



前言

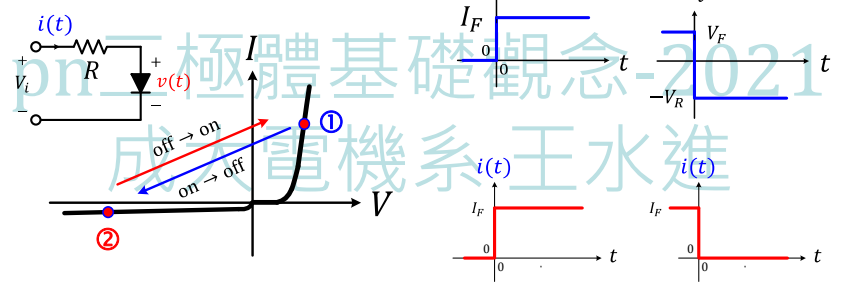
- 二極體切換操作之應用
 - ⇒ 切換式電源供應器 (switching power supply)、RF 偵測器與混頻器 (mixer) 等
- 決定 pn 介面切換速度之因素
 - 準中性區少數載子儲存電荷 → 少數載子儲存效應 (+外部切換電路設計)
 - p⁺n 單邊陡接面 → 準中性區連續方程式 → 電洞儲存電荷量 → 切換之動態行為
- 單元內容
 1. 二極體切換動態行為
 2. 開啟與關閉之暫態特性
 3. 切換過程之電流與電壓波形
 4. 二極體切換速度提升方法

pn 介面切換特性



二極體切換特性

二極體切換 ⇒ $\begin{cases} \text{off} \rightarrow \text{on} (\text{㊸} \rightarrow \text{㊶}) \\ \text{on} \rightarrow \text{off} (\text{㊶} \rightarrow \text{㊸}) \end{cases}$



理想開啟與關閉切換特性

決定二極體切換特性之因素 準中性區少數載子儲存電荷

以p⁺n陡界面二極體為例

切換過程多數載子分布之變化 切換過程少數載子分布之變化

pn二極體基礎觀念-2021
成大電機系王水進



二極體開啟(turn-on)切換之動態特性

■ p⁺n單邊陡界面 ⇒ 準中性區主導元件特性

■ 電洞連續方程式

$$\frac{dQ_p(t)}{dt} = I_p(t) - \frac{Q_p(t)}{\tau_p}$$

$$Q_p(t) = A + B e^{-\frac{t}{\tau_p}} = \tau_p I_F (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}})$$

↑ 電洞儲存電荷量

■ 開啟暫態(動態)過程二極體電流與壓降

$$I(t) = I_p(t) = \frac{dQ_p}{dt} + \frac{Q_p}{\tau_p} = I_F$$

$$= I_0 \exp\left(\frac{V}{V_T} - 1\right) \rightarrow V = V_T \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_0}\right)$$

■ 邊界條件

- t < 0 : 開關off
Q_p(t < 0) = Q_p(0⁻) = 0
- t = 0 : 開關on
Q_p(0⁻) = Q_p(0⁺) = 0

pn二極體基礎觀念-2021
成大電機系王水進

二極體開啟(turn-on)切換特性

■ 開啟過程少數載子儲存電荷量Q_p(t)

■ 暫態 Q_p(t) = τ_pI_F(1 - e^{-t/τ_p}) ← t > 0

■ 穩態 Q_p = AqL_pp_{n0}[exp(V/V_T) - 1] ← t > 5τ_p

■ 少數載子分布、儲存量與二極體壓降

$$p_n(x) = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - x_n}{L_p}\right) \quad (x \geq x_n)$$

$$Q_p = \tau_p I_F \approx AqL_p p_{n0} \exp\left(\frac{V}{V_T}\right)$$

$$V = V_T \ln \frac{I_F L_p}{Aq p_{n0} \tau_p} \approx V_T \ln \frac{I_F}{I_0} \quad I_0 \approx \frac{qD_p}{L_p} p_{n0}$$

Turn-on 切換暫態波形

少數載子濃度分布

pn二極體基礎觀念-2021
成大電機系王水進

二極體開啟時間與少數載子濃度分布

- 開啟時間 t_{on} 與擴散電容之關係 C_D

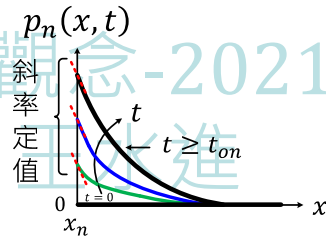
擴散電容 $\rightarrow C_D \approx A \frac{\tau_p I_F}{V_T}$

$t_{on} \approx 5\tau_p = 5 \frac{V_T}{I_p} C_D = 5\tau_a C_{Dp}$

二極體開啟時間為小訊號時間常數(交流等效電阻與擴散電容乘積)所決定

- 多餘電洞濃度分布於 $x = x_n$ 處的斜率為定值

$$\left. \frac{dp_n(x,t)}{dx} \right|_{x_n} \approx -\frac{I_F}{qAD_p}$$

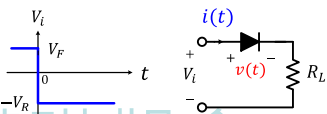
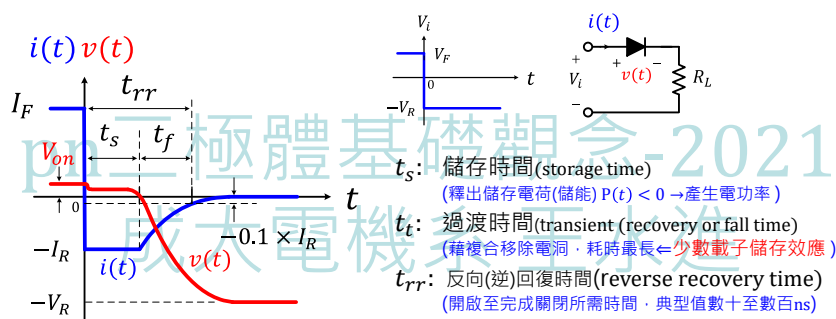


二極體關閉之暫態特性



sjwang@mail.ncku.edu.tw

二極體關閉(turn-off)切換之動態特性



- t_s : 儲存時間(storage time)
(釋出儲存電荷(儲能) $P(t) < 0 \rightarrow$ 產生電功率)
- t_t : 過渡時間(transient (recovery or fall time))
(藉複合移除電洞, 耗時最長 \leftarrow 少數載子儲存效應)
- t_{rr} : 反向(逆)回復時間(reverse recovery time)
(開啟至完成關閉所需時間, 典型值數十至數百ns)

儲存時間

- p^+n 單邊陡界面 \Rightarrow 準中性區連續方程式

$$\frac{dQ_p(t)}{dt} = i(t) - \frac{Q_p(t)}{\tau_p}$$

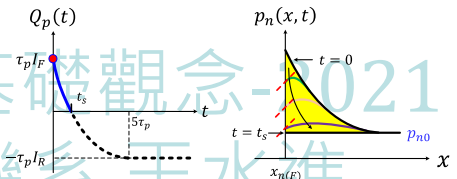
- 關閉切換之邊界條件

- $t < 0 \rightarrow i(t) = I_F \approx \frac{V_F}{R}$

- $t < t_s \rightarrow i(t) = I_R \approx \frac{V_R}{R}$

$$Q_p(0^-) = Q_p(0^+) = \tau_p I_F$$

$$Q_p(t_s) = 0$$



$$Q_p(t) = -\tau_p I_R + \tau_p (I_F + I_R) e^{-t/\tau_p}$$

$$t_s \equiv t|_{Q_p(t)=0} = \tau_p \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_R}\right)$$

下降(過渡)時間性

■ $t > t_s \Rightarrow$ 二極體進入反偏狀態

■ t_f [1, 2] \leftarrow 下降(過渡)時間

$$p_n(x, t) < p_{n0}, Q_p(t) < 0, |v(t)| \uparrow,$$

$$i(t) \approx \left(-\frac{V_R + v(t)}{R} \right) \downarrow, \text{空乏區寬度 } (x_{nF} \rightarrow x_{nR}) \uparrow$$

(fall or transition time)

■ 於 $x_{nF} \leq x \leq x_{nR}$ 區域
透過界面電容 C_j 移除電子 (多數載子)

■ 於 $x > x_{nR}$ 區域
透過擴散電容 C_{Dp} 移除電洞 (少數載子)

$i(t) \rightarrow -I_0 \leftarrow$ 藉複合機制移除電洞 \leftarrow 耗時

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_f}{\tau_p}} + \frac{e^{-\frac{t_f}{\tau_p}}}{\sqrt{\pi t_f / \tau_p}} = 1 + \frac{0.1 I_R}{I_F}$$

[1] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices* (3rd edition), Wiley, pp. 116-117, 2007.

[2] R. H. Kingston, "Switching Time in Junction Diodes and junction transistors" Proc. IRE 42, 829, 1954.

反向回復時間

■ 反(逆)向回復時間 (reverse recovery time) \leftarrow 二極體完成 on \rightarrow off 切換所需時間 [1, 2]

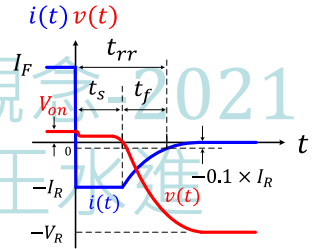
$$t_{rr} = t_s + t_f \approx \begin{cases} \frac{\tau_p}{2} \left(\frac{I_F}{I_R} \right)^2 & \text{長二極體 } (W_n \gg L_p) \\ \frac{\tau_p}{2} \left(\frac{W_n}{L_p} \right)^2 \left(\frac{I_F}{I_R} \right)^2 & \text{短二極體 } (W_n \ll L_p) \end{cases}$$

■ 完成關閉後之二極體

$$i(t_{rr}) \approx -I_0$$

$$v(t_{rr}) = -(V_R + V_{bi})$$

$$Q(t_{rr}) \approx -qAL_p p_{n0}$$



[1] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices* (3rd edition), Wiley, pp. 116-117, 2007.

[2] R. H. Kingston, "Switching Time in Junction Diodes and junction transistors" Proc. IRE 42, 829, 1954.

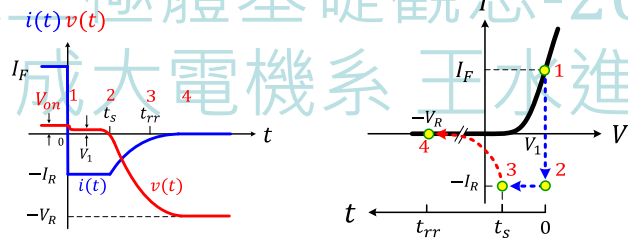
關閉切換過程工作點之變動

1. $0 \leq t \leq t_s$

$P(t) = i(t)v(t) < 0 \leftarrow$ 釋出儲存電荷(儲能)的放電所致

2. $t_s \leq t \leq t_{rr}$

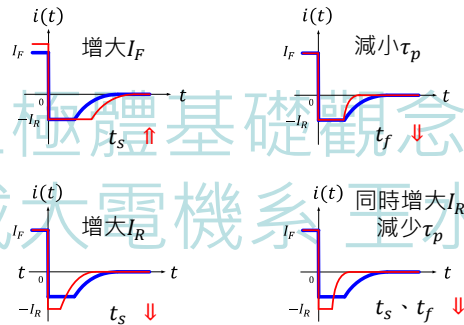
$P(t) > 0 \leftarrow$ 準中性區充電($Q_p(t) \leftarrow -qAL_p p_{n0}$)



提升二極體切換速度



I_F 、 I_R 與 τ_p 對二極體turn-off特性之影響



提升二極體切換速度方法

1. 降低摻雜濃度
2. 採用短二極體結構
降低儲存電荷量
3. 減少元件面積
4. 降低界面電容
採用pin結構
5. 避免少數載子儲存效應
(e.g., 採用Schottky diode或short diode)
6. 降低少數載子生命期
金(Au)或白金(Pt)摻雜(深能階)、高能電子注入

結語



結語

1. 電流開啟與電壓關閉下的暫態行為
→ 切換過程少數載子分布之變化
2. 準中性區少數載子儲存電荷變化
off → on (電流驅動 $0 \rightarrow I_F$)
 $Q_p(t) = A + B e^{-t/\tau_p} = \tau_p I_F (1 - e^{-t/\tau_p})$
on → off (電壓驅動 $V_F \rightarrow V_R$)
 $Q_p(t) = -\tau_p I_R + \tau_p (I_F + I_R) e^{-t/\tau_p}$
3. on → off 切換過程 = 少數載子儲存效應
 $0 < t < t_s \Rightarrow$ 釋出儲存電荷(儲能) $P(t) < 0 \leftarrow$ 產生電功率
 $t_s < t < t_{rr} \Rightarrow$ 藉複合移除電洞 \leftarrow 耗時
 $t_{rr} = t_s + t_f \Rightarrow$ 反(逆)向回復時間
 \leftarrow 開啟至完成關閉所需時間, 典型值數十至數百ns
4. 提升二極體切換速度方法
採用蕭基或短二極體以避免或有效減少少數載子儲存效應
降低少數載子生命期
縮小元件面積等。