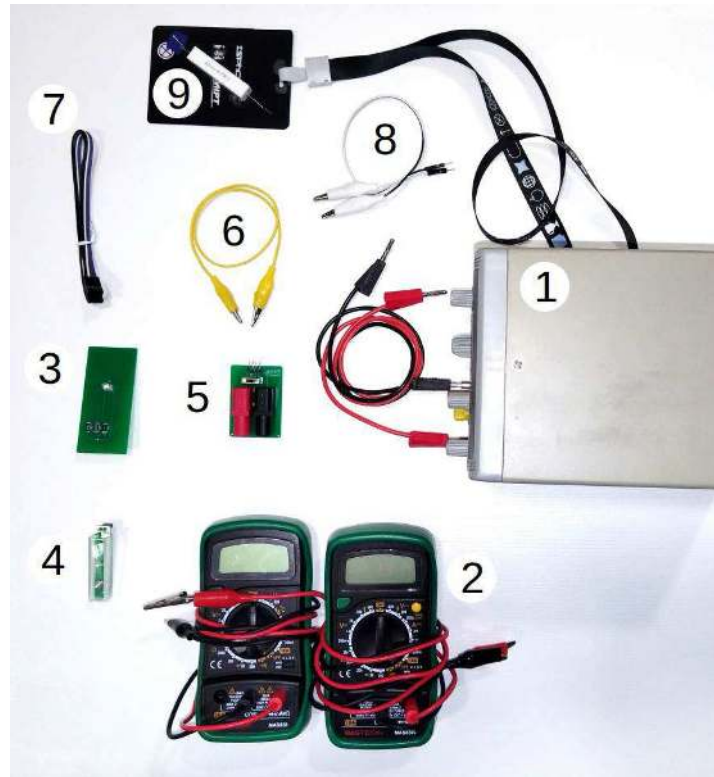
장비 (광학)

1. 컴퓨터에 연결된 감광 CCD 배열(이하 센서라 함).
2. LED 거치대(stand).
3. 렌즈 L_1 .
4. 회절격자(diffraction grating) G 가 장착되고 자석에 고정된 렌즈 L_2 .
5. 스크린.
6. 광학 테이블.
7. 미광(stray light)을 차단하기 위한 차폐막.



장비 (전기)

1. 도선이 달린 DC 전압원, 최대 15 V.
2. 도선이 달린 멀티미터 2개.
3. “RGB” LED.
4. 큐벳(cuvette)에 담긴 “MAIN” LED(예비용 두 번째 개 포함).
5. 스위치가 달린 어댑터.
6. 악어클립이 달린 연결 도선.
7. 4선 리본 케이블.
8. 2선 리본 케이블.
9. 저항 R_0 .



장비 (화학)

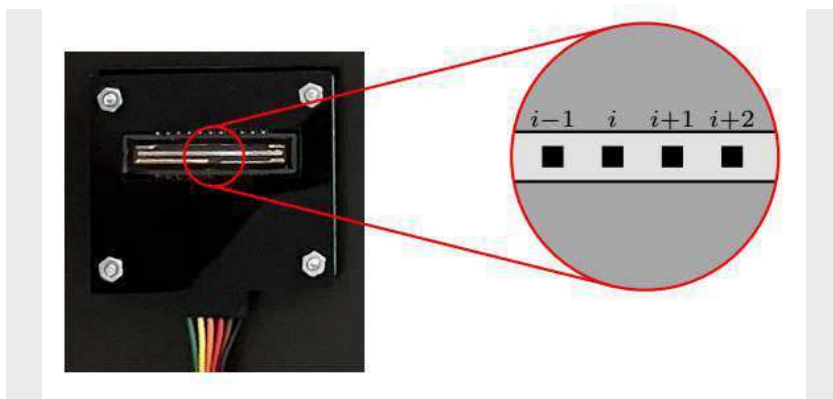
1. 액체 질소가 담긴 보온병(thermos).
2. 실에 매달린 특수 튜브.
3. 증류수가 담긴 용기.
4. 파스퇴르 피펫(Pasteur pipette).
5. 조작용 집게(clamp).
6. 페액 비커.



Part A. 보정 (0.6점)

이 부분에서는 아래에 제시된 도식에 따라 광학 장치를 조립하고 센서를 보정(calibration)해야 한다.

센서의 감광 부분은 약 3650개의 동일한 광다이오드(photodiode)로 구성되며, 이를 픽셀(pixel)이라 부른다(그림 참조). 센서 데이터를 컴퓨터로 처리한 결과, 각 픽셀의 조도(illumination intensity)가 픽셀 번호의 함수로 얻어진다. 조도는 센서에서 임의의 단위(arbitrary units)로 측정된다.



모든 실제 광원의 빛은 서로 다른 파장을 가진 연속적인 성분들로 이루어져 있으며, 이를 방출 스펙트럼(emission spectrum)이라 한다. 제시된 광학 장치를 이용하면 스펙트럼의 성분들을 공간적으로

“분리”할 수 있다. 이렇게 하면 센서의 각 픽셀에 거의 단색(monochromatic)인 빛이 입사되도록 할 수 있다. 보정이란 픽셀 번호를 그에 대응하는 파장에 대응시키는 작업이다.

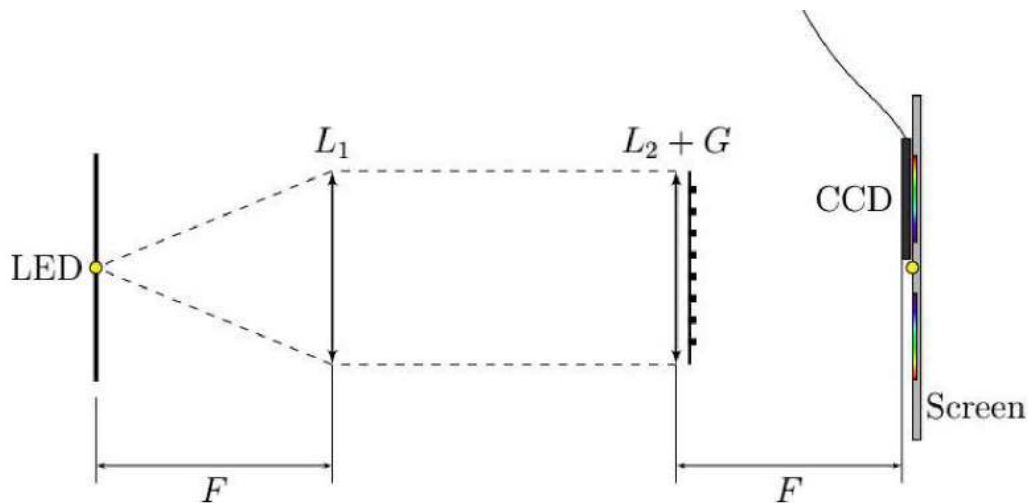
“RGB” LED가 달린 보드를 거치대의 적절한 슬롯에 끼운다. “RGB” LED의 색 전환은 제어 보드의 토글 스위치로 수행한다.

이후 “RGB” LED 보드를 “MAIN” LED가 담긴 큐벳으로 교체할 수 있다. “MAIN” LED 큐벳과 “RGB” LED 보드는 거치대 슬롯에 단단히 들어맞아야 한다. “MAIN” LED 큐벳과 “RGB” LED 보드를 빼고 끼우는 연습을 하여, 거치대가 자석 테이블 표면에 대해 움직이지 않도록 한다. 이를 위해 손으로 거치대를 테이블에 눌러도 된다.

도선은 “MAIN”과 “RGB” LED의 핀 양쪽 모두에 미리 연결되어 있어야 한다!

측정 시리즈 동안 큐벳이나 거치대를 건드리지 말 것! 광학 부품의 초기 위치를 유지하는 것이 이후 단계에 매우 중요하다!

그림에 제시된 장치를 조립하고, “RGB” LED의 각 동작 모드에 대해 올바른 특성 형태를 갖는 신뢰할 수 있는 광학 스펙트럼을 얻도록 조정한다. 각 색의 1차 회절 극대(first-order diffraction maxima)가 CCD 배열의 측정 영역에 위치해야 한다. “RGB” LED는 렌즈 L_1 의 초점에, 스크린 면은 (회절격자가 장착된) 렌즈 L_2 의 초점에 위치해야 한다.



A.1 각 동작 모드에서 “RGB” LED의 방출 스펙트럼을 측정하라. 이를 위해 프로그램의 **Sin-
gle spectrum** 기능을 사용한다. **0.3점**

스펙트럼 파일을 A1 폴더에 저장하고 색에 따라 다음과 같이 이름을 붙인다:
R.csv(빨강), G.csv(초록), B.csv(파랑).

A.2 저장한 각 스펙트럼에 대해, LED 방출의 최대 조도에 대응하는 픽셀 번호 N 을 찾아라. **0.1점**
답으로 A2 폴더의 표 A2-ans.xlsx를 채워라.

픽셀 번호 N 을 대응하는 파장 λ 로 변환하려면 다음 식을 사용해야 한다.

$$\lambda = \text{slope} \cdot N + \text{shift}.$$

계수 값은 거치대의 위치에 의존하므로, 측정 사이에 거치대를 자석 테이블 표면 위에서 움직이는 것을 앞서 엄격히 금지한 것이다.

선형 관계 $\lambda(N)$ 의 계수를 결정하기 위해, 질문 A2에서 얻은 데이터를 이용한다. 연구한 LED의 파장은 다음과 같다.

- 빨강: 620 nm
- 초록: 520 nm
- 파랑: 460 nm

A.3 알려진 파장 값을 이용하여 slope와 shift 값을 결정하라.

0.2점

의존 관계 $\lambda(N)$ 의 그래프를 A3 폴더의 파일 A3-sol.xlsx에 저장하라.

Part B. 공기 중의 LED (5.3점)

B.1 “MAIN” LED 작업을 시작하기 전에, 전압계의 모든 측정 범위에 대하여 전압계의 내부 저항 R_V 를 측정하라.

0.1점

B1 폴더의 표 B1-sol.xlsx가 이 질문의 답이다.

주의!

전원을 회로에 연결하기 전에, LED가 타버리는 것을 막기 위해 항상 전압 손잡이를 가장 왼쪽 위치로 돌려둔다. 회로가 올바르게 조립되었는지 확신이 서지 않으면 공급 전압 $\mathcal{E} < 2.0$ V에서 시험한다.

LED를 통과하는 전류는 100 mA를 초과해서는 안 된다!

LED를 통과하는 전류가 $I > 100$ mA이면 손상될 수 있다!

전류-전압 특성 측정 권장 사항: 저전류 모드에서 다이오드의 전류-전압 특성을 측정하려면 전압계를 전류계로 사용해야 한다. 즉 내부 저항이 R_V 이고 측정값이 V 이면, 그것을 통과하는 전류는 V/R_V 이다. 고전류 모드에서 다이오드의 전압-전류 특성을 측정하려면, 전압계를 병렬로 연결한 저항 R_0 를 전류계로 사용해야 한다.

B.2 제공된 저항 R_0 의 저항값을 측정하라. 그것을 통해 100 mA의 전류가 흐를 때 양단에 걸리는 전압 $U_{100\text{mA}}$ 를 계산하고, 얻은 값을 답안지에 기록하라.

0.1점

B.3 가변 전압원을 사용하여 저전류 모드에서 “MAIN” LED의 전류-전압 특성을 측정하기 위한 전기 회로를 조립하고 답안지에 그려라. 도면에 전압계 V_1 과 V_2 를 표시하라(각각이 측정하는 전압을 그에 맞게 나타낸다).

0.3점

B.4 전류가 “MAIN” LED를 순방향으로 흐를 때, 저전류 모드에서 V_1 의 V_2 에 대한 의존성을 측정하라. 10회 측정을 수행하라. **0.6점**
B4 폴더의 표 B4-ans.xlsx가 이 질문의 답이다. V_1 과 V_2 의 단위를 표시하라.

B.5 답안지의 어느 그림이 “MAIN” LED의 올바른 극성을 나타내는지 표시하라. **0.1점**

B.6 가변 전압원을 사용하여 고전류 모드에서 “MAIN” LED의 전류-전압 특성을 측정하기 위한 전기 회로를 조립하고 답안지에 그려라. 도면에 전압계 V_1 과 V_2 를 표시하라(각각이 측정하는 전압을 그에 맞게 나타낸다). **0.3점**

B.7 전류가 “MAIN” LED를 순방향으로 흐를 때, 고전류 모드에서 V_1 의 V_2 에 대한 의존성을 측정하라. 15회 측정을 수행하라. **0.9점**
LED를 통과하는 전류는 100 mA를 초과해서는 안 된다!
B7 폴더의 표 B7-ans.xlsx가 이 질문의 답이다. V_1 과 V_2 의 단위를 표시하라.

B.8 두 시리즈 모두에 대해, V_1 과 V_2 의 값을 “MAIN” LED를 통과하는 전류 I (밀리암페어 단위)와 “MAIN” LED 양단의 전압 U (볼트 단위)로 변환하라. 변환 공식을 답안지에 써라. **0.4점**
답으로 B8 폴더에 표 B8-low.xlsx(저전류 모드 변환)와 B8-high.xlsx(고전류 모드 변환)를 제출하라.

B.9 얻은 의존 관계들을 하나의 표로 결합하라. “MAIN” LED의 순방향 전류-전압 특성을 그려라. 전류에는 로그 척도를 사용하라. 그래프에는 축과 물리량의 단위가 표시되어야 한다. **0.2점**
B9 폴더의 표 B9-ans.xlsx가 이 질문의 답이다.

B.10 이상도 인자 $\eta_0 = 2.0$ 과 상온 T_0 를 이용하여 $\eta_0 k_B T_0 / e$ 의 값을 수치적으로 계산하라. **0.1점**
계산한 값의 단위를 표시하라.

B.11 상온에서의 이상도 인자 η_{room} 값을 결정하라. **0.3점**
다이오드의 전류-전압 특성 형태가 (상당한 전류가 흐를 때) 발열에 의해 영향을 받을 수 있음에 유의하라. 매우 낮은 전류 영역은 LED에 의한 전자기 복사 흡수로 인해 왜곡될 수도 있다.
폴이를 반드시 문서화하라!

광학 측정으로 진행한다. “MAIN” LED 큐벳을 거치대에 넣는다. Part A에서 준비한 장치를 이용하여

“MAIN” LED의 올바른 특성 광학 스펙트럼을 얻을 수 있는지 확인한다.

스펙트럼을 얻을 수 없으면 Part A에서 설명한 조정 절차를 반복한다. 이 경우 재보정이 필요하다. Part A에서 얻은 파일들은 덮어쓸 필요가 없다.

거치대는 측정 중에 절대 움직여서는 안 됨을 기억하라!

B.12 LED를 통과하는 서로 다른 7개의 전류 I 에 대해, 1차 회절 차수에서 LED의 방출 스펙트럼을 측정하라(감도를 조정할 수 있다). 측정 시 열평형이 이루어질 때까지 기다린다(약 20초). **0.8점**

스펙트럼 파일을 B12 폴더에 저장하고 air- x .csv로 이름을 붙인다. 여기서 x 는 LED를 통과하는 전류(밀리암페어 단위)이다.

LED를 통과하는 최대 전류는 100 mA이다!

다음 단계에서는 지정된 시간 동안 일련의 측정을 수행해야 한다. 이를 위해 **Time Series** 모드를 사용해야 하며, 이는 **Launch** 버튼을 누른 후에만 활성화된다. 기록을 멈추려면 **Pause** 버튼을 누른다. 결과를 파일로 저장하려면 **Save time series**를 누른다.

저장된 파일은 스펙트럼 극대의 파장과 같이 시간에 따라 변하는 양을 분석하는 데 사용할 수 있다.

B.13 LED를 전원에 연결하고 최대 전류 $I = 100 \text{ mA}$ 가 LED를 통과하도록 회로를 조정한다. 그런 다음 **조정 설정을 바꾸지 않고** LED를 전원에서 분리하여 상온까지 식을 때까지 기다린다(약 2분). Time Series 모드를 시작한다. LED를 빠르게 다시 전원에 연결하고 열평형에 도달할 때까지 스펙트럼을 기록한다. 이렇게 하여 공기 중에서 가열되는 동안 LED 스펙트럼의 시간 의존성을 얻는다. **0.8점**

B13 폴더의 파일 air-TS.csv가 이 질문의 답이다.

측정을 완료한 후 큐벳을 건드리지 말 것!

B.14 B13에서 측정한 데이터를 이용하여, LED가 회로에서 전류와 함께 켜진 이후 경과한 시간 t 에 대한 파장 λ 의 의존성을 얻어라. 얻은 의존성을 그래프로 그려라. **0.3점**

B14 폴더의 표 B14-ans.xlsx가 이 질문의 답이다.

폴이를 반드시 문서화하라!

Part C. 물 속의 LED (3.5점)

피펫을 사용하여 “MAIN” LED 큐벳을 증류수로 조심스럽게 채운다. 이때 거치대를 움직이지 않도록 한다.

C.1 증류수 속에서 고전류 모드로 “MAIN” LED의 전류-전압 특성을 측정하기 위한 전기 회로를 조립하라. 전류가 “MAIN” LED를 순방향으로 흐를 때 V_1 의 V_2 에 대한 의존성을 측정하라. 15회 측정을 수행하라.
C1 폴더의 표 C1-ans.xlsx가 이 질문의 답이다. V_1 과 V_2 의 단위를 표시하라. **0.9점**

C.2 C1에서 측정한 시리즈에 대해, V_1 과 V_2 의 값을 “MAIN” LED를 통과하는 전류 I (밀리암페어 단위)와 “MAIN” LED 양단의 전압 U (볼트 단위)로 변환하라. 변환 공식을 답안지에 써라.
C2 폴더의 표 C2-ans.xlsx가 이 질문의 답이다. **0.2점**

물 속과 공기 중에서 LED의 전류-전압 특성은 고전류 모드에서만 차이가 난다.

C.3 같은 그래프에 공기 중(B9 참조)과 물 속(C2 참조)에서 LED의 전류-전압 특성을 그려라. 전류에는 로그 척도를 사용하라. 그래프에는 축과 물리량의 단위가 표시되어야 한다.
C3 폴더의 표 C3-ans.xlsx가 이 질문의 답이다. **0.5점**

C.4 LED를 통과하는 서로 다른 7개의 전류 I 에 대해 LED의 방출 스펙트럼을 측정하라(감도를 조정할 수 있다). 측정 시 열평형이 이루어질 때까지 기다린다(약 10초).
스펙트럼 파일을 C4 폴더에 저장하고 water- x .csv로 이름을 붙인다. 여기서 x 는 LED를 통과하는 전류(밀리암페어 단위)이다.
알림: LED를 통과하는 최대 전류는 100 mA이다! **0.8점**

C.5 LED를 전원에 연결하고 전류 $I = 100 \text{ mA}$ 가 LED를 통과하도록 회로를 조정한다. 그런 다음 **조정 설정을 바꾸지 않고** LED를 전원에서 분리하여 상온까지 식을 때까지 기다린다(약 2분).
Time Series 모드를 시작한다. LED를 빠르게 다시 전원에 연결하고 열평형에 도달할 때까지 스펙트럼을 기록한다. 이렇게 하여 가열되는 동안 LED 스펙트럼의 시간 의존성을 얻는다.
C5 폴더의 측정 결과 파일 water-TS.csv가 이 질문의 답이다. **0.8점**

C.6 C5에서 측정한 데이터를 이용하여 시간 t 에 대한 파장 λ 의 의존성을 얻어라.
C6 폴더의 표 C6-ans.xlsx가 이 질문의 답이다.
폴이를 반드시 문서화하라! **0.3점**

Part D. 액체 질소 속의 LED (6.1점)

이 부분에서는 액체 질소($T_{N_2} = 77 \text{ K}$)를 사용하여 큐벳과 그 내용물을 냉각해야 하므로, 다음 지침을 주의 깊게 읽는 것이 필수적이다.

제공된 보온병은 테이블에 고정되어 있다. **보온병을 들거나, 기울이거나, 고정 장치를 건드리려 하지 말 것.** 액체 질소에 접근하려면 끈에 매달린 특수 튜브를 사용하여 소량의 액체를 떠낸다. 특수 튜브를 잡을 때는 **집게를 사용한다.**

따뜻한 물체를 액체 질소에 갑자기 담그지 말 것 — 격렬한 끓음이 발생한다. 튜브를 액체 질소가 든 보온병에 내린 후, 냉각되도록 잠시 기다린 다음 꺼낸다. **액체 질소가 담긴 용기를 몸 위로 옮기지 말고, 피부·옷·신발에 액체 질소를 흘리지 않도록 한다.**

이 부분의 측정 동안에는 큐벳 안의 액체 질소 수위를 감시하고 주기적으로 보충해야 한다. LED는 항상 액체 질소에 완전히 잠겨 있어야 한다.

큐벳을 거치대에서 조심스럽게 빼낸다(변위를 최소화하거나 없도록 한다). 큐벳의 물을 따라 버린 다음 조심스럽게 다시 끼운다. LED의 위치가 여전히 약간 이동할 수 있으므로, 이후 데이터 처리에서 이를 고려해야 함에 유의하라.

액체 질소로 측정할 때는, **항상 큐벳 앞면을 닦아** 성에(frost)를 제거한다(손가락을 사용해도 된다). 소량의 성에라도 측정을 크게 왜곡할 수 있다.

D.1 약 1 mA의 전류가 흐를 때 공기 중에서 LED의 스펙트럼을 측정하라.

0.1점

D1 폴더의 파일 D1-ans.csv가 이 질문의 답이다.

우리는 파장 값의 상대적 변화에만 관심이 있으므로 재보정은 필요하지 않다.

특수 튜브를 사용하여 “MAIN” LED가 든 큐벳에 액체 질소를 부을 수 있다.

D.2 조절 가능한 전압원을 사용하여 저전류 모드에서 “MAIN” LED의 전류-전압 특성을 측정하기 위한 전기 회로를 조립하라.

0.6점

“MAIN” LED가 액체 질소에 잠긴 상태에서, 전류가 순방향으로 흐를 때 V_1 의 V_2 에 대한 의존성을 측정하라. 10회 측정을 수행하라.

D2 폴더의 표 D2-ans.xlsx가 이 질문의 답이다. V_1 과 V_2 의 단위를 모두 명시하라.

D.3 조절 가능한 전압원을 사용하여 고전류 모드에서 “MAIN” LED의 전류-전압 특성을 측정하기 위한 전기 회로를 조립하라.

0.9점

“MAIN” LED가 액체 질소에 잠긴 상태에서, 전류가 순방향으로 흐를 때 V_1 의 V_2 에 대한 의존성을 측정하라. 15회 측정을 수행하라.

예상 출력은 D3 폴더의 표 D3-ans.xlsx이다. V_1 과 V_2 의 단위를 모두 명시하라.

D.4 D2-D3 절에서 측정한 두 의존성 모두에 대해, V_1 과 V_2 의 값을 “MAIN” LED를 통과하는 전류 I (밀리암페어 단위)와 “MAIN” LED 양단의 전압 U (볼트 단위)로 변환하라. **0.2점**

D4 폴더의 표 D4-low.xlsx(저전류 모드 변환)와 D4-high.xlsx(고전류 모드 변환)가 이 질문의 답이다.

D.5 앞 질문에서 얻은 $I(U)$ 의존성들을 하나의 표로 결합하라. 액체 질소 온도에서 “MAIN” LED의 순방향 전류-전압 특성을 그려라. 전류에는 로그 척도를 사용하라. 그래프에는 단위가 표시된 축이 포함되어야 한다. **0.2점**

D5 폴더의 표 D5-ans.xlsx가 이 질문의 답이다.

D.6 액체 질소 온도에서의 이상도 인자 η_{N2} 값을 결정하라. **0.3점**
모든 계산을 포함하여 완전한 풀이를 문서화하라!

D.7 다이오드를 통과하는 서로 다른 7개의 전류 값 I 에 대해 LED의 방출 스펙트럼을 측정하라(감도를 조정할 수 있다). 각 측정 전에 열평형이 이루어지도록 약 10초를 기다려라. **1.0점**

측정 동안 큐벳 안의 액체 질소 수위를 감시하고 주기적으로 보충하라.

액체 질소가 채워진 큐벳의 바깥 표면에 응결과 결빙이 발생한다. 이 얼음과 물의 층은 스펙트럼 측정에 영향을 준다. 손으로 규칙적이고 신속하게 이를 제거할 것을 기억하라.

답은 D7 폴더의 측정 파일들로 구성된다. 파일 이름을 N2- x .csv로 붙이되, x 는 LED 전류(밀리암페어 단위)를 나타낸다.

D.8 D7 절에서 저장한 각 스펙트럼에 대해, LED의 최대 방출 조도에 대응하는 파장 λ 를 결정하라. **0.5점**

D8 폴더의 표 D8-ans.xlsx가 이 질문의 답이다.

거치대 변위로 인해 공기 중 LED에 대해 파장 이동 λ 가 발생할 수 있음에 유의하라. 이를 D7 절의 모든 측정에 적용되는 일정한 파장 이동으로 처리하라.

D.9 서로 다른 조건(공기 중, 물 속, 액체 질소 속)에서의 세 가지 $\lambda(I)$ 의존성을 모두 하나의 그래프에 그려라. **1.0점**

D9 폴더의 표 D9-ans.xlsx가 이 질문의 답이다.

스펙트럼 피크 파장의 이동은 전류가 흐를 때 LED 접합의 발열과 직접적으로 상관관계가 있다.

D.10 D9 절의 그래프를 $I = 0$ 으로 외삽하여, 온도 T_{N_2} 에서의 스펙트럼 피크 파장 λ_{N_2} 와 온도 T_0 에서의 스펙트럼 피크 파장 λ_{room} 을 결정하라. **0.6점**

D.11 D10 절의 결과와 락의 온도 의존성에 대한 이론식 (1)을 이용하여, 매개변수 E_0 와 α 의 값을 결정하라.
디바이 온도 θ 의 값은 500 K이다. **0.7점**

Part E. 열량 측정 매개변수 계산 (3.1점)

상온 T_0 부근에서, 식 (1)은 다음과 같이 선형 형태로 근사할 수 있다.

$$\lambda(T) = \lambda_{\text{room}} - \chi \cdot (T - T_0).$$

E.1 χ 에 대한 표현식을 쓰고 그 값을 계산하라. **0.5점**

열역학적 평형의 성립은 LED로부터 온도 T_0 의 외부 환경으로의 열전달과 관련된다.

$$UI = \kappa(T - T_0)$$

여기서 U 와 I 는 각각 LED 양단의 전압과 LED를 통과하는 전류이고, κ 는 유효 열손실 계수이다.

E.2 공기 중과 물 속에서 유효 열손실 계수의 비 $\kappa^{\text{air}}/\kappa^{\text{water}}$ 를 결정하라. **0.5점**

LED가 처음에 상온 T_0 에 있고 전류가 갑자기 흐르기 시작하면, 열평형에 도달할 때까지 가열되기 시작한다. 이 동역학은 다음 방정식으로 기술할 수 있다.

$$C dT = \kappa(T_{\infty} - T) dt,$$

여기서 C 는 환경 속 LED의 유효 열용량(환경에 의존할 수 있음)이고, T_{∞} 는 열평형 모드에서 LED의 온도이다.

E.3 LED가 켜진 이후 시간 t 의 함수로서 LED 온도 T 에 대한 표현식을 유도하라. **0.3점**
답을 $\kappa, C, T_0, T_{\infty}$ 로 표현하라.

E.4 B13과 C6 절에서 얻은 데이터를 이용하여, 각 가열 과정에 대해 시간 t 에 대한 LED 온도 T 의 의존성을 유도하라. **1.0점**
이 질문의 답은 E4 폴더의 표 E4-air.xlsx와 E4-water.xlsx로 구성된다.

E.5 E4 절에서 얻은 의존성을 선형화하고 선형 그래프를 그려라. **0.5점**
하나는 공기, 다른 하나는 물에 대한 두 개의 그래프를 담은 폴더 E5의 표 E5.xlsx가 이 질문의 답이다. 그래프에는 라벨이 붙어야 한다.

E.6 공기 중과 물 속에서 각각 LED의 유효 열용량의 비 $C^{\text{air}}/C^{\text{water}}$ 를 결정하라.

0.3점

Part F. 포화 전류의 온도 의존성 (1.4점)

앞 절에서 우리는 LED 방출 스펙트럼의 온도 의존성을 이용하여 열량 측정 매개변수를 결정하였다. 이제 LED의 전류-전압 특성에 대한 온도의 영향을 조사하고자 한다. Part B-D에서 우리는 LED의 전류-전압 특성이 (p-n 접합 온도가 고정된 상태의) 쇼클리 방정식에서 고전류에서 벗어나며, 이것이 발열과 관련됨을 관찰하였다.

얼은 데이터는 I_0 의 온도 의존성을 결정하는 데 사용할 수 있다. 여기서는 이상도 인자 η 의 온도 의존성을 무시한다.

F.1 Part B의 결과를 이용하여, 공기 중 측정에 대해 온도 T 에 대한 $\ln(I_0/\text{mA})$ 의 의존성을 결정하라.

0.6점

답으로 F1 폴더의 표 F1-ans.xlsx를 채우고 이 의존성의 그래프를 그려라.

F.2 Part C의 결과를 이용하여, 물 속 측정에 대해 온도 T 에 대한 $\ln(I_0/\text{mA})$ 의 의존성을 결정하라.

0.6점

답으로 F2 폴더의 표 F2-ans.xlsx를 채우고 이 의존성의 그래프를 그려라.

F.3 온도가 10 K 증가할 때 전류 I_0 는 몇 배로 변하는가?

0.2점