

第 2 章 8：光電元件

光電元件將「光與電」連結，是顯示、感測、通訊的核心。

一、光與半導體的交互作用

光子能量

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

- h ：普朗克常數 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- c ：光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- λ ：波長

工程上常用：

$$E[\text{eV}] = \frac{1240}{\lambda[\text{nm}]}$$

兩種主要交互

1. 吸收 (Photo-absorption)

光子 $E_{\text{photon}} \geq E_g \rightarrow$ 提升一個電子到導帶 $\rightarrow$ 形成 e-h 對 - 應用：光電二極體、太陽能電池、CCD/CMOS image sensor

2. 發射 (Photo-emission)

電子從導帶躍遷回價帶 $\rightarrow$ 釋放光子 (能量 = E_g) - 直接能隙半導體 (GaAs, GaN) 效率高 - 間接能隙 (Si) 效率極低 (不能做高效 LED)

二、發光二極體 (LED)

結構

PN 接面，順向偏壓時：- 電子從 N 注入到 P - 電洞從 P 注入到 N - 在接面區復合 $\rightarrow$ 釋放光子

為什麼矽不能做 LED？

矽是「間接能隙」半導體，e-h 復合需要動量配合，效率極低。直接能隙材料才適合：

材料	E_g (eV)	主波長 (nm)	顏色
AlGaAs	1.42–2.16	880–620	紅外、紅
GaAsP	1.42–2.26	880–550	紅、橙、黃
AlInGaP	1.9–2.6	650–470	紅、黃、綠
InGaN	0.65–3.4	365–650	UV、藍、綠
AlGaN	3.4–6.2	200–365	UV

白光 LED 的兩種做法

A. 藍光 LED + 黃色螢光粉

- 結構：InGaN 藍光 LED + YAG:Ce 螢光粉
- 主流，效率高
- 演色性 CRI $\approx$ 70–95

B. 紅 + 綠 + 藍三晶 LED

- 演色性極高
- 但成本貴、體積大

LED 關鍵規格

1. 順向電壓 V_F

顏色	V_F
紅外	1.2 V
紅	1.8–2.2 V
黃綠	2.0–2.4 V
藍 / 白	3.0–3.4 V
UV	3.5–4.0 V

2. 順向電流 I_F

- 標準 5mm LED：20 mA
- 高亮度：50–100 mA
- 大功率（1W）：350 mA

- 大功率 (3W)：700 mA
- 極大功率：1A+

3. 光通量 (Lumen, lm)

衡量「人眼感知」的光量。

4. 發光效率 (lm/W)

光源	效率
白熾燈	10–15 lm/W
螢光燈	60–100 lm/W
高功率 LED	100–200+ lm/W
物理極限	683 lm/W (純 555 nm 綠光)

5. 演色性指數 (CRI)

光源還原物體真實顏色的能力，0–100。家用建議 > 80，攝影/設計 > 95。

6. 色溫 (CCT)

- 暖白：2700–3000K
- 自然白：4000K
- 冷白：5000–6500K

LED 的恆流驅動

LED 是「電流元件」， V_F 略有變化（溫度 / 製程）。直接接電壓會：低溫時電流不足，高溫時過電流燒毀。

簡易電阻限流（小功率）

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$

線性恆流

如 BJT/MOSFET 配合電流取樣回授。

開關式恆流（高效率）

LM2596、AL8805、PT4115 等專用 IC。

大功率 LED 驅動 (含 PFC)

家用 LED 球泡內部：AC → PFC → 隔離恆流 → LED。

LED 散熱

大功率 LED 的接面溫度限制 ($\sim 125^{\circ}\text{C}$)，需要：- 鋁基板 (MCPCB) - 散熱片 - 風扇 (極大功率)

T_J 過高會：- 光輸出減少 - 效率下降 - 顏色偏移 - 壽命大幅縮短

經典 LED IC 與型號

- WS2812B / SK6812：可獨立定址 RGB LED
- APA102：高速可定址
- 5050 SMD：常見白光
- CREE XP-G3：大功率冷白
- OSRAM Oslon：汽車用

三、雷射二極體 (Laser Diode, LD)

與 LED 的差別

LED 是「自發輻射」，LD 是「受激輻射」 (stimulated emission)。

LD 結構特徵：- 共振腔 (cleaved facets 或 DBR mirror) - 高摻雜 - 量子井 (Quantum Well) 增強增益

特性

- 單色 (窄頻譜)
- 相干光 (同相位)
- 高方向性
- 高功率密度

應用

- 光纖通訊：1310 nm、1550 nm DFB / VCSEL
- CD/DVD/Blu-ray：780/650/405 nm
- LiDAR：905 nm、1550 nm
- 光鼠：VCSEL

- 雷射切割 / 雕刻：高功率半導體雷射

四、光電二極體 (Photodiode)

工作原理

PN 或 PIN 接面反向偏壓，光打到接面區產生 e-h 對，被內建電場分開：- 電子流向 N 端 - 電洞流向 P 端 - 形成「光電流」

工作模式

1. 光伏模式 (Photovoltaic Mode)

零偏壓或順向，光電流產生電壓：- 雜訊低 - 速度慢 - 太陽能電池就是這個模式

2. 光導模式 (Photoconductive Mode)

反向偏壓，加大空乏區：- 速度快 - 線性度好 - 但反向漏電 + 雜訊較大

關鍵參數

1. 響應度 R (Responsivity)

每 W 光功率產生多少 A 電流：

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{light}} \quad [A/W]$$

矽 PIN @ 850 nm: $R \approx 0.5 \text{ A/W}$

2. 量子效率 η

每入射光子產生多少 e-h 對：

$$\eta = \frac{R \cdot 1.24}{\lambda[\mu m]}$$

3. 暗電流 (Dark Current)

無光照時的漏電 (pA-nA 級)。

4. 雜訊等效功率 (NEP)

最低可偵測光功率。

5. 響應頻寬

- 一般 PIN：MHz–GHz
- APD (Avalanche Photodiode)：更高靈敏度但雜訊也高
- 用於：光纖接收、雷射雷達

應用

- 光纖通訊接收端 (PIN 或 APD)
- TV 遙控接收 (IR PIN)
- 環境光感測 (手機自動亮度)
- 脈搏血氧儀 (紅光/紅外)
- 雷射雷達 LiDAR

五、太陽能電池 (Solar Cell)

結構

大面積 PN 接面 (或 PIN)，表面有抗反射膜與電極格子。

工作

陽光打到接面，產生大量 e-h 對被分離，外接負載即有電流。

關鍵參數

1. 開路電壓 V_{OC}

依材料：- Si： $\approx 0.6\text{ V}$ - GaAs： $\approx 1.0\text{ V}$ - 多接面：累加

2. 短路電流 I_{SC}

正比於光強度與面積。

3. 填充因子 (Fill Factor, FF)

$$FF = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}}$$

V_{MP}, I_{MP} ：最大功率工作點。

4. 效率 η

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in, light}}$$

各類太陽能電池效率

類型	效率（量產）	備註
單晶矽	18–24%	主流
多晶矽	16–20%	較便宜
薄膜 CdTe	15–18%	First Solar
CIGS	16–20%	
鈣鈦礦	25%+（實驗室）	新興
GaAs 單界面	28%	衛星用
多界面 III-V	47.6%（聚光）	太空

MPPT（最大功率點追蹤）

太陽能電池的 V-I 曲線在不同光照下形狀變化。最大功率點不是 V_{OC} 也不是 I_{SC} ，需要演算法追蹤。

常見 MPPT： - P&O (Perturb and Observe) - Incremental Conductance - Constant Voltage

應用

- 屋頂太陽能板（kW 級）
- 太陽能農場（MW 級）
- 衛星電源
- 計算機、手錶
- IoT 自供電（mW 級）

六、CCD / CMOS 影像感測器

CCD (Charge-Coupled Device)

- 早期主流

- 高品質，低雜訊
- 但功耗高、難整合

CMOS Image Sensor

- 現代主流（手機相機都是 CMOS）
- 低功耗
- 易整合（同一晶片上 ADC、信號處理）
- 全域快門 vs Rolling Shutter

像素結構

每個像素：- 光電二極體 - Reset 電晶體 - Source Follower - Row Select - 顏色濾波（拜耳陣列 RGGGB）

背照式（BSI）

光從背面入射，避開金屬層遮擋，提高量子效率。現代手機鏡頭主流。

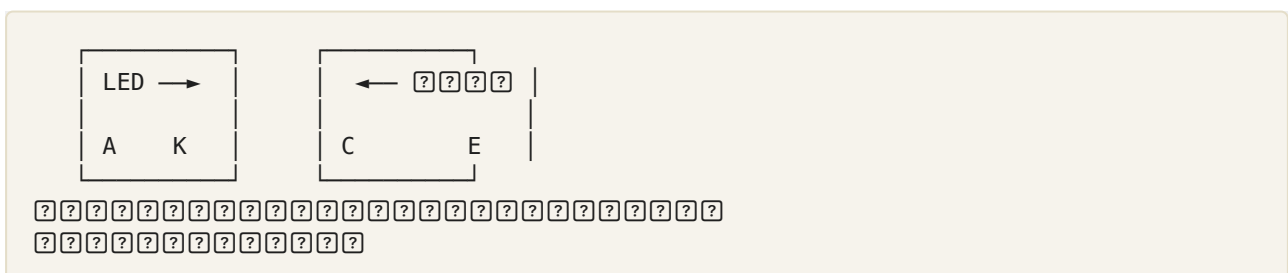
堆疊式（Stacked）

像素與處理電路分層製作再堆疊（TSV 連接），效能與密度大躍進。

七、光耦合器（Optocoupler）

結構

LED + 光電晶體 / Photodiode 在同一封裝，以光學耦合，電氣完全隔離。



應用

- 電源反饋（從次級回到初級）
- 數位訊號隔離
- 安規隔離（人機介面）

經典型號

- PC817：通用光耦
- 6N137 / HCPL2630：高速光耦（10 Mbps）
- TLP785：4 Mbps
- HCPL-3120：IGBT 隔離驅動

替代品：數位隔離器

ADI/TI 的數位隔離器（磁耦合或電容耦合）：- 速度更快（100 Mbps+）- 壽命長（光耦會老化）- 成本較高

八、光電元件選用速查

應用	推薦元件
簡易顯示	5mm LED + 限流電阻
高密度顯示	RGB LED 矩陣（WS2812B）
照明（家用 / 車用）	大功率 LED + driver IC
TV 遙控收	IR receiver module
環境光偵測	TSL2591 等模組
光纖通訊	DFB Laser + APD
LiDAR	VCSEL Laser + SPAD/APD
太陽能（屋頂）	單晶矽板
圖像感測（手機）	BSI CMOS
安全光柵	LED 對 + 光電晶體

九、本章總結

✔ 您應該理解：

- [x] 光與半導體的交互作用（吸收、發射）
- [x] 為什麼矽不能做高效 LED（間接能隙）
- [x] LED 的關鍵規格與恆流驅動需求

- [x] 雷射二極體與 LED 的本質差別
- [x] 光電二極體的兩種工作模式
- [x] 太陽能電池的 V-I 特性與 MPPT
- [x] CMOS 影像感測器的演進
- [x] 光耦合器的隔離原理

自我檢測

1. 為什麼藍光 LED 比紅光 LED V_F 高？
2. LED 為什麼需要「恆流」驅動而不是「恆壓」？
3. 光電二極體在「光伏模式」與「光導模式」差別？
4. 為什麼太陽能電池要用 MPPT 演算法？
5. 數位隔離器相對光耦的優勢？

解答

1. 藍光對應 $E_g \approx 2.7 \text{ eV}$ (InGaN)，紅光 $\approx 1.9 \text{ eV}$ (AlGaAs)。 V_F 與 E_g 相關
2. V_F 對溫度與製程敏感 (mV 級變化引起電流大變化)，恆流驅動才能精確控制亮度
3. 光伏：零偏壓，雜訊低速度慢；光導：反偏，速度快但漏電大
4. 太陽能板的最大功率點位置會隨光照、溫度變化，固定電壓無法在所有情況下取最大功率
5. 速度更快、壽命長（無 LED 光衰）、整合度高（多通道）、抗輻射

下一章

09-?????.md 一 從沙子到晶片的旅程。