모의 면접 · 구술고사

자연계열 · 물리

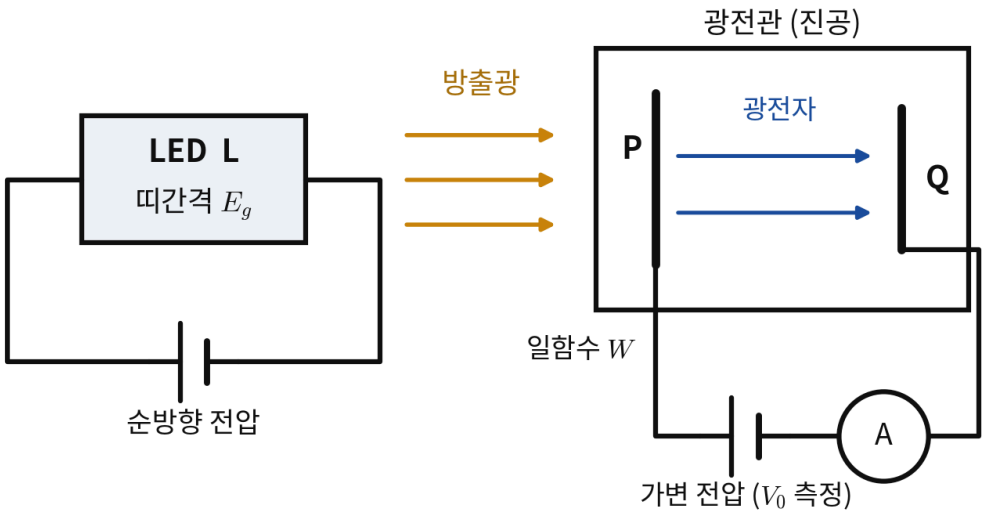
Ⅰ. 문제

제 1 회 · 반도체와 빛 — 에너지띠 · 광전 효과 · 회로

문제 1 LED의 발광과 광전 효과

물리학 Ⅰ · Ⅱ · 12분 · 소문항 3개

그림 1과 같이 띠간격이 E_g인 반도체로 만든 발광 다이오드(LED) L에 순방향 전압을 걸어 빛을 방출시킨다. 전도띠 바닥으로 올라간 전자가 가전자띠 꼭대기의 양공과 재결합할 때 에너지가 정확히 E_g인 광자 1개를 방출한다고 하자. 이 빛을 진공인 광전관 안의 금속판 P에 쬐면 광전자가 튀어나와 금속판 Q로 이동하고, 광전관에 연결된 가변 전원의 전압을 조절하여 광전자가 Q에 전혀 도달하지 못하게 하는 최소 전압(정지 전압) V_0를 측정한다. 플랑크 상수는 h, 진공에서 빛의 속력은 c, 전자의 전하량 크기는 e이다. 단, P의 일함수는 W이고 $E_g > W$이며, 광전관 안에서의 충돌과 열에 의한 전자 방출은 무시한다.



[그림 1] LED L의 발광 회로와 광전관을 이용한 정지 전압 측정 장치

(1) LED L이 방출하는 빛의 파장 λ와, 이 빛이 금속판 P에서 튀어나오게 하는 광전자의 최대 운동 에너지를 각각 구하시오. **[1점]**

(2) 띠간격이 서로 다른 여러 개의 LED를 차례로 사용하여, 각 LED가 방출하는 빛의 진동수 f에 대한 정지 전압 V_0를 측정하고 f-V_0 그래프를 그렸다. 이 그래프의 개형을 근거와 함께 설명하고, 그래프로부터 플랑크 상수 h와 일함수 W를 각각 어떻게 얻을 수 있는지 서술하시오. 또, 금속판 P를 일함수가 더 큰 금속으로 바꾸었을 때 그래프가 어떻게 달라지는지 설명하시오. **[2점]**

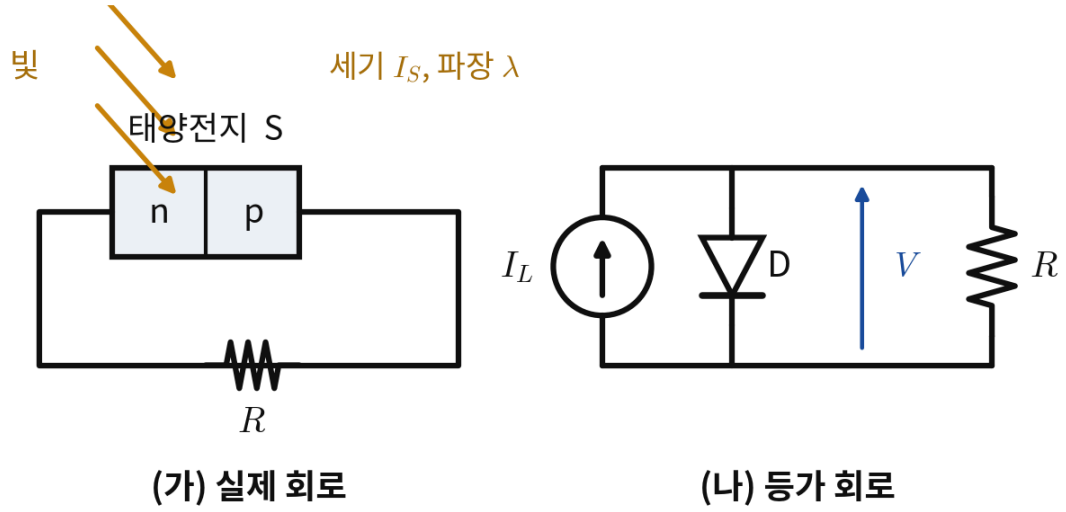
(3) 온도가 올라가면 반도체의 띠간격은 작아진다. $W = E_g/2$인 금속판 P를 사용하고 LED L의 온도를 높였더니, L이 방출하는 빛의 파장이 λ에서 $5\lambda/4$로 늘어났다. 이때 측정되는 정지 전압은 온도를 높이기 전의 몇 배인지 구하시오. 또, 온도를 더 높여 P에서 광전자가 더 이상 방출되지 않게 되는 순간에 L이 방출하는 빛의 파장을 λ로 나타내시오. **[2점]**

문제 2 태양전지의 최대 출력

물리학 I · II · 12분 · 소문항 3개

그림 2의 (가)는 p-n 접합으로 만든 태양전지 S에 저항값이 R인 부하 저항을 연결한 회로이다. 수광면의 넓이는 A이고, 파장이 λ인 단색광이 수광면에 수직으로 입사한다. 빛의 세기(단위 넓이당 일률)는 I_S이다. 수광면에 도달한 광자 1개는 확률 η로 전자-양공 쌍을 1개 만들며, 만들어진 전자-양공 쌍은 모두 접합면의 전기장에 의해 분리되어 외부 회로로 흐른다. η는 빛의 파장과 세기에 관계없이 일정하다.

이 태양전지는 그림 2의 (나)와 같이, 세기가 I_L로 일정한 전류원과 다이오드 D가 병렬로 연결된 회로와 같다고 볼 수 있다. D는 양단 전압이 V_D보다 작으면 전류를 전혀 흘리지 않고, 양단 전압이 V_D에 이르면 그 전압을 유지한 채 필요한 만큼의 전류를 흘리는 이상적인 소자로 가정한다. 반도체의 띠간격은 E_g이고 $hc/\lambda > E_g$이다. 플랑크 상수는 h, 진공에서 빛의 속력은 c, 전자의 전하량 크기는 e이다.



[그림 2] (가) 태양전지와 부하 저항 (나) 태양전지의 등가 회로

(1) 단위 시간당 수광면에 입사하는 광자의 개수를 구하고, 이로부터 광전류의 세기 I_L을 구하시오. **[1점]**

(2) 부하 저항에서 소비되는 전력 P를 R에 대한 식으로 나타내고, P가 최대가 되는 R의 값과 그때의 최대 전력 $P_{\max}$를 I_L과 V_D로 구하시오. **[2점]**

(3) 빛의 세기 I_S는 그대로 두고 파장만 $\lambda/2$인 단색광으로 바꾸었을 때 $P_{\max}$는 몇 배가 되는지 구하고, 그 까닭을 설명하시오. 또, 동일한 태양전지 2개를 직렬로 연결하고 각 태양전지에 처음과 같은 빛을 쬐었을 때 얻을 수 있는 최대 전력을 구하시오. **[2점]**

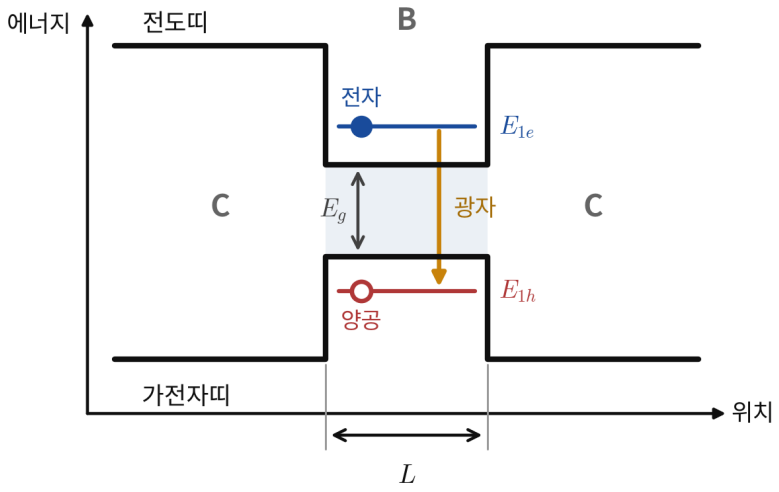
제 2 회 · 반도체와 양자 — 물질의 이중성 · 전기장과 축전기

문제 1 양자 우물의 발광 파장

물리학 I · II · 12분 · 소문항 3개

그림 3과 같이 띠간격이 E_g인 반도체 B를, 띠간격이 훨씬 큰 반도체 C 사이에 두께 L로 얇게 끼워 넣으면 B 안의 전자와 양공은 폭이 L인 영역에 갇힌다. 이 구조를 양자 우물이라 한다.

갇힌 입자의 물질파는 우물의 양 끝에서 변위가 0인 정상파만 이룰 수 있으며, 물질파의 파장 λ와 운동량 p 사이에는 드브로이 관계 $\lambda = h/p$가 성립한다. 갇힘에 의해 전자는 B의 전도띠 바닥보다 위쪽에, 양공은 가전자띠 꼭대기보다 아래쪽에 각각 새로운 준위를 갖는다. 우물 안에서 전자와 양공은 각각 질량이 m_e, m_h인 자유 입자처럼 운동한다. 전자와 양공이 각각 가장 낮은 준위에 있다가 재결합하면, 두 준위의 에너지 차와 같은 에너지를 갖는 광자 1개를 방출한다. 플랑크 상수는 h, 진공에서 빛의 속력은 c이며, 필요하면 $hc = 1240\ \ \mathrm{eV \cdot nm}$를 사용하시오.



[그림 3] 양자 우물의 에너지 구조와 전자-양공 재결합에 의한 발광

(1) 폭이 L인 우물에 갇힌 질량 m인 입자가 가질 수 있는 물질파의 파장 λ_n과 운동 에너지 E_n을 자연수 n을 써서 구하시오. **[1점]**

(2) 이 양자 우물이 방출하는 광자의 에너지 E_{ph}와 그 빛의 파장을 E_g, L, m_e, m_h, h, c로 나타내시오. **[2점]**

(3) 우물의 폭이 L일 때 이 소자는 파장 640 nm인 빛을 방출하였고, 다른 조건은 그대로 둔 채 우물의 폭만 $L/2$로 줄였더니 파장 480 nm인 빛을 방출하였다. 반도체 B의 띠간격 E_g에 해당하는 빛의 파장과, 우물의 폭이 L일 때 전자와 양공의 갇힘 에너지의 합을 각각 구하시오. **[2점]**

문제 2 p-n 접합의 공핍층과 전기 용량

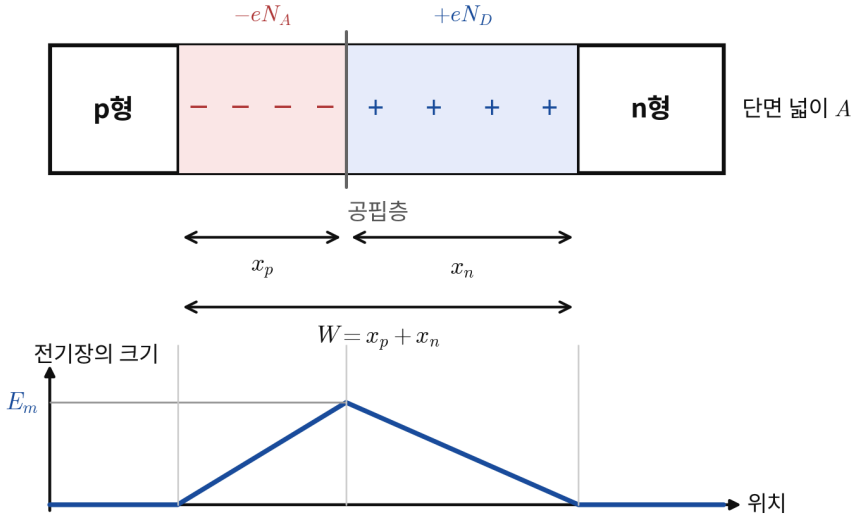
물리학 I · II · 12분 · 소문항 3개

그림 4는 단면의 넓이가 A인 p-n 접합 다이오드의 접합면 부근을 나타낸 것이다. n형 영역에는 도너가 단위 부피당 N_D개, p형 영역에는 억셉터가 단위 부피당 N_A개 들어 있다. 접합면 부근에서는 전자와 양공이 서로 확산해 결합하여 사라지고, 움직일 수 없는 이온만 남은 공핍층이 생긴다. 공핍층은 p형 쪽으로 x_p, n형 쪽으로 x_n만큼 뻗어 있고 그 폭은 $W = x_p + x_n$이다.

공핍층 안에서 p형 쪽에는 단위 부피당 $-eN_A$, n형 쪽에는 $+eN_D$의 전하가 균일하게 분포하며, 공핍층 밖은 전기적으로 중성이어서 전기장이 0이다. 이때 공핍층 안의 전기장의 크기는 그림 4의 아래쪽 그래프처럼 접합면에서 최댓값 E_m을 갖고 공핍층의 양 끝에서 0까지 직선적으로 변하며, 접합면에서의 값은

$$E_m = \frac{eN_D x_n}{\varepsilon}$$

이다. ε은 반도체의 유전율, e는 전자의 전하량 크기이고, 공핍층의 양 끝 사이의 전위차를 내부 전위차 V_{bi}라 한다.



[그림 4] p-n 접합의 공핍층에 남은 고정 전하와 공핍층 안의 전기장 분포

(1) 공핍층 전체의 알짜 전하량이 0임을 이용하여 $x_p : x_n$을 구하고, x_n을 W, N_A, N_D로 나타내시오. **[1점]**

(2) 전기장-위치 그래프와 전위차 사이의 관계를 이용하여 V_{bi}를 E_m과 W로 나타내고, 이로부터 공핍층의 폭 W를 V_{bi}, N_A, N_D, e, ε으로 구하시오. **[2점]**

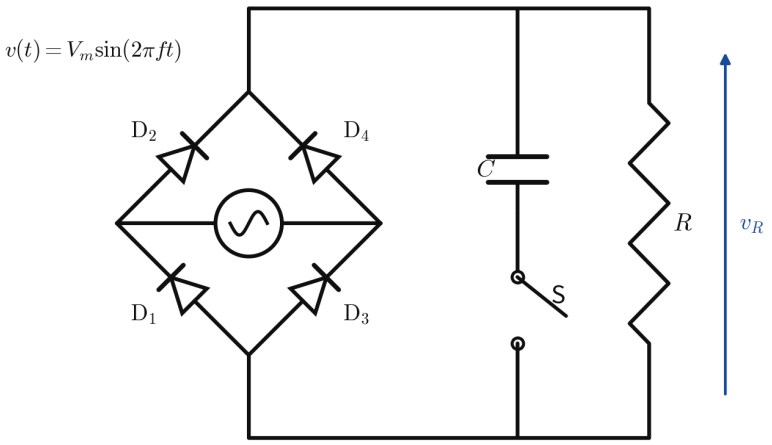
(3) 이 다이오드에 크기가 V_R인 역방향 전압을 걸면 공핍층 양 끝 사이의 전위차는 $V_{\text{bi}} + V_R$가 된다. 공핍층에는 전하 나르개가 없으므로, 이 다이오드는 극판 사이의 간격이 W이고 극판의 넓이가 A인 평행판 축전기로 볼 수 있다. 전기 용량 C를 V_R의 함수로 구하고, $1/C^2$을 V_R에 대하여 그린 그래프의 기울기와 가로축 절편이 각각 무엇을 알려주는지 설명하시오. **[2점]**

제 3 회 · 반도체 소자와 회로 — 정류 · 교류 · 자기력 · 트랜지스터

문제 1 브리지 정류 회로와 리플 전압

물리학 I · II · 12분 · 소문항 3개

그림 5는 다이오드 $D_1 \sim D_4$, 저항값이 R인 저항, 전기 용량이 C인 축전기, 스위치 S와 교류 전원으로 구성한 정류 회로이다. 교류 전원의 전압은 $v(t) = V_m \sin(2\pi f t)$이며, $v(t) > 0$은 전원의 왼쪽 단자의 전위가 오른쪽 단자보다 높은 경우로 정한다. 모든 다이오드는 순방향으로는 전압 강하 없이 전류를 통과시키고 역방향으로는 전류를 전혀 흘리지 않는 이상적인 소자로 가정하며, 도선의 저항은 무시한다. 교류의 주기는 $T = 1/f$이다.



[그림 5] 다이오드 4개로 구성한 브리지 정류 회로와 평활용 축전기

(1) 스위치 S가 열려 있을 때, 저항 R의 양단 전압 v_R의 시간에 따른 변화를 개형으로 나타내고, 한 주기 동안 저항에서 소비되는 전력의 평균값을 구하시오. **[2점]**

(2) 스위치 S를 닫아 축전기를 연결하였다. $RC \gg T$인 경우 v_R는 V_m 근처에서 작은 폭으로 오르내린다. 이때 v_R의 최댓값과 최솟값의 차 ΔV를 V_m, f, R, C로 근사하여 구하고, 그 과정을 설명하시오. **[2점]**

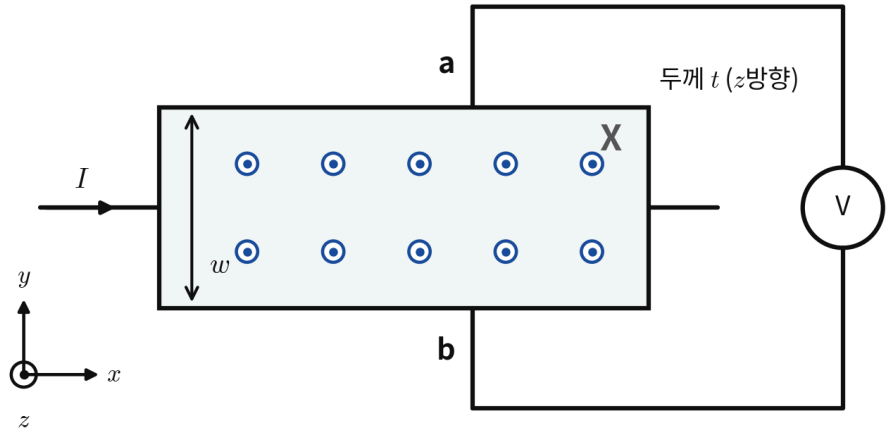
(3) 다이오드 D_1이 끊어져 어느 방향으로도 전류가 흐르지 않게 되었다. 소문항 (1)과 (2)에서 구한 결과가 각각 어떻게 달라지는지 근거와 함께 설명하시오. **[1점]**

문제 2 반도체의 종류 판별과 트랜지스터

물리학 I · II · 12분 · 소문항 3개

그림 6과 같이 불순물을 첨가한 반도체 시료 X를 얇은 직육면체 모양으로 깎았다. 시료의 y방향 폭은 w, z방향 두께는 t이다. 시료에 $+x$방향으로 세기가 I로 일정한 전류를 흘리면서, 동시에 $+z$방향(지면에서 나오는 방향)으로 세기가 B인 균일한 자기장을 걸었다. 충분한 시간이 지나 정상 상태에 이른 뒤 시료의 두 옆면 a(y가 큰 쪽)와 b(y가 작은 쪽) 사이의 전위차를 재었더니, a가 b보다 V_H만큼 전위가 높았다.

X에서 전류를 나르는 나르개는 전자와 양공 중 한 종류뿐이고, 단위 부피당 개수는 n, 전하량의 크기는 e이며, 모두 같은 크기의 속도로 이동한다고 가정한다.

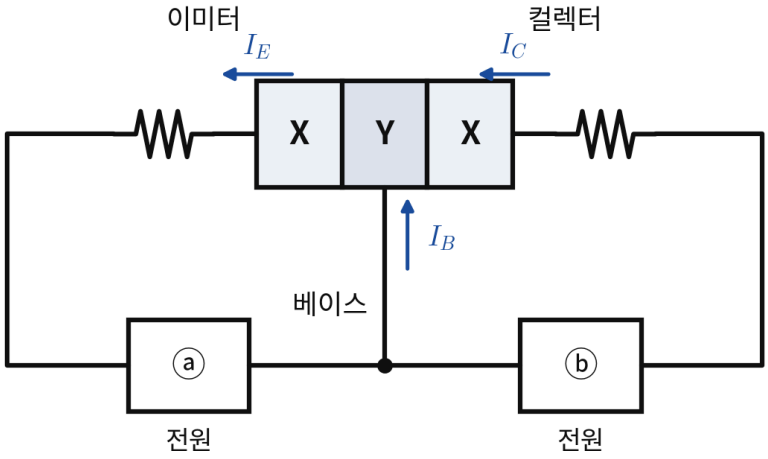


[그림 6] 자기장 속에 놓인 반도체 시료 X와 두 옆면 a, b 사이의 전위차 측정

(1) X가 n형 반도체인지 p형 반도체인지 판단하고, 나르개에 작용하는 자기력의 방향을 근거로 들어 설명하시오. **[2점]**

(2) 정상 상태에서 나르개에 작용하는 자기력과 전기력이 평형을 이룸을 이용하여, V_H를 I, B, n, e, t로 나타내시오. **[1점]**

(3) 그림 7과 같이 시료 X 두 개 사이에 X와 종류가 반대인 반도체 Y를 끼워 트랜지스터를 만들고, 저항과 전원 ⓐ, ⓑ를 연결하여 전류를 증폭시켰다. 이 트랜지스터가 n-p-n형과 p-n-p형 중 어느 것인지 쓰고, 전원 ⓐ와 ⓑ의 극성이 각각 어떠해야 하는지 근거와 함께 설명하시오. 또, 전류 증폭률이 100이고 베이스에 흐르는 전류의 세기가 I_B일 때 이미터에 흐르는 전류의 세기를 구하시오. **[2점]**



[그림 7] 시료 X와 Y로 만든 트랜지스터를 이용한 전류 증폭 회로

II. 예시답안

제 1 회 · 반도체와 빛

문제 1 LED의 발광과 광전 효과

띠간격 · 광양자설 · 광전 효과

(1) 정답: $\lambda = (hc)/E_g$, $K_{\max} = E_g - W$

재결합으로 방출되는 광자 1개의 에너지가 E_g이므로, 광자 에너지와 진동수·파장의 관계 $E = hf = hc/\lambda$에서

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}$$

이다. 이 광자가 금속판 P의 전자 1개에 에너지를 모두 넘겨주므로, 광전 효과의 에너지 보존식 $E = W + K_{\max}$ 로부터

$$K_{\max} = E_g - W, \quad V_0 = \frac{K_{\max}}{e} = \frac{E_g - W}{e}$$

$E_g > W$이므로 $K_{\max} > 0$이고 광전자가 실제로 방출된다.

(2) 정답: 기울기가 h/e인 직선. 일함수가 커지면 기울기는 그대로이고 직선이 오른쪽(아래쪽)으로 평행이동한다.

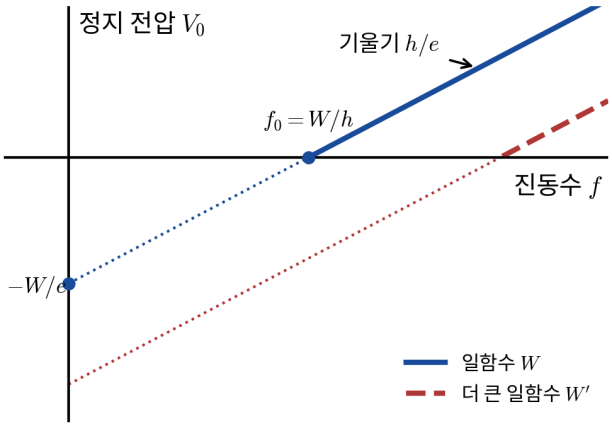
정지 전압은 최대 운동 에너지를 전하량으로 나눈 값이므로 $eV_0 = hf - W$, 즉

$$V_0 = \frac{h}{e}f - \frac{W}{e}$$

이다. 따라서 f-V_0 그래프는 기울기가 일정한 직선이다. 단 $f < f_0 \equiv W/h$인 빛에서는 광전자가 아예 방출되지 않아 정지 전압을 측정할 수 없으므로, 실제로 측정되는 부분은 $f \geq f_0$인 반직선이고 그 아래는 직선을 연장한 것에 지나지 않는다. 이 직선에서 다음을 얻는다.

- 기울기 $= h/e$ 이므로, 기울기에 e를 곱하면 플랑크 상수 h를 얻는다.
- 세로축 절편 $= -W/e$ 이므로, 절편의 크기에 e를 곱하면 일함수 W를 얻는다.
- 가로축 절편 $= f_0 = W/h$ (문턱 진동수)로부터도 $W = hf_0$를 얻는다.

기울기 h/e는 금속의 종류와 무관한 보편 상수이므로, 일함수가 더 큰 금속 $W' > W$로 바꾸면 직선의 기울기는 변하지 않고 세로축 절편만 $-W'/e$로 더 아래로 내려간다. 즉 직선 전체가 아래쪽(같은 말로 오른쪽)으로 평행이동하며, 문턱 진동수는 $f_0' = W'/h > f_0$로 커진다.



[해설 그림 1] 일함수가 다른 두 금속에 대한 f-V_0 그래프

(3) 정답: $3/5$ **배,** 2λ

파장이 λ일 때 광자 에너지는 $E_g = hc/\lambda$이고, 파장이 $5\lambda/4$가 되었을 때의 띠간격을 E_g'라 하면

$$E_g' = \frac{hc}{5\lambda/4} = \frac{4}{5}\cdot\frac{hc}{\lambda} = \frac{4}{5}E_g$$

이다. 일함수는 $W = E_g/2$로 일정하므로

$$eV_0 = E_g - \frac{E_g}{2} = \frac{E_g}{2}, \quad eV_0' = \frac{4}{5}E_g - \frac{1}{2}E_g = \frac{3}{10}E_g$$

$$\frac{V_0'}{V_0} = \frac{3/10}{1/2} = \frac{3}{5}$$

한편 광전자가 더 이상 방출되지 않게 되는 경계는 광자 에너지가 일함수와 같아지는 순간, 즉 띠간격이 $E_g'' = W = E_g/2$로 줄어드는 순간이다. 이때의 파장을 λ''라 하면

$$\lambda'' = \frac{hc}{E_g/2} = 2 \cdot \frac{hc}{E_g}$$

$$\lambda'' = 2\lambda$$

즉 파장이 2λ보다 길어지면 광전자는 방출되지 않는다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	광자 1개의 에너지가 띠간격과 같음을 이용해 파장을 구하고, 광전 효과의 에너지 보존식으로 최대 운동 에너지를 구한 경우	1
(2)	$eV_0 = hf - W$를 유도하여 직선임을 밝히고, 기울기와 두 절편의 물리적 의미로부터 h와 W를 얻는 방법을 서술하였으며, 일함수 변화가 기울기가 아닌 절편만 바꿈을 설명한 경우	2
(3)	파장 변화로부터 띠간격의 변화를 구하여 정지 전압의 비를 정량적으로 계산하고, 광전자 방출의 한계 조건($hc/\lambda = W$)을 파장으로 표현한 경우	2

문제 2 태양전지의 최대 출력

광양자설 · 옴 법칙 · 전력 · 직렬 연결

(1) 정답: $N = (I_S A\lambda)/(hc)$, $I_L = (\eta e I_S A\lambda)/(hc)$

수광면이 단위 시간 동안 받는 빛의 에너지는 $I_S A$이고, 광자 1개의 에너지는 hc/λ이므로 단위 시간당 입사 광자 수는

$$N = \frac{I_S A}{hc/\lambda} = \frac{I_S A\lambda}{hc}$$

이다. 광자 1개마다 확률 η로 전자-양공 쌍 1개가 만들어지고 그것이 모두 외부 회로로 흐르므로, 단위 시간당 회로를 지나는 전하량은 $\eta N e$이다.

$$I_L = \eta N e = \frac{\eta e I_S A\lambda}{hc}$$

(2) 정답: $R = V_D/I_L$**일 때** $P_{\max} = I_L V_D$

등가 회로에서 전류원이 내보내는 전류 I_L은 다이오드 D와 저항 R로 나뉘어 흐르고, 두 소자에는 같은 단자 전압 V가 걸린다.

(i) $I_L R < V_D$인 경우: 단자 전압이 V_D에 이르지 못하므로 D에는 전류가 흐르지 않는다. 따라서 I_L이 모두 저항으로 흘러 $V = I_L R$이고 $P = I_L^2 R$이다.

(ii) $I_L R \geq V_D$인 경우: 단자 전압은 V_D로 고정되고, 저항에는 V_D/R의 전류가, 나머지 $I_L - V_D/R$의 전류는 D로 흐른다. 따라서 $P = V_D^2/R$이다.

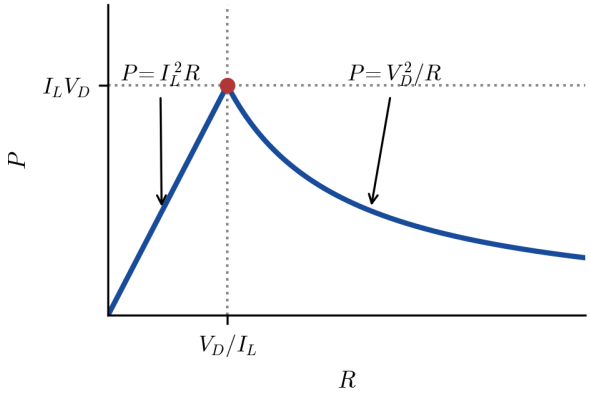
정리하면

$$P(R) = \begin{cases} I_L^2 R & (R \leq V_D/I_L) \\ V_D^2/R & (R \geq V_D/I_L) \end{cases}$$

이다. P는 $R < V_D/I_L$에서 증가하고 $R > V_D/I_L$에서 감소하므로, 두 구간의 경계에서 최대가 된다.

$$R = \frac{V_D}{I_L} \quad \text{일 때} \quad P_{\max} = I_L^2 \cdot \frac{V_D}{I_L} = I_L V_D$$

이 지점은 다이오드에 전류가 흐르기 직전, 즉 태양전지가 만든 전하를 하나도 잃지 않으면서 단자 전압이 최대인 상태에 해당한다.



[해설 그림 2] 부하 저항에 따른 출력 전력 $P(R)$

(3) 정답: $1/2$ **배,** $2I_L V_D$

빛의 세기 I_S가 같아도 파장을 $\lambda/2$로 바꾸면 광자 1개의 에너지 hc/λ가 2배가 되므로, 같은 일률을 나르는 광자의 개수는 절반이 된다. 소문항 (1)의 결과 $I_L \propto \lambda$에서도 곧바로 확인된다. 광전류가 절반이 되고 V_D는 변하지 않으므로

$$P'_{\max} = \frac{1}{2} I_L V_D = \frac{1}{2} P_{\max}$$

즉 광자 하나하나가 더 큰 에너지를 가져도, 반도체가 만들어 내는 전자-양공 쌍의 개수는 광자 수로 정해지고 E_g를 넘는 초과 에너지 $hc/\lambda - E_g$는 열로 버려지므로 출력은 오히려 줄어든다.

같은 태양전지 2개를 직렬로 연결하면 두 소자를 지나는 전류가 같다. 회로에 흐르는 전류를 i라 하자. 다이오드는 역방향으로 전류를 흘리지 못하므로 각 소자에서 외부로 나가는 전류는 I_L을 넘을 수 없어 $i \le I_L$이다. 또 $i < I_L$인 동안에는 각 소자에서 남는 전류 $I_L - i$가 다이오드로 흘러야 하므로 각 소자의 단자 전압은 V_D로 고정되고, 전체 단자 전압은 $2V_D$가 된다. 따라서 전체 저항값을 R이라 하면

$$P = \begin{cases} I_L^2 R & (R \le 2V_D/I_L) \\ (2V_D)^2/R & (R \ge 2V_D/I_L) \end{cases}$$

로 (2)와 같은 꼴이 되고, 두 구간의 경계에서 최대가 된다.

$$R = \frac{2V_D}{I_L} \quad \textbf{일 때} \quad P_{\max} = 2I_L V_D$$

즉 전류는 그대로이고 전압이 2배가 되어 최대 전력도 2배가 된다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	빛의 세기를 광자 1개의 에너지로 나누어 단위 시간당 광자 수를 구하고, 양자 효율과 전하량을 곱해 광전류를 구한 경우	1
(2)	다이오드의 도통 여부에 따라 경우를 나누어 $P(R)$를 구간별로 옳게 구하고, 두 구간의 경계에서 최대가 됨을 논증하여 R와 $P_{\max}$를 구한 경우	2
(3)	같은 세기에서 파장이 짧아지면 광자 수가 줄어 광전류가 감소함을 근거로 $P_{\max}$의 변화를 설명하고, 직렬 연결에서 전류가 공통임을 이용해 최대 전력을 구한 경우	2

제 2 회 · 반도체와 양자

문제 1 양자 우물의 발광 파장

물질파 · 정상파 조건 · 띠간격

(1) 정답: $\lambda_n = 2L/n$, $\quad E_n = n^2h^2/(8mL^2)$

양 끝이 고정된 정상파 조건에서 우물의 폭 L은 반파장의 정수 배이므로 $L = n \cdot \lambda_n/2$, 즉

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$

이다. 드브로이 관계에서 운동량은 $p_n = h/\lambda_n = nh/(2L)$이고, 자유 입자의 운동 에너지는 $E_n = p_n^2/(2m)$이므로

$$E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2}$$

우물이 좁을수록(L이 작을수록) 준위 간격이 급격히 커진다는 점이 이 구조의 핵심이다.

(2) 정답: $E_{\text{ph}} = E_g + \frac{h^2}{8L^2}\left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}\right)$

전자는 전도띠 바닥보다 $E_{1e} = h^2/(8m_eL^2)$만큼 위에, 양공은 가전자띠 꼭대기보다 $E_{1h} = h^2/(8m_hL^2)$만큼 아래에 각각 가장 낮은 준위를 갖는다. 두 준위의 에너지 차가 방출 광자의 에너지이므로

$$E_{\text{ph}} = E_g + E_{1e} + E_{1h} = E_g + \frac{h^2}{8L^2}\left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}\right)$$

따라서 방출되는 빛의 파장은 다음과 같다.

$$\lambda_{\text{ph}} = \frac{hc}{E_{\text{ph}}} = \frac{hc}{E_g + \frac{h^2}{8L^2}\left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}\right)}$$

L을 바꾸는 것만으로 E_g가 정해 주는 값보다 짧은 파장의 빛을 만들 수 있다는 것이 양자 우물 소자의 원리이다.

(3) 정답: 띠간격에 해당하는 파장 720 nm, 갇힘 에너지의 합 약 0.22 eV

우물 폭이 L일 때의 갇힘 에너지 합을 K라 하자. 소문항 (2)에서 $K \propto 1/L^2$이므로, 폭을 $L/2$로 줄이면 갇힘 에너지의 합은 $4K$가 된다. 따라서

$$\frac{hc}{640\ \text{nm}} = E_g + K, \quad \frac{hc}{480\ \text{nm}} = E_g + 4K$$

두 식을 빼면 $3K = hc(1/480 - 1/640)\ \text{nm}^{-1}$ 이고, $1/480 - 1/640 = 1/1920$ 이므로

$$K = \frac{hc}{3 \times 1920\ \text{nm}} = \frac{hc}{5760\ \text{nm}} = \frac{1240}{5760}\ \text{eV} \approx 0.215\ \text{eV}$$

또한 $E_g = (hc/640\ \text{nm}) - K$ 이므로

$$E_g = hc\left(\frac{1}{640} - \frac{1}{5760}\right)\ \text{nm}^{-1} = hc \cdot \frac{9-1}{5760}\ \text{nm}^{-1} = \frac{hc}{720\ \text{nm}}$$

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} = 720\ \text{nm}, \quad K = E_{1e} + E_{1h} \approx 0.22\ \text{eV} \quad (E_g \approx 1.72\ \text{eV})$$

검산하면 $E_g + K \approx 1.94\ \text{eV} \approx 1240/640\ \text{eV}$, $E_g + 4K \approx 2.58\ \text{eV} \approx 1240/480\ \text{eV}$로 두 측정값을 모두 만족한다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	양 끝이 고정된 정상파 조건과 드브로이 관계를 결합하여 파장과 운동 에너지를 자연수 n으로 옳게 나타낸 경우	1
(2)	전자와 양공의 갇힘 에너지가 각각 띠간격에 더해짐을 밝히고, 광자 에너지와 파장을 주어진 문자로 옳게 표현한 경우	2
(3)	갇힘 에너지가 $1/L^2$에 비례함을 이용해 두 측정값으로 연립식을 세우고, 띠간격에 해당하는 파장과 갇힘 에너지를 정량적으로 구한 경우	2

문제 2 p-n 접합의 공핍층과 전기 용량

전하 보존 · 전기장과 전위 · 축전기

(1) 정답: $x_p : x_n = N_D : N_A$**,** $\quad x_n = (N_A W)/(N_A + N_D)$

공핍층 안의 알짜 전하량이 0이므로, 단면의 넓이를 A라 하면

$$(eN_A)(Ax_p) = (eN_D)(Ax_n) \quad \Rightarrow \quad N_A x_p = N_D x_n$$

$$x_p : x_n = N_D : N_A$$

즉 도핑 농도가 낮은 쪽으로 공핍층이 더 넓게 뻗는다. $W = x_p + x_n$과 연립하면

$$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} W, \quad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} W$$

(2) 정답: $V_{\mathrm{bi}} = E_m W/2$**,** $\quad W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{\mathrm{bi}}}{e}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$

전기장-위치 그래프에서 그래프와 가로축이 이루는 넓이가 두 점 사이의 전위차와 같다. 그래프가 밑변 W, 높이 E_m인 삼각형이므로

$$V_{\mathrm{bi}} = \frac{1}{2} E_m W$$

한편 제시문의 관계와 (1)의 결과에서

$$E_m = \frac{eN_D x_n}{\varepsilon} = \frac{e}{\varepsilon} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} W$$

이므로 이를 위 식에 대입하면

$$V_{\mathrm{bi}} = \frac{e}{2\varepsilon} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{\mathrm{bi}}}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{\mathrm{bi}}}{e}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

(3) 정답: $C = A\sqrt{\frac{e\varepsilon}{2} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_{\mathrm{bi}} + V_R}}$

역방향 전압을 걸면 (2)의 V_{bi} 자리에 $V_{\mathrm{bi}} + V_R$를 넣으면 되므로

$$W(V_R) = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{\mathrm{bi}} + V_R)}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

이고, 평행판 축전기로 보아 $C = \varepsilon A / W$ 이므로

$$C = \frac{\varepsilon A}{W(V_R)} = A\sqrt{\frac{e\varepsilon}{2} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_{\mathrm{bi}} + V_R}}$$

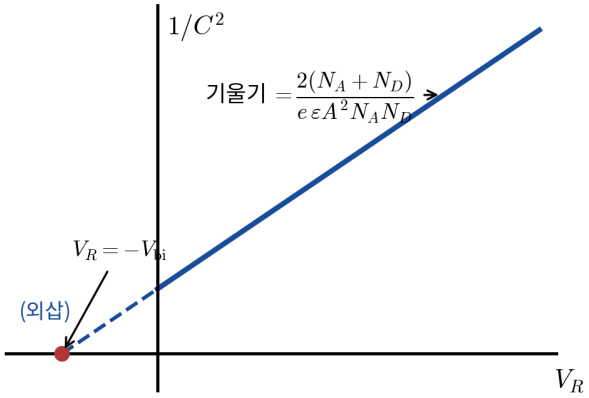
양변을 제곱하여 역수를 취하면

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(N_A + N_D)}{e\varepsilon A^2 N_A N_D}(V_{\mathrm{bi}} + V_R)$$

이므로 $1/C^2$은 V_R의 일차함수이다. 따라서 다음을 얻는다.

- **기울기** $s = 2(N_A + N_D)/(e\varepsilon A^2 N_A N_D)$ 로부터 유효 도핑 농도 $N_A N_D/(N_A + N_D)$를 구할 수 있다. 한쪽을 아주 높게 도핑한 경우($N_D \gg N_A$)에는 곧바로 낮은 쪽 농도 N_A를 얻는다.
- **가로축 절편**: 측정한 직선을 $V_R < 0$ 쪽으로 연장(외삽)하면 $1/C^2 = 0$이 되는 점이 $V_R = -V_{\mathrm{bi}}$ 이므로, 절편의 크기가 내부 전위차 V_{bi}이다.

또한 $C \propto (V_{\mathrm{bi}} + V_R)^{-1/2}$이므로 역방향 전압을 크게 할수록 전기 용량이 작아진다. 이 성질을 이용하면 전압으로 전기 용량을 조절하는 가변 용량 소자로 쓸 수 있다.



[해설 그림 3] $1/C^2$-V_R 그래프의 기울기와 가로축 절편

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	공핍층의 알짜 전하량이 0이라는 조건에서 $N_A x_p = N_D x_n$을 유도하고, 이를 W와 연립하여 x_n을 옳게 나타낸 경우	1
(2)	전기장-위치 그래프의 넓이가 전위차임을 이용해 $V_{\mathrm{bi}} = E_m W/2$를 세우고, E_m을 W로 표현하여 공핍층의 폭을 옳게 구한 경우	2
(3)	평행판 축전기 근사로 $C(V_R)$를 구하고, $1/C^2$이 V_R의 일차함수임을 보인 뒤 기울기와 가로축 절편의 물리적 의미를 각각 옳게 해석한 경우	2

제 3 회 · 반도체 소자와 회로

문제 1 브리지 정류 회로와 리플 전압

전파 정류 · 실효값 · 축전기 방전

(1) 정답: 전파 정류 파형 $v_R = V_m\,|\sin(2\pi f t)|$, $\bar{P} = V_m^2/(2R)$

그림 5에서 네 다이오드는 모두 아래쪽 꼭짓점에서 위쪽 꼭짓점으로 향하는 방향이 순방향이다. 교류 전원의 왼쪽 단자가 오른쪽 단자보다 전위가 높은 반주기에는 D_2와 D_3이, 반대인 반주기에는 D_4와 D_1이 순방향이 되어 도통한다. 어느 반주기에서든 저항에는 항상 같은 방향으로 전류가 흐르므로 저항의 양단 전압은

$$v_R(t) = V_m\,|\sin(2\pi f t)|$$

로 주기가 $T/2$인 전파 정류 파형이 된다. 소비 전력의 평균은 $\bar{P} = \bar{v_R^2}/R$이고 $\sin^2$의 시간 평균이 $1/2$이므로

$$\bar{P} = \frac{V_m^2}{2R}$$

이는 실효값이 $V_m/\sqrt{2}$인 교류를 그대로 저항에 걸었을 때와 같다. 참고로 전압의 시간 평균은 $2V_m/\pi$로, 실효값과 다름에 유의해야 한다.

(2) 정답: $\Delta V \approx V_m/(2fRC)$

축전기는 정류된 전압이 봉우리에 이를 때마다 V_m까지 충전된다. 봉우리를 지나면 다이오드는 모두 역방향이 되어 축전기가 저항으로 방전하고, 다음 봉우리가 올 때까지 걸리는 시간은 전파 정류이므로 약 $T/2 = 1/(2f)$이다.

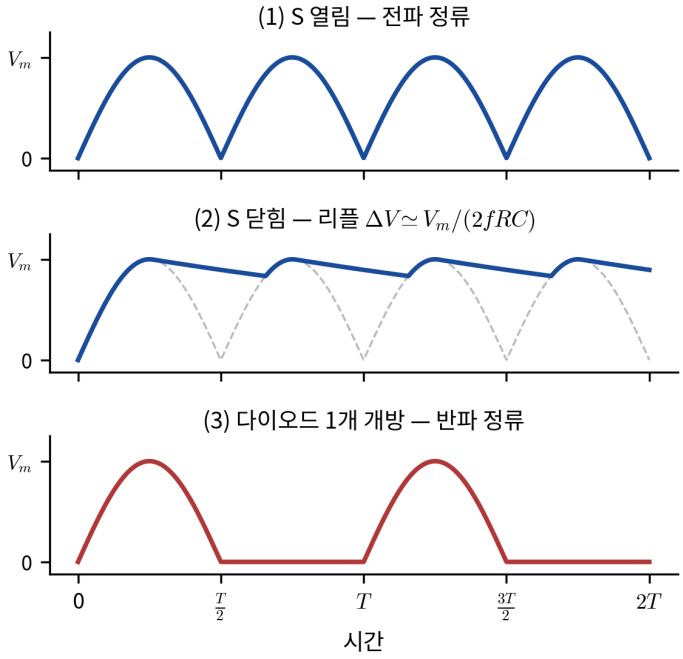
방전은 시간 상수가 RC인 지수 감소이지만 $RC \gg T$이므로

$$v_R(t) = V_m e^{-t/(RC)} \approx V_m\left(1 - \frac{t}{RC}\right)$$

로 근사할 수 있다. $t = 1/(2f)$를 넣으면

$$\Delta V = V_m - v_R\left(\frac{1}{2f}\right) \approx \frac{V_m}{2fRC}$$

같은 결과를 전하로도 얻을 수 있다. 방전 동안 저항에 흐르는 전류가 거의 V_m/R로 일정하므로 축전기가 잃는 전하는 $\Delta Q \approx (V_m/R)(1/(2f))$이고, $\Delta V = \Delta Q/C = V_m/(2fRC)$이다. RC가 클수록, 진동수가 높을수록 리플이 작아진다.



[해설 그림 4] 스위치 상태와 다이오드 고장에 따른 v_R의 파형

(3) 정답: 반파 정류가 되어 평균 소비 전력은 $V_m^2/(4R)$로 절반, 리플 전압은 $V_m/(fRC)$로 2배가 된다.

D_1은 전원의 오른쪽 단자가 높은 전위인 반주기에 D_4와 함께 도통하는 다이오드이다. D_1이 끊어지면 그 반주기에는 전류가 흐를 경로가 사라지고, 반대쪽 반주기에만 D_2-D_3을 통해 전류가 흐르는 반파 정류가 된다.

- (1)의 결과: 파형은 $v_R = V_m \sin(2\pi f t)$의 양의 반주기만 남는다. v_R^2의 시간 평균이 $V_m^2/2$에서 $V_m^2/4$로 줄어들므로 평균 소비 전력은 $\bar{P} = V_m^2/(4R)$로 절반이 된다.
- (2)의 결과: 봉우리 사이의 간격이 $T/2$에서 $T = 1/f$로 2배가 되어 방전 시간이 2배가 되므로, 리플 전압은 $\Delta V \approx V_m/(fRC)$로 2배가 된다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	반주기마다 도통하는 다이오드 쌍을 밝혀 전파 정류 파형을 옳게 그리고, 제곱 평균을 이용해 평균 소비 전력을 구한 경우	2
(2)	봉우리 사이의 방전 시간이 $T/2$임을 밝히고, $RC \gg T$ 근사(또는 전하 감소량)를 이용해 리플 전압을 옳게 유도한 경우	2
(3)	끊어진 다이오드가 담당하던 반주기에 전류 경로가 사라져 반파 정류가 됨을 밝히고, 평균 전력과 리플 전압의 변화를 각각 옳게 설명한 경우	1

문제 2 반도체의 종류 판별과 트랜지스터

자기력 · 전기력 평형 · 트랜지스터의 바이어스

(1) 정답: X는 n형 반도체이다.

전류의 방향은 $+x$이고 자기장은 $+z$방향이다. 나르개가 어느 쪽이든 자기력의 방향을 따져 보면 다음과 같다.

(i) **나르개가 전자(n형)인 경우**: 전자는 전류와 반대 방향인 $-x$방향으로 이동하므로 $\vec{v} = -v\hat{x}$이고, 자기력은

$$\vec{F} = (-e)(-v\hat{x}) \times (B\hat{z}) = evB(\hat{x} \times \hat{z}) = -evB\hat{y}$$

로 $-y$방향이다. 따라서 전자가 b면 쪽에 쌓여 b면이 음(−)전하로 대전되고, a면의 전위가 더 높아진다.

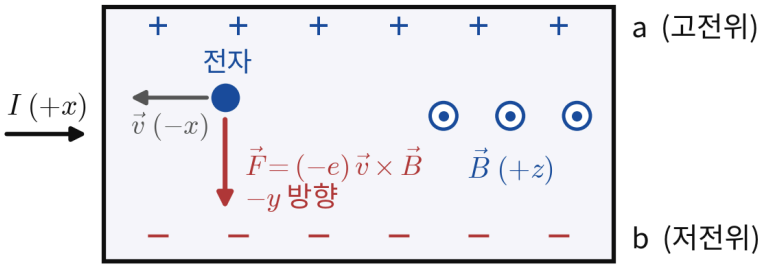
(ii) **나르개가 양공(p형)인 경우**: 양공은 전류와 같은 $+x$방향으로 이동하므로 $\vec{v} = v\hat{x}$이고, 자기력은

$$\vec{F} = (+e)(v\hat{x}) \times (B\hat{z}) = -evB\hat{y}$$

로 역시 $-y$방향이다. 이번에는 양(+)전하인 양공이 b면 쪽에 쌓이므로 b면의 전위가 더 높아진다.

측정 결과는 a면의 전위가 b면보다 높다는 것이므로 (i)에 해당한다.

> X는 **n형 반도체**이다. 나르개의 부호가 반대이면 속도의 방향도 반대가 되어 자기력의 방향은 두 경우 모두 같지만, 쌓이는 전하의 부호가 반대이므로 전위차의 부호로 나르개의 종류를 판별할 수 있다.



[해설 그림 5] n형인 경우 전자가 받는 자기력의 방향과 두 면의 대전 상태

(2) 정답: $V_H = (IB)/(net)$

정상 상태에서는 쌓인 전하가 만드는 y방향 전기장 E_y가 자기력과 균형을 이루어 나르개가 더 이상 옆으로 쏠리지 않는다. 나르개의 이동 속력을 v라 하면

$$eE_y = evB \quad \Rightarrow \quad E_y = vB$$

이고, 두 면 사이의 전기장이 균일하므로 전위차는

$$V_H = E_y w = vBw$$

이다. 한편 전류의 세기는 단면의 넓이가 wt이므로 $I = nev(wt)$에서 $v = I/(newt)$이고, 이를 대입하면

$$V_H = \frac{IBw}{newt} = \frac{IB}{net}$$

폭 w는 상쇄되고 두께 t만 남는다. 따라서 V_H를 측정하면 나르개의 밀도 $n = IB/(etV_H)$를 알 수 있다.

(3) 정답: n-p-n형. 전원 ⓐ는 베이스 쪽이 (+), 전원 ⓑ는 컬렉터 쪽이 (+)이어야 한다. $I_E = 101I_B$

(1)에서 X는 n형이므로 Y는 p형이고, 구조가 X-Y-X이므로 이 트랜지스터는 **n-p-n형**이다. 트랜지스터가 증폭 작용(활성 모드)을 하려면 베이스-이미터 접합에는 순방향, 베이스-컬렉터 접합에는 역방향 전압이 걸려야 한다.

- **전원 ⓐ (이미터-베이스 회로)**: 베이스(p형)의 전위가 이미터(n형)보다 높아야 순방향이므로, 베이스 쪽 단자가 (+)극이어야 한다.
- **전원 ⓑ (베이스-컬렉터 회로)**: 컬렉터(n형)의 전위가 베이스(p형)보다 높아야 역방향이므로, 컬렉터 쪽 단자가 (+)극이어야 한다.

이 조건에서 이미터의 전자가 얇은 베이스로 대량 주입되고, 그중 극히 일부만 베이스의 양공과 결합하며 대부분은 역방향 전압에 이끌려 컬렉터로 건너간다. 전류 증폭률이 $I_C/I_B = 100$이므로 $I_C = 100I_B$이고, 이미터 단자에서 키르히호프 법칙을 쓰면

$$I_E = I_B + I_C = I_B + 100 I_B = 101 I_B$$

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	전자와 양공 두 경우에 대해 속도의 방향과 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$를 각각 적용하여 자기력의 방향을 구하고, 쌓이는 전하의 부호로부터 전위가 높은 면을 판단하여 n형임을 논증한 경우	2
(2)	정상 상태에서 전기력과 자기력의 평형식을 세우고, 전류와 나르개 밀도·단면의 관계를 이용해 V_H를 주어진 문자로 옳게 유도한 경우	1
(3)	반도체의 종류로부터 트랜지스터의 형식을 판정하고, 활성 모드의 두 바이어스 조건에서 각 전원의 극성을 밝힌 뒤 $I_E = 101 I_B$를 구한 경우	2