

제37회 국제물리올림피아드

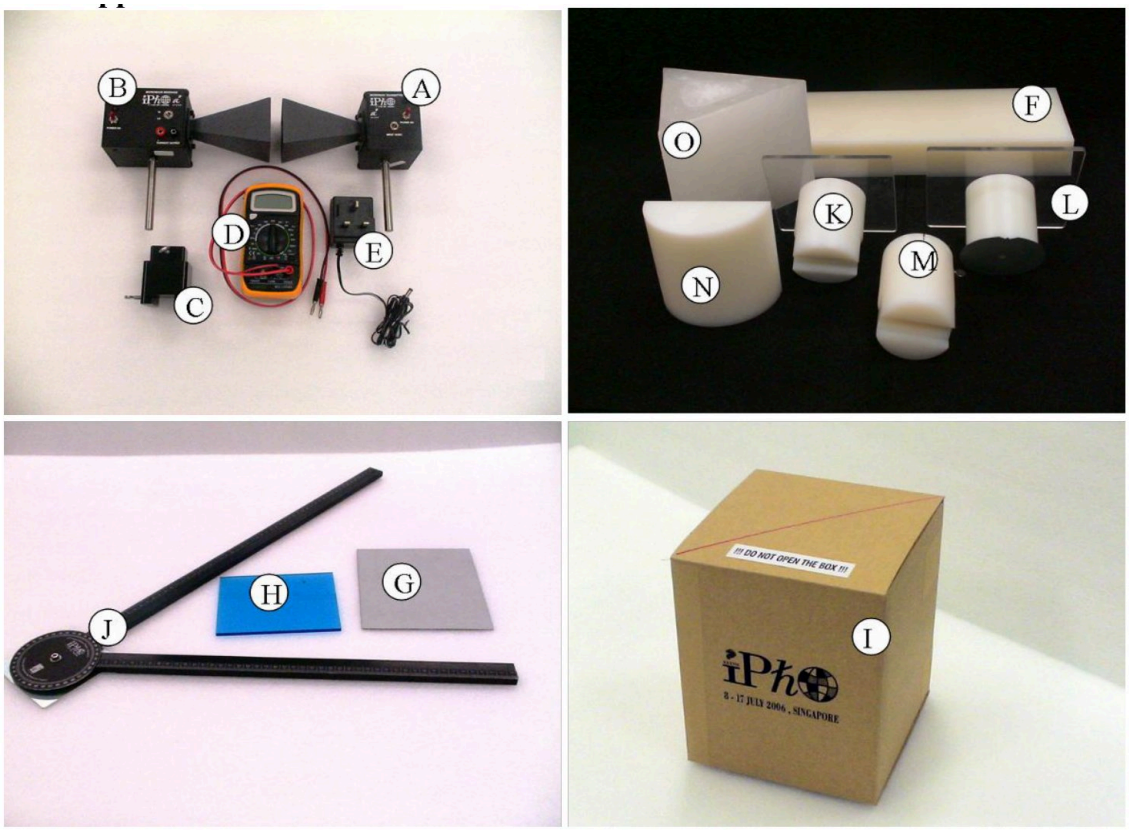
싱가포르

2006년 7월 8–17일

실험 경연

2006년 7월 12일 (수)

장치와 재료 목록



표지	부품	수량	표지	부품	수량
Ⓐ	마이크로파 송신기	1	Ⓘ	블랙박스 속 격자 구조	1
Ⓑ	마이크로파 수신기	1	Ⓙ	각도계	1
Ⓒ	송신기/수신기 받침	2	Ⓚ	프리즘 받침	1
Ⓓ	디지털 멀티미터	1	Ⓛ	회전 테이블	1
Ⓔ	송신기용 직류 전원	1	Ⓜ	렌즈/반사판 받침	1
Ⓕ	“박막” 시료로 쓰는 판	1	Ⓝ	평면-원통 렌즈	1
Ⓖ	반사판(은 금속판)	1	Ⓞ	밀랍 프리즘	2
Ⓗ	빛살 가르개(파란 퍼스펙스)	1		블루택	1팩
	버니어 캘리퍼(따로 지급)			30 cm 자(따로 지급)	

수의:

- **마이크로파 송신기의 출력은 표준 안전 수준보다 훨씬 낮다. 그렇더라도 송신기가 켜져 있을 때 가까이에서 마이크로파 혼을 직접 들여다보지 마시오.**
- **격자가 든 상자 ①를 열지 마시오.**
- **밀랍 프리즘 ◎은 깨지기 쉽다(파트 3에서 쓴다).**

주:

- ***<u>마이크로파 수신기의 출력(전류)은 마이크로파의 진폭에 비례한다는 점이 중요하다.</u>***
- ***마이크로파 수신기의 이득은 늘 LO로 맞추시오.***
- ***데이터를 모으는 동안 멀티미터의 측정 범위를 바꾸지 마시오.***
- ***쓰지 않는 부품은 간섭을 줄이도록 실험에서 멀리 두시오.***
- ***모든 그림에서 부품은 늘 부품 표지(Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ,…)로 나타내시오.***



디지털 멀티미터는 그림처럼 두 도선을 연결해서 써야 한다. 이 실험에서는 “2m” 전류 설정을 쓰시오.

파트 1: 마이컬슨 간섭계

1.1. 들어가며

마이컬슨 간섭계에서는 빛살 가르개가 들어오는 전자기(EM)파를 두 갈래 경로로 보낸 뒤, 반사된 성분 파동들을 다시 모아 중첩시켜 간섭무늬를 만든다. 그림 1.1은 마이컬슨 간섭계의 구성을 보여 준다. 입사파는 송신기에서 수신기까지 서로 다른 두 경로를 따라 나아간다. 이 두 파동은 수신기에서 중첩하여 간섭한다. 수신기에서 신호의 세기는 두 파동의 위상차에 달려 있으며, 이 위상차는 광로 차를 바꾸어 바꿀 수 있다.

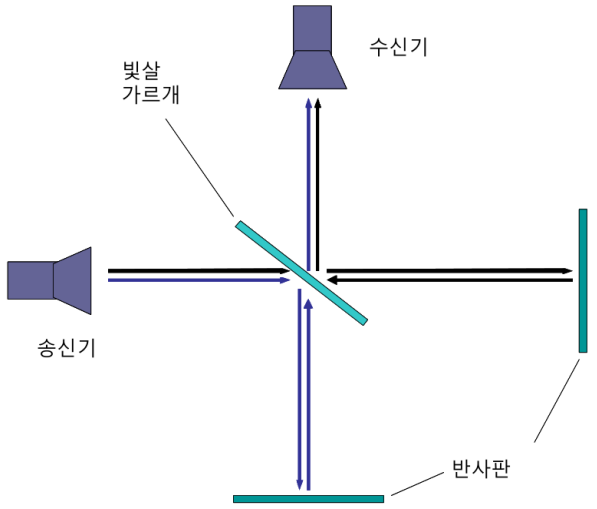


그림 1.1: 마이컬슨 간섭계의 개략도.

1.2. 부품 목록

1) 받침 ©에 단 마이크로파 송신기 Ⓐ
2) 받침 ©에 단 마이크로파 수신기 Ⓑ
3) 각도계 Ⓘ
4) 반사판 2개: 받침 Ⓜ에 단 반사판 Ⓖ, 그리고 반사판 역할을 하는 박막 Ⓕ.
5) 빛살 가르개 Ⓗ와 그 받침 역할을 하는 회전 테이블 Ⓛ
6) 디지털 멀티미터 Ⓓ

1.3. 과제: 마이크로파의 파장 구하기 [2점]

1.2절에 나열한 실험 부품만 써서 마이크로파 간섭계 실험을 꾸미고, 공기 중 마이크로파의 파장 λ를 구하시오. 데이터를 기록하고, 불확도가 ≤ 0.02 cm가 되도록 λ를 구하시오.

"박막"은 일부를 투과시키므로 그 뒤에 서 있거나 움직이지 마시오. 결과에 영향을 줄 수 있다.

파트 2: "박막" 간섭

2.1. 들어가며

유전체 박막에 입사한 전자기파 빛살은 그림 2.1처럼 두 빛살로 갈라진다. 빛살 A는 박막의 윗면에서, 빛살 B는 박막의 아랫면에서 반사된다. 빛살 A와 B가 중첩하여 이른바 박막 간섭이 일어난다.

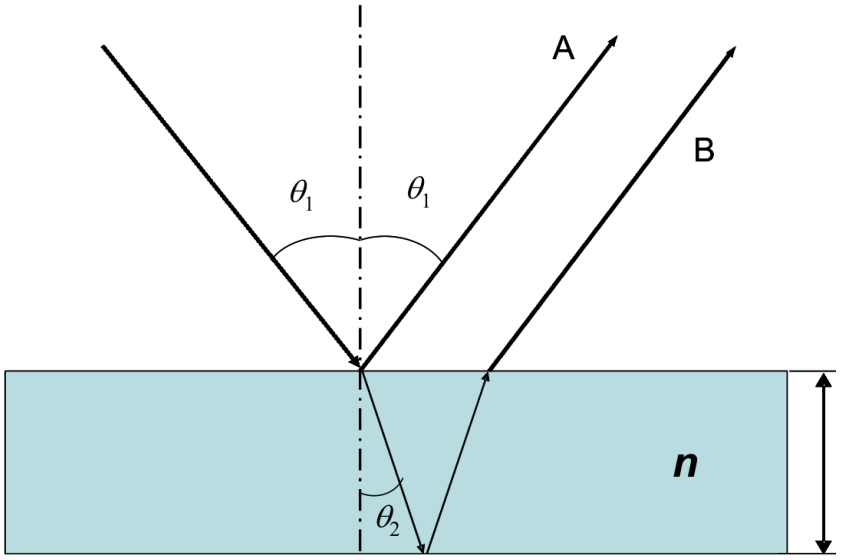


그림 2.1: 박막 간섭의 개략도.

빛살 A와 B의 광로 길이 차에 따라 보강 간섭이나 상쇄 간섭이 일어난다. 결과로 생기는 전자기파의 세기 I는 간섭하는 두 빛살의 경로 차에 달려 있으며, 이 경로 차는 다시

입사 빛살의 입사각 θ_1, 복사의 파장 λ, 박막의 두께 t와 굴절률 n에 달려 있다. 따라서 t와 λ의 값을 써서 I-θ_1 그래프로부터 박막의 굴절률 n을 구할 수 있다.

2.2. 부품 목록

1) 받침 ©에 단 마이크로파 송신기 Ⓐ
2) 받침 ©에 단 마이크로파 수신기 Ⓑ
3) 받침 Ⓜ에 단 평면-원통 렌즈 Ⓝ
4) 각도계 Ⓙ
5) 회전 테이블 Ⓛ
6) 디지털 멀티미터 Ⓓ
7) "박막" 시료 역할을 하는 고분자 판 Ⓕ
8) 버니어 캘리퍼

2.3. 과제: 고분자 판의 굴절률 구하기 [6점]

1) 보강 간섭과 상쇄 간섭의 조건을 θ_1, t, λ, n으로 나타내는 식을 유도하시오.

[1점]

2) 2.2절에 나열한 실험 부품만 써서, 40°에서 75° 범위의 입사각 θ_1의 함수로 수신기 출력 S를 재는 실험을 꾸미시오. 입사각과 반사각, 그리고 회전 테이블 위 박막의 위치를 분명히 보이도록 실험 장치를 스케치하시오. 모든 부품을 2쪽의 표지로 나타내시오. 데이터를 표로 정리하시오. 입사각 θ_1에 대해 수신기 출력 S를 그리시오. 보강 간섭과 상쇄 간섭에 해당하는 각을 정확히 구하시오.

[3점]

3) 공기의 굴절률을 1.00으로 놓고, 간섭 차수 m과 고분자 판의 굴절률 n을 구하시오. m과 n의 값을 답안지에 적으시오.

[1.5점]

4) 결과의 오차 분석을 하고 n의 불확도를 어림하시오. 불확도 Δn의 값을 답안지에 적으시오.

[0.5점]

주:

- ***준평행 마이크로파 빛살을 얻으려면, 렌즈의 평면이 송신기를 향하도록 마이크로파 송신기 앞에 렌즈를 놓아야 한다. 렌즈의 평면과 송신기 혼 입구 사이의 거리는 3 cm 여야 한다.***
- ***가장 좋은 결과를 얻으려면 송신기와 수신기 사이의 거리를 최대로 하시오.***
- ***송신기에서 나오는 마이크로파가 평면파에서 벗어나면 관찰 무늬에 봉우리가 더 생길 수 있다. 정해진 범위 40°에서 75°에서는 간섭에 의한 극대와 극소가 하나씩만 있다.***

파트 3: 깨어진 내부 전반사

3.1. 들어가며

평면파가 광학적으로 밀한 매질에서 소한 매질로 나아갈 때 내부 전반사(TIR)가 일어날 수 있다. 그러나 기하 광학이 예측하는 경계면에서의 TIR과 달리, 실제로는 입사파가 소한 매질 속으로 스며들어 경계면에 나란히 얼마쯤 나아간 뒤 밀한 매질로 되돌아 산란된다(그림 3.1 참조). 이 효과는 반사 빛살의 이동 D로 나타낼 수 있으며, 이를 구스-헨센 이동이라 한다.

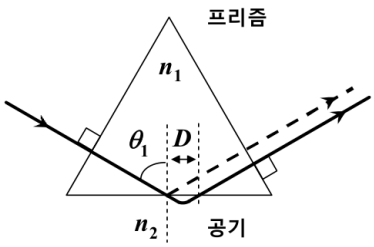


그림 3.1: 프리즘에서 내부 전반사를 겪는 전자기파를 보인 스케치. 공기 중에서 면에 나란한 이동 D가 구스-헨센 이동이다.

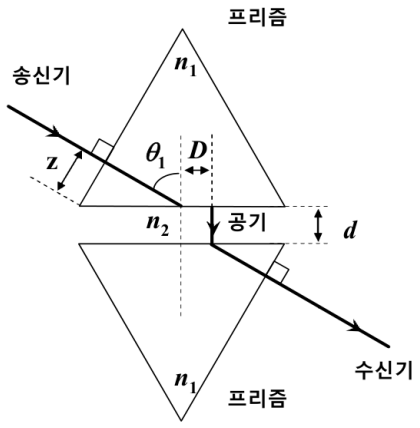


그림 3.2: 프리즘과 거리 d의 공기 틈을 보인 실험 장치 스케치. 공기 중에서 면에 나란한 이동 D가 구스-헨센 이동이다. z는 프리즘 꼭짓점에서 송신기 중심축까지의 거리이다.

굴절률 n_1인 다른 매질(곧 첫째 매질과 같은 물질로 만든 것)을 그림 3.2처럼 첫째 매질에서 작은 거리 d에 놓으면, 전자기파가 둘째 매질로 터널링한다. 이 흥미로운 현상을 *깨어진 내부 전반사*(FTIR)라 한다. 투과파의 세기 I_t는 거리 d에 따라 지수적으로 줄어든다.

$$I_t = I_0 \exp(-2\gamma d) \tag{3.1}$$

여기서 I_0는 입사파의 세기이고 γ는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2}\sin^2\theta_1 - 1} \tag{3.2}$$

여기서 λ는 매질 2에서 전자기파의 파장이고 n_2는 매질 2의 굴절률이다(매질 2인 공기의 굴절률은 1.00으로 가정한다).

3.2. 부품 목록

1) 받침 ©에 단 마이크로파 송신기 Ⓐ

2) 받침 ©에 단 마이크로파 수신기 Ⓑ
3) 받침 Ⓜ에 단 평면-원통 렌즈 Ⓝ
4) 정삼각형 밀랍 프리즘 2개 ◎와 그 받침 Ⓚ, 받침 역할을 하는 회전 테이블 Ⓛ
5) 디지털 멀티미터 Ⓓ
6) 각도계 Ⓘ
7) 자

3.3. 실험 설명

3.2절에 나열한 부품만 써서, FTIR에서 공기 틈의 간격 d에 따른 세기 I_t의 변화를 조사하는 실험을 꾸미시오. 일관된 결과를 얻으려면 다음에 유의하시오.

- 이 실험에는 각도계의 팔 하나만 쓰시오.
- 프리즘 면들이 서로 평행하도록 면을 잘 고르시오.
- 렌즈 곡면의 중심에서 프리즘 면까지의 거리는 2 cm여야 한다.
- 검출기는 그 혼이 프리즘 면에 닿도록 놓으시오.
- d의 값마다 마이크로파 수신기의 위치를 프리즘 면을 따라 맞추어 신호가 최대가 되게 하시오.
- 디지털 멀티미터가 2mA 범위에 있는지 확인하시오. d = 0.6 cm부터 데이터를 모으시오. 멀티미터의 읽음이 0.20 mA 아래로 떨어지면 측정을 멈추시오.

3.4. 과제: 프리즘 물질의 굴절률 구하기 [6점]

과제 1

최종 실험 장치를 스케치하고 모든 부품을 2쪽의 표지로 나타내시오. 스케치에는 프리즘 꼭짓점에서 송신기 중심축까지의 거리 z(그림 3.2 참조)의 값을 적으시오.

[1점]

과제 2

실험을 하고 데이터를 표로 정리하시오. 이 과제를 두 번 하시오.

[2.1점]

과제 3

(a) 알맞은 그래프를 그려, 오차 분석과 함께 프리즘의 굴절률 n_1을 구하시오.

(b) 프리즘의 굴절률 n_1과 그 불확도 Δn_1을 주어진 답안지에 적으시오.

[2.9점]

파트 4: 금속 막대 격자의 마이크로파 회절: 브래그 반사

4.1. 들어가며

브래그 법칙

실제 결정의 격자 구조는 브래그 법칙으로 조사할 수 있다.

$$2d\sin\theta = m\lambda \tag{4.1}$$

여기서 d는 X선을 "반사"하는 평행한 결정면들 사이의 거리, m은 회절 차수, θ는 입사 X선 빛살과 결정면 사이의 각이다. 브래그 법칙은 흔히 브래그 반사 또는 X선 회절이라고도 한다.

금속 막대 격자

X선의 파장이 결정의 격자 상수와 비슷하므로, 전통적인 브래그 회절 실험은 X선으로 한다. 그러나 마이크로파는 격자 상수가 훨씬 큰 격자 구조에서 회절하며, 이런 격자 상수는 자로 쉽게 잴 수 있다.

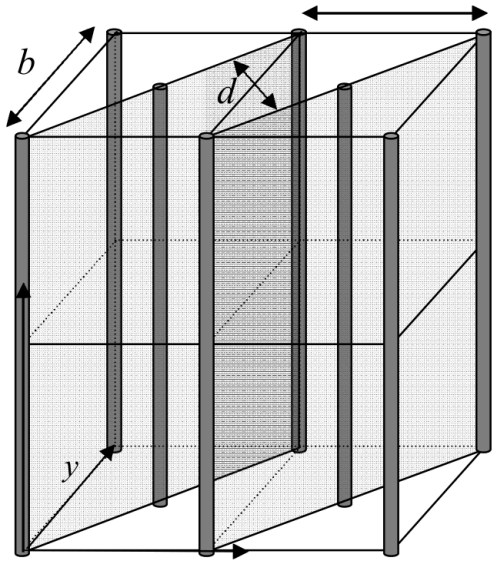


그림 4.1: 격자 상수 a와 b, 면 사이 간격 d인 금속 막대 격자.

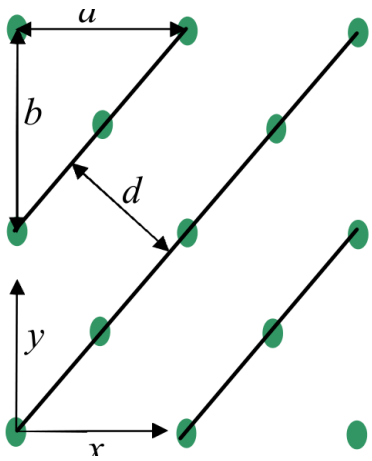


그림 4.2: 그림 4.1의 금속 막대 격자를 위에서 본 그림(축척이 맞지 않음). 선은 격자의 대각면을 나타낸다.

이 실험에서는 브래그 법칙으로 금속 막대로 만든 격자의 격자 상수를 잰다. 이런 금속 막대 격자의 예가 그림 4.1에 있으며, 금속 막대는 굵은 연직선으로 나타냈다. xy평면의 대각선 방향을 따른 격자면은 그늘진 면으로 나타냈다. 그림 4.2는 금속 막대 격자를 위에서(z축을 따라 내려다) 본 그림으로, 점은 막대를, 선은 대각 격자면을 나타낸다.

4.2. 부품 목록

1) 받침 ©에 단 마이크로파 송신기 Ⓐ
2) 받침 ©에 단 마이크로파 수신기 Ⓑ
3) 받침 Ⓜ에 단 평면-원통 렌즈 Ⓝ
4) 금속 막대 격자가 든 봉인된 상자 Ⓘ
5) 회전 테이블 Ⓛ
6) 디지털 멀티미터 Ⓓ
7) 각도계 Ⓙ

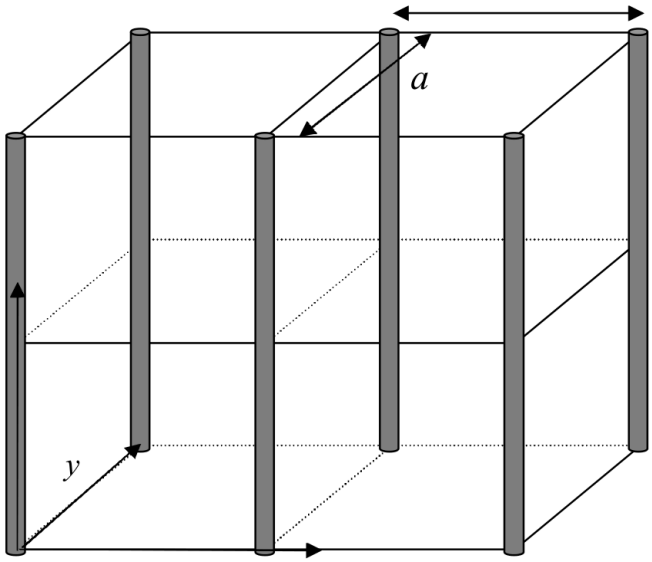


그림 4.3: 단순 정사각 격자.

이 실험에서는 그림 4.3과 같이 금속 막대로 만든 ***단순*** 정사각 격자가 주어진다. 격자는 상자 속에 봉인되어 있다. 실험으로 격자의 격자 상수 a를 구해야 한다.

상자를 열지 마시오. 실험 뒤 봉인이 뜯어진 것이 발견되면 실험 결과에 점수를 주지 않는다.

4.3. 과제: 주어진 단순 정사각 격자의 격자 상수 구하기 [6점]

과제 1

그림 4.3의 단순 정사각 격자를 위에서 본 그림을 그리시오. 그림에 주어진 격자의 격자 상수 a와 대각면들의 면 사이 간격 d를 나타내시오. 이 그림을 이용해 브래그 법칙을 유도하시오.

[1점]

과제 2

브래그 법칙과 주어진 장치를 써서, 격자의 격자 상수 a를 구하는 브래그 회절 실험을 설계하시오.

(a) 실험 장치를 스케치하시오. 모든 부품을 2쪽의 표지로 나타내고, 송신기 축과 격자면 사이의 각 θ, 그리고 송신기 축과 수신기 축 사이의 각 ζ를 분명히 나타내시오. 실험에서는 상자에 빨간 선으로 표시된 방향의 대각면에서 회절을 재시오.

[1.5점]

(b) $20° \le \theta \le 50°$에서 회절 실험을 하시오. 이 범위에서는 1차 회절만 관찰된다. 답안지에 결과를 표로 정리하고 θ와 ζ를 모두 기록하시오.

[1.4점]

(c) 회절파의 세기에 비례하는 양을 θ의 함수로 그리시오.

[1.3점]

(d) 그래프를 써서 격자 상수 a를 구하고 실험 오차를 어림하시오.

[0.8점]

주:

1. *가장 좋은 결과를 얻으려면 실험하는 동안 송신기를 고정해 두어야 한다. 송신기와 격자 사이, 그리고 격자와 수신기 사이의 거리는 약 50 cm 여야 한다.*
2. *이 실험에서는 대각면만 쓰시오. 다른 면을 쓰려 하면 결과가 옳지 않다.*
3. *빨간 대각선이 있는 격자 상자의 면이 위로 가야 한다.*
4. *회절 봉우리의 위치를 더 정확히 구하려면 봉우리 위치 주변에서 데이터 점을 여럿 쓰시오.*