1차원 구조에서 반사된 빛의 회절 무늬 (총 배점: 12)

서론

이 실험은 나노 구조를 가진 셀렌화 아연(ZnSe) 표면에서 반사된 고에너지 전자 회절 현상이 최근 발견된 것에 바탕을 둔다. 이 표면은 나노 규모의 1차원(1D) 불균일 변조를 가질 뿐 아니라, 그 1차원 나노 구조의 방향을 따라 주기적인 원자 격자 간격도 가진다 (*Nanotechnology*, 20 (21), 215607(2009)). 그림 1은 Au 층으로 덮인 나노 구조 ZnSe 표면의 단면 이미지이며, 삽입 그림은 Au 덮개가 없는 표면의 이미지이다.

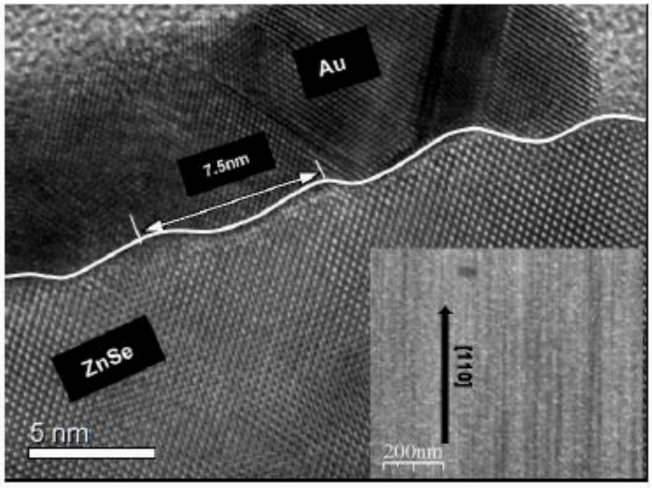


그림 1: Au 층으로 덮인 나노 구조 ZnSe 표면의 단면 이미지이며, 삽입 그림은 Au 덮개가 없는 표면의 이미지이다.

목표

이 실험에서는 마이크로미터 규모의 1차원 구조를 가진 시료에 대해 이 현상의 광학적 유사물을 탐구한다.

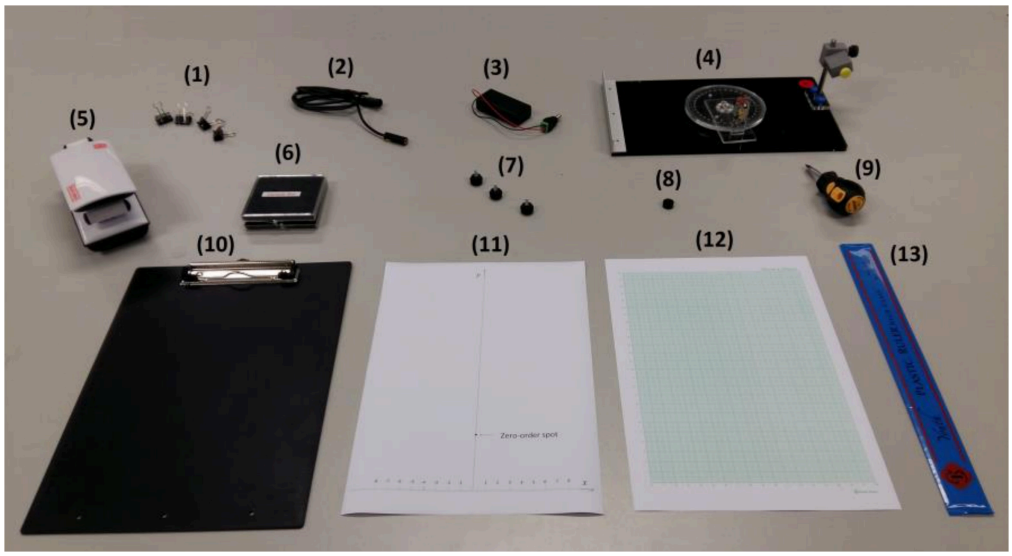


그림 2: 이 실험에 쓰는 장치와 도구

장치와 도구 목록

[1]	종이 클립 4개
[2]	레이저 다이오드
[3]	on/off 스위치가 달린 배터리 팩
[4]	회전 원판, 각도 눈금, 레이저 다이오드 홀더가 있는 광학 플랫폼
[5]	LED 램프
[6]	시료 1~5가 들어 있는 시료 상자
[7]	관측판용 나사 3개
[8]	핀홀
[9]	일자 드라이버
[10]	관측판
[11]	정렬 용지
[12]	모눈종이
[13]	30 cm 자

주요 장치와 도구 사진



그림 3: 관측판

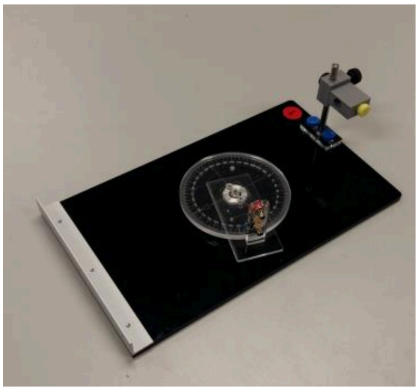


그림 4: 회전 원판, 각도 눈금, 레이저 다이오드 홀더가 있는 광학 플랫폼



그림 5: 핀홀



그림 6: 파장 650 nm, 출력 0.5 mW의 레이저 다이오드(Class II).



그림 7: 1~5로 이름 붙인 시료가 들어 있는 시료 상자

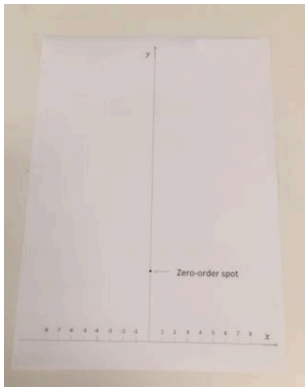


그림 8: 정렬 용지

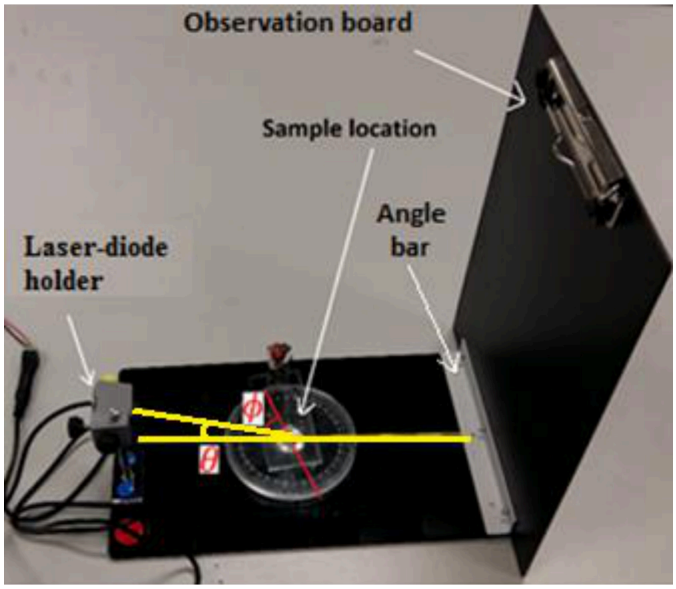


그림 9: 이 실험에서 쓰는 장치. 관측판, 시험할 시료, 회전 원판이 있는 광학 플랫폼, 레이저 다이오드를 어떻게 조립해야 하는지 보여 준다. 각 ϕ 는 시료의 회전각이다. 각 θ 는 시료 표면에 대한 레이저 빔의 입사각이다.

시료 상자 안 물품에 대한 추가 설명

- 이 실험에 쓰는 모든 시료는 1.5 cm × 1.5 cm 크기의 정사각형이다. 모두 각 시료 홀더의 한쪽에 1부터 5까지 이름이 붙어 있다.
- 모든 시료 홀더는 2.0 cm × 2.0 cm 크기이며, 한 변의 중앙 근처에 삼각형으로 새긴 기준점이 있다.
- 각 시료를 회전 원판의 중심에 놓기 전에, 회전 원판 위 화살표의 끝이 각도 눈금의 0° 표시를 가리키는지 확인해야 한다. 새 시료를 놓을 때는 플랫폼의 회전 원판 위 정사각형 표시에 맞추도록 하여라. $\phi = 0°$ 에서의 시료 위치(시료 2~5에만 해당)는 기준점이 각도 눈금의 0° 표시와 맞추어져 그쪽을 향할 때로 정의한다.

시료	시료 설명
1	평면 거울.
2	두 변과 나란한 직선 긁힘 홈이 불균일한 간격으로 나 있는 강판.
3	이웃한 홈 사이의 간격이 격자 상수 a 인 규칙적인 격자.
4	시료 2와 비슷하지만, 불균일한 간격의 긁힘 홈이 회전 원판 각도 눈금의 0° 와 180° 표시를 잇는 선에 대해 ϕ^* 의 각을 이룬다.
5	불균일한 간격의 직선 긁힘 홈뿐 아니라, 이웃 간격이 b 로 같은 미리 만든 홈도 있는 강판. 이 미리 만든 홈은 불균일한 간격의 직선 긁힘 홈과 수직으로 놓여 있다.

안전 주의 사항과 일반 조언

1. **주의: 레이저 빔을 직접 들여다보지 말 것!!**
2. 배터리가 쓸데없이 닳지 않도록 쓰지 않을 때는 레이저 다이오드를 꺼라.
3. 시료는 항상 똑바로 세워 두어라. 시료 표면에 어떤 접촉도 피하여라.
4. 시료를 옮길 때는 항상 시료 홀더의 가장자리를 손으로 잡아라.

처음 조정 / 절차

1. 그림 9에 보인 것처럼 실험 장치를 구성하여라. 관측판은 그림 10에 보인 것처럼 나사 세 개로 회전 원판에 붙일 수 있다.

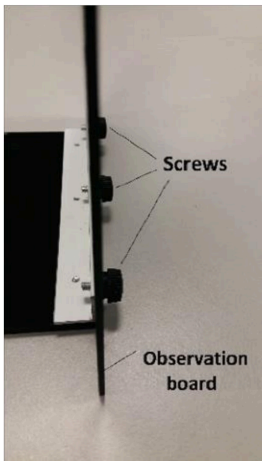


그림 10: 관측판은 나사 세 개로 회전 원판에 붙일 수 있다.

2. 레이저 다이오드를 레이저 다이오드 홀더에 장착하여라. [*참고: 레이저 다이오드를 홀더에 고정할 때 노란 나사를 너무 세게 조이지 말 것. 그렇지 않으면 레이저 다이오드가 손상될 수 있다.*]
3. 그림 11에 보인 것처럼 배터리 팩을 레이저 다이오드에 연결하여라.

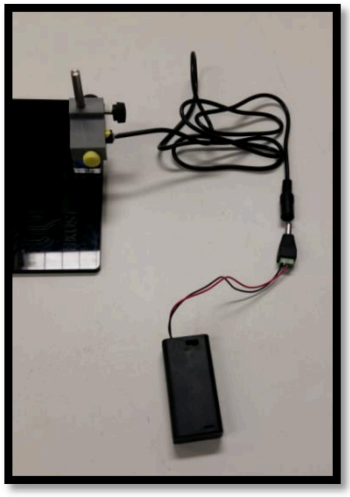


그림 11: 배터리 팩에 연결된 레이저 다이오드.

4. 관측판에 종이를 한 장 붙여 레이저 다이오드가 내는 빛을 관찰한 뒤, 일자 드라이버로 레이저 다이오드의 조리개를 조절하여 지름이 약 1 mm 인 빔 점을 얻어라.

5. 레이저 다이오드의 머리가 홀더 밖으로 약 5~10 mm 나오도록 레이저 다이오드를 레이저 다이오드 홀더에 놓아라.

6. 빔 점의 크기를 더 줄일 수 있도록, 그림 12에 보인 것처럼 제공된 핀홀을 레이저 다이오드에 붙여라.

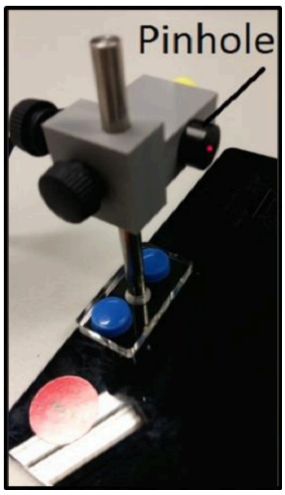


그림 12: 핀홀을 붙인 레이저 다이오드.

7. **이 실험에서는 레이저 빔의 수평 투영이 각도 눈금의 0° 와 180° 표시와 맞추어져야 하고, 레이저 빔이 연구 대상 시료의 중심에 맞아야 한다. 이는 그림 13에 보인 나사들로 레이저 다이오드 홀더의 위치와 기울기 각을 조절하여 이룰 수 있다.**

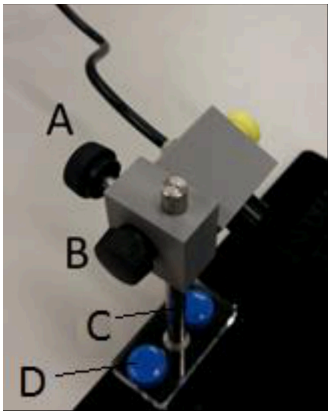


그림 13: 레이저 다이오드 홀더의 위치와 기울기 각은 표시된 나사들로 조절할 수 있다. 나사 'A' 는 레이저 빔의 높이를 바꾸고, 나사 'B' 는 레이저 빔을 기울이며, 나사 'C' 와 'D' 는 레이저 다이오드 홀더를 수평으로 조절한다.

실험

A 부분: 장치의 정렬

그림 9에 바탕을 두고 실험 장치를 구성하여라. 관측판과 회전 원판 중심 사이의 거리 D 는 15 cm 로 고정되어 있음에 유의하여라. 시료 상자 안 물품에 대한 추가 설명(3쪽)에 기술된 절차에 따라 시료 1을 회전 원판의 중심에 놓아라. 정렬 용지를 관측판에 붙이되, x 축이 관측판을 잡고 있는 각도 막대의 윗변과 맞도록 하여라(표시된 x 축 아래 부분을 뒤로 접으면 된다). x 축을 이렇게 정의하는 까닭은, 회전 원판 위에 놓인 모든 시료의 표면이 이 각도 막대의 윗변과 맞도록 실험 장치가 설계되었기 때문이다. 또 x 축의 원점은 각도 눈금의 180° 표시와 맞추어야 한다. 이 실험에서 레이저 빔의 입사각 θ 는 어떤 값으로 고정되어 있다. 레이저 다이오드의 높이와 기울기 각을 조절해 레이저 빔이 시료 1의 중심에 맞고, 반사된 레이저 빔의 점이 정렬 용지에 표시된 "0차 점"과 겹치도록 하여라.

과제		배점
A1	x 축의 원점에서 "0차 점"의 높이 h 를 재어라. D 와 h 로부터 레이저 빔의 입사각 θ 를 구하여라. h 의 값을 cm 단위로, θ 의 값을 도 단위로 유효 숫자 세 자리까지 답안지의 해당 표에 적어라.	**0.6**

B 부분: 시료 2에서의 회절 무늬

시료 1을 시료 2로 바꾸되, 시료 홀더의 기준점이 0° 표시와 맞추어져 그쪽을 향하도록 하여라. 이때 시료 2의 불균일한 간격의 긁힘 홈 방향은 레이저 빔의 수평 투영과 나란하다. 시료의 회전각 ϕ 는 회전 원판을 돌려 조절하고 각도 눈금에서 읽을 수 있다.

관측판에 모눈종이를 붙여라. 모눈종이의 아래쪽 축이 관측판을 잡고 있는 각도 막대의 윗변과 맞도록 하여라(아래쪽 축 밑부분을 뒤로 접으면 된다). 또 x 축의 원점은 각도 눈금의 180° 표시와 맞추어야 한다.

과제		배점
B1	회전 원판의 $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 대한 회절 무늬를 모눈종이에 기록하고, 각 무늬 옆에 해당하는 회전각 ϕ 를 적어라. 이 모눈종이의 맨 위에 "# 2" 라고 적어라.	**0.8**

C 부분: 시료 3에서의 회절 무늬

이 과제와 다음 과제의 실험은 과제 (B1)에서 관측한 회절 무늬 뒤에 있는 물리를 이해하는 데 도움이 될 것이다. 회전 원판에서 시료 2를 빼고 시료 3으로 바꾸되, 시료 홀더의 기준점이 0° 표시와 맞추어져 그쪽을 향하도록 하여라. 시료 3의 시작 위치(즉 $\phi = 0^\circ$)에서 격자선의 방향은 레이저 빔의 수평 투영과 나란하다.

관측판에 모눈종이를 붙여라. (B) 부분에 기술한 것처럼 모눈종이의 아래쪽 축이 관측판을 잡고 있는 각도 막대의 윗변과 맞도록 하여라. 또 x 축의 원점은 각도 눈금의 180° 표시와 맞추어야 한다.

과제		배점
C1	$\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 대해 시료 3의 회절 점의 중심을 모눈종이에 표시하고, 각 무늬 옆에 해당하는 회전각 ϕ 를 적어라. 이 모눈종이의 맨 위에 "# 3" 이라고 적어라.	0.8

과제 (B1)과 (C1)을 마치고 나면, 시료 2에서 반사된 회절 무늬는 연속적이지만 시료 3의 것은 불연속임을 알았을 것이다. 그 까닭은 시료 2의 이웃한 직선 긁힘 홈 사이 간격이 균일하지 않으므로, 격자 상수가 여러 값을 아우르는 격자와 같기 때문이다. 따라서 그 회절 무늬는 규칙적인 격자(시료 3과 같은)의 회절 무늬의 일반적인 모양을 따르지만, 회절 점이 넓어져서 관측된 것처럼 연속적인 무늬를 이룬다.

D 부분: 시료 3에서 반사된 회절 무늬 뒤의 이론

시료 3과 같은 규칙적인 격자에서 반사된 회절 무늬의 기원은 파동 광학으로 이해할 수 있다. 이 실험에서는 그림 14에 보인 것처럼 시료의 중심을 원점으로 하는 x-y-z 좌표계를 정의한다.

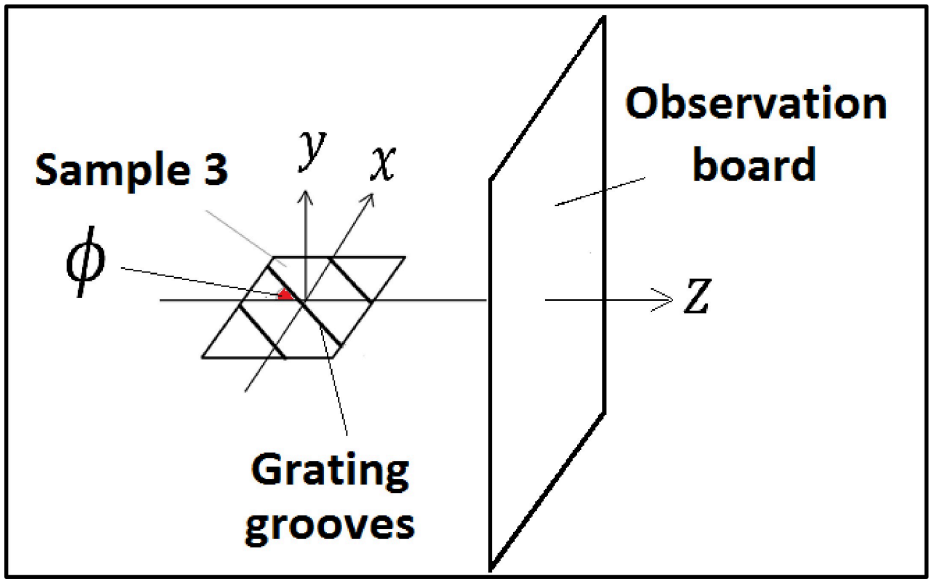


그림 14: 이 과제에서 쓰는 x-y-z 좌표계의 정의. 여기서 ϕ 는 시료의 회전각이며, 관측판은 z 축에 수직이다.

파동 광학을 쓰면 시료 3에서 반사된 회절 무늬에 대해 다음 식들을 유도할 수 있다.

$$y^2 = \frac{(D\cos\phi + x\sin\phi)^2}{\cos^2\theta\,\cos^2\phi} - x^2 - D^2 \tag{1}$$

$$x = \frac{Dm\lambda\cos\phi}{a\cos\theta - m\lambda\sin\phi}\,, \tag{2}$$

여기서 λ 는 입사 레이저 빔의 파장이고 m 은 회절 차수이다. 식 (1)과 (2)를 써서 회절 점의 x, y 좌표를 ϕ 의 함수로 예측할 수 있으며, 이는 과제 (C1)에서 기록한 관측 무늬와 일치함을 보일 수 있다.

식 (1)과 (2)에 따르면 $\phi = 90^\circ$ 에 대한 회절 점은 $x = 0$ 인 y 축 위에 놓여야 하며, 그 y 좌표는 다음 식으로 나타난다:

$$y = D\sqrt{\frac{a^2}{(a\cos\theta - m\lambda)^2} - 1} \tag{3}$$

과제		배점
D1	식 (3)은 시료 3의 격자 상수 a 에 대한 이차 방정식으로 다시 쓸 수 있다: $$Aa^2 + Ba + C = 0. \quad (4)$$ A, B, C 의 식을 유도하여라. 결과를 답안지의 해당 표에 적어라.	**0.9**

D2	이 이차 방정식을 풀고, 시료 3의 $\phi = 90^\circ$ 에서 측정한 회절 점의 y 값(과제 (C1) 참고)과 이미 알고 있는 D, θ, λ 값을 함께 써서, 1차 ($m = 1$) 부터 6차 ($m = 6$) 까지 각 회절 차수에 대해 시료 3의 격자 상수 a 를 미터 단위로 유효 숫자 세 자리까지 구하여라. [*힌트: 이 차수들은 0차 점 위에 있는 여섯 개의 점에 해당한다*]. 결과를 답안지의 해당 표에 적어라.	**1.8**
D3	격자 상수 a 의 평균값을 미터 단위로 유효 숫자 세 자리까지 계산하고 평균의 표준 오차도 계산하여라. 결과를 답안지의 해당 표에 적어라.	**0.8**

E 부분: 시료 4의 미지의 각 ϕ^* 결정

시료 3을 시료 4로 바꾸되, 시료 홀더의 기준점이 0° 표시와 맞추어져 그쪽을 향하도록 하여라. 시료 4를 회전 원판 위에 놓을 때, 기준점에 가까운 시료 홀더의 변이 레이저 빔에 수직이 되어야 한다.

관측판에 모눈종이를 붙여라. 모눈종이의 아래쪽 축이 관측판을 잡고 있는 각도 막대의 윗변과 맞도록 하여라(아래쪽 축 밑부분을 뒤로 접으면 된다). 또 x 축의 원점은 각도 눈금의 180° 표시와 맞추어야 한다.

과제		배점
E1	모눈종이에 투영된 시료 4의 연속적인 회절 곡선을 따라, $x = -1.0$ cm 에서 3.5 cm 까지 0.5 cm 간격으로 열 개 점의 y 좌표를 cm 단위로 재어라. 결과를 답안지의 해당 표에 적어라.	**0.6**
E2	(D) 부분에 주어진 식 (1)을 바탕으로 다음 꼴의 선형 방정식을 세워라. $$M(y, x, D, \theta) = I(D) + S(\phi^*)x\ . \quad (5)$$ $M(y, x, D, \theta)$, $I(D)$, $S(\phi^*)$ 의 함수 꼴을 구하여라. E1에서 기록한 자료를 써서 M 을 x 에 대해 그려라. 이 그래프로부터 미지의 각 ϕ^* 를 도 단위로 구하여라. 모든 함수 꼴과 ϕ^* 의 값을 답안지의 해당 표에 적어라.	**1.6**

F 부분: 시료 5에서의 회절 무늬

시료 4를 시료 5로 바꾸되, 시료 홀더의 기준점이 0° 표시와 맞추어져 그쪽을 향하도록 하여라. 시료 5의 기하 구조는 그림 15에 보였다. 시료 5의 시작 위치에서 불균일한 간격의 긁힘 홈 방향은 레이저 빔의 수평 투영과 나란하다.

관측판에 모눈종이를 붙여라. 모눈종이의 아래쪽 축이 관측판을 잡고 있는 각도 막대의 윗변과 맞도록 하여라(아래쪽 축 밑부분을 뒤로 접으면 된다). 또 x 축의 원점은 각도 눈금의 180° 표시와 맞추어야 한다.

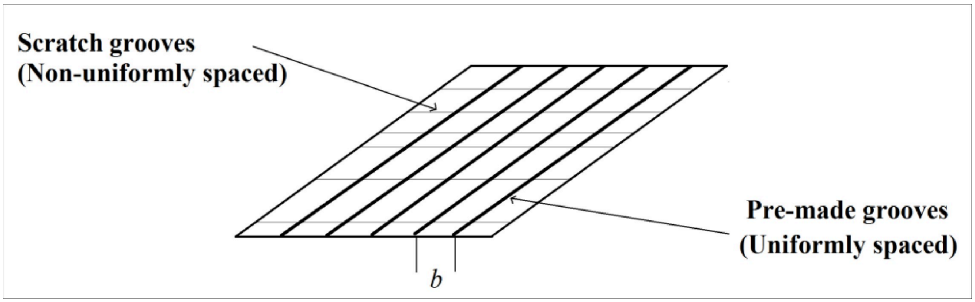


그림 15: 시료 5의 구조. 긁힘 홈은 불균일한 간격이고 미리 만든 홈은 균일한 간격이다. 미리 만든 홈 사이의 이웃 간격은 **b** 이다.

과제		배점
F1	$\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 각각에 대해 관측한 회절 무늬를 서로 다른 모눈종이에 기록하여라. 각 모눈종이의 맨 위에 '#5' 와 해당하는 ϕ 값을 적어라. 10차가 넘는 회절 차수를 관측할 수 있을 것으로 예상되지만, 각 모눈종이에는 비교적 밝은 세 차수만 기록하면 된다.	**0.8**

시료 5의 구조는 시료 2와 시료 3의 조합으로 볼 수 있으며, 균일한 간격의 미리 만든 홈이 불균일한 간격의 긁힘 홈과 수직으로 놓여 있다. 이는 서론에서 기술한 나노 격자의 광학적 유사물이다.

과제		배점
F2	이 이해를 바탕으로, 과제 (F1)에서 $\phi = 0^\circ$ 에 대해 기록한 회절 무늬를 써서 시료 5의 균일한 간격의 미리 만든 홈의 간격 b 를 미터 단위로 어림하여라. b 의 값을 답안지에 적어라. [*b 값을 어림할 때는 1차 회절의 측정 자료만 쓰면 되며, 어림한 b 는 유효 숫자 세 자리로 반올림해야 한다.*]	**1.6**

G 부분: ZnSe 의 격자면 간격 결정

서론에서 말한 것처럼 위 현상은 나노 구조 ZnSe 표면의 반사 고에너지 전자 회절(RHEED) 무늬에서 처음 발견되었다. 그런 표면은 나노 규모에서 불균일한 공간 간격을 가진 1차원(1D) 변조를 가지며, 또 이 나노 홈에 수직인 주기적 원자 격자면을 가진다. 그림 16은 전자빔이 불균일한 간격의 나노 홈에 수직일 때 그런 나노 구조 ZnSe 표면의 RHEED 무늬를 보여 준다(힌트: 주기적 원자 격자면에 대해 이런 조건은 $\phi = 0^\circ$ 에 해당한다).

이 그림에서 줄무늬의 간격은 RHEED 무늬 아래에 주어진 눈금으로 잴 수 있으며, 이는 형광 스크린(이 실험의 관측판에 해당)에 투영된 실제 회절 무늬와 정확히 일치함에 유의하여라.

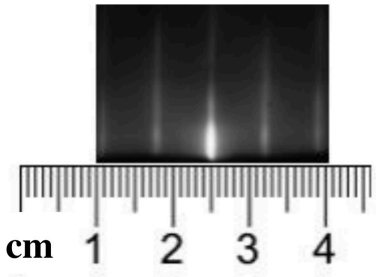


그림 16: 전자빔이 불균일한 간격의 나노 홈에 수직일 때 나노 구조 ZnSe 표면에서 나온 반사 고에너지 전자 회절(RHEED) 무늬.

그림 16의 회절 무늬를 얻을 때 전자총의 가속 전압은 $V = 13{,}000$ 볼트로 맞추었다. 시료 표면의 중심에 입사하는 고에너지 전자의 파장 λ 는 다음 식으로 계산할 수 있다

$$\lambda = \frac{12.247 \times 10^{-10}}{\sqrt{V(1 + 10^{-6}V)}}\ [\mathrm{m}], \tag{6}$$

여기서 상대론적 효과를 고려하였다.

ZnSe 시료에 대한 전자빔의 입사각은 $\theta \approx 0^\circ$ 이며, 형광 스크린과 나노 구조 ZnSe 표면 위 전자의 입사점 사이 거리는 $D = 26$ cm 이다.

과제		배점
G1	ZnSe 시료에 대해, 그림 16과 위에 주어진 실험 조건을 바탕으로, 불균일한 간격의 나노 홈에 수직인 주기적 원자 격자면의 격자면 간격 a^* 를 미터 단위로 유효 숫자 세 자리까지 구하여라. 결과를 답안지의 해당 표에 적어라.	1.7

END