



# IGBT 雙脈沖測試方法介紹

## Double pulse test

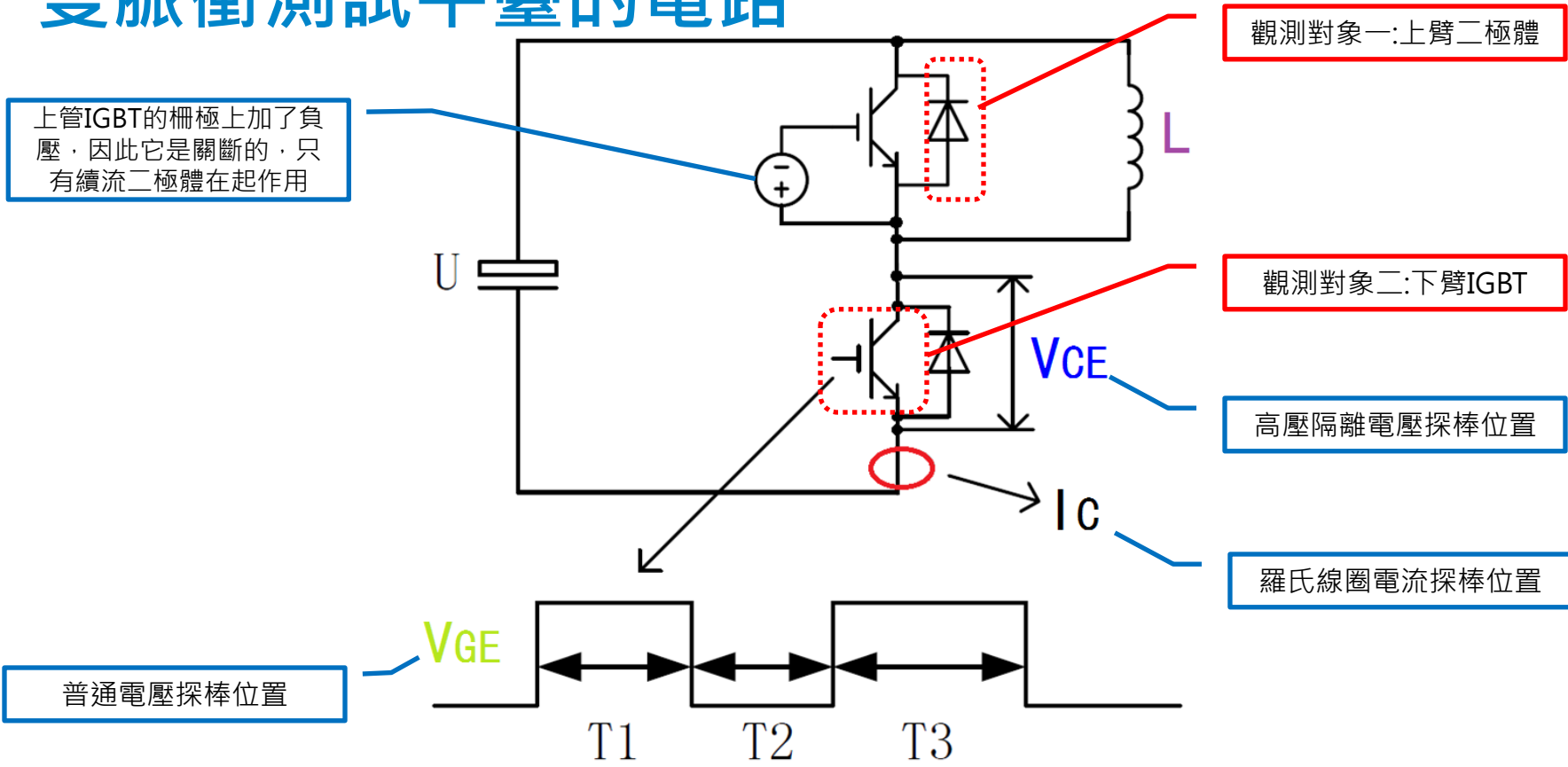
Romeo Fan, FAE

# 認識IGBT的特性

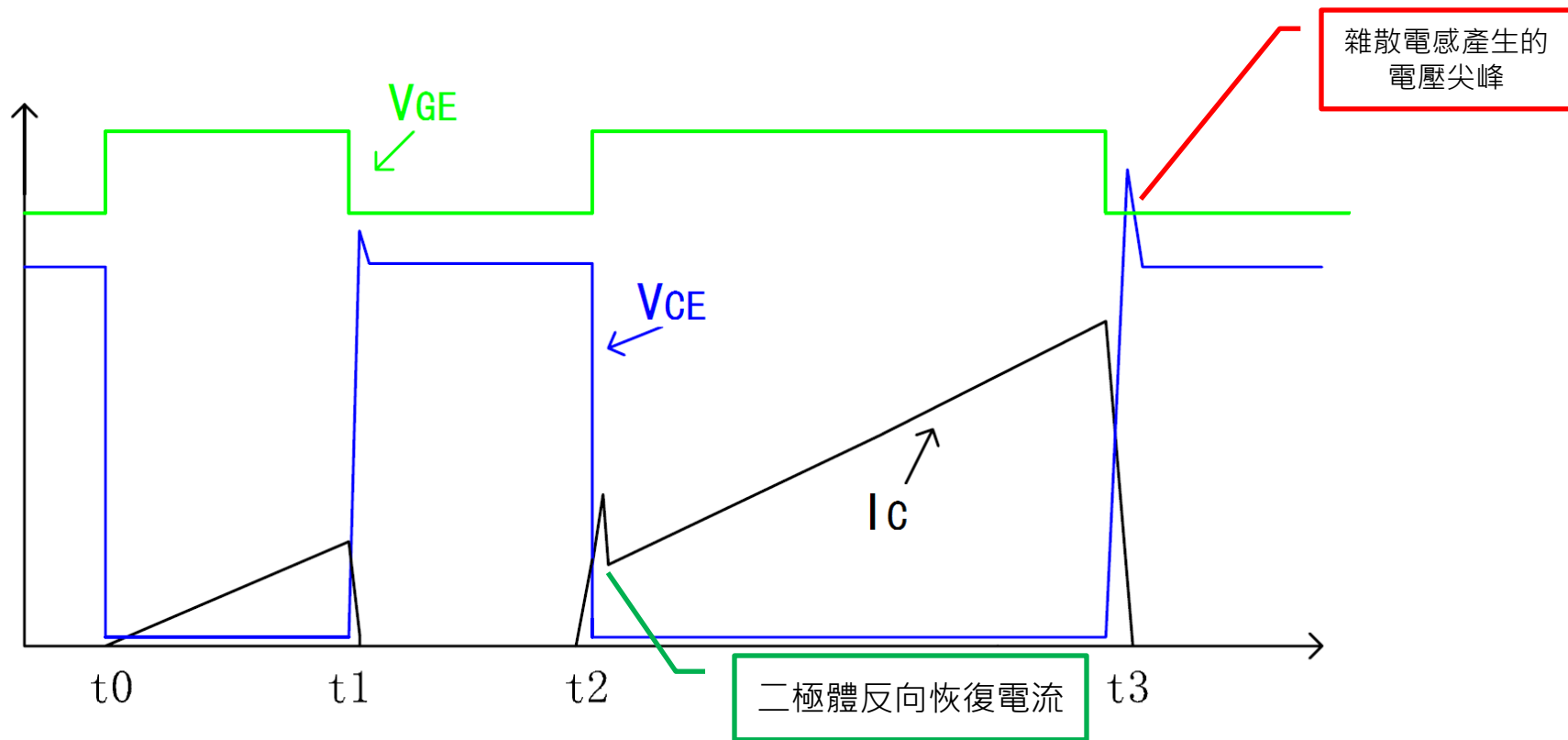
- 對比不同的IGBT的參數，例如同一品牌的不同系列的產品的參數，或者是不同品牌的IGBT的性能。
- 獲取IGBT在開關過程的主要參數，以評估 $R_{Gon}$ 及 $R_{Goff}$ 的數值是否合適，評估是否需要配吸收電路等。
  - ▶ 通常我們對某款IGBT的認識主要是通過閱讀相應的datasheet，但實際上，資料手冊中所描述的參數是基於一些已經給定的外部參數測試得來的，而實際應用中的外部參數都是個性化的，往往會有所不同，因此這些參數有些是不能直接拿來使用的。我們需要瞭解IGBT在具體應用中更真實的表現。
- 考量IGBT在變換器中工作時的實際表現。例如二極體的反向恢復電流是否合適，關斷時的電壓尖峰是否合適，開關過程是否有不合適的震盪等。
- 測量母排雜散電感

要觀測這些參數，最有效的方法就是：“雙脈衝測試方法”。

# 雙脈衝測試平臺的電路



# 雙脈衝測試的基本實驗波形

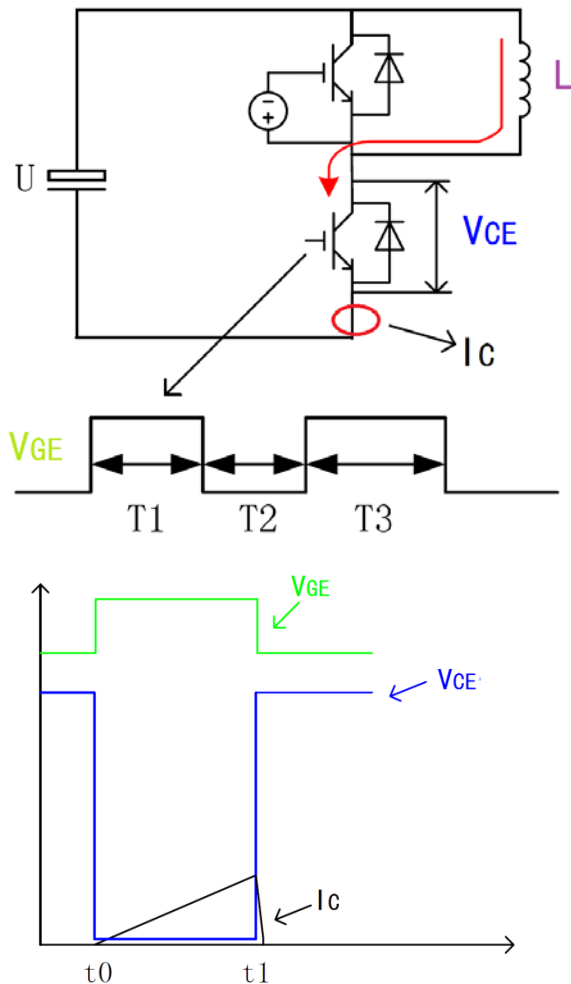


# 雙脈衝實驗的基本原理 ( 1 )

- 在 $t_0$ 時刻，柵極放出第一個脈衝，被測IGBT飽和導通，電動勢 $U$ 加在負載 $L$ 上，電感的電流線性上升，電流表示式為：

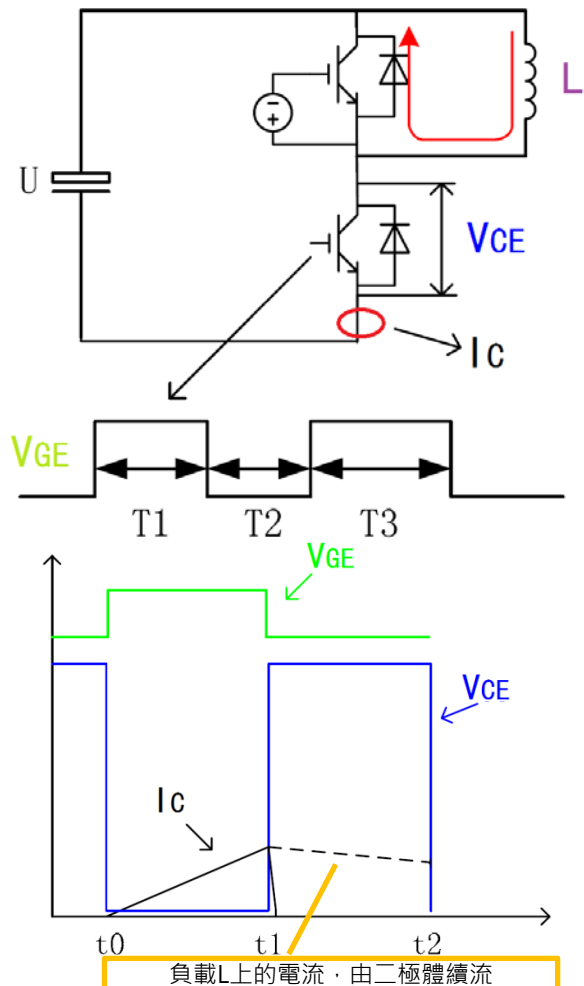
$$I = \frac{U * t}{L}$$

- 在 $t_1$ 時刻，電感電流的上升斜率由 $U$ 和 $L$ 決定，在 $U$ 和 $L$ 都確定時，電流的數值由 $t_1$ 決定，時間越長，電流越大。因此可以自主設定電流的數值。



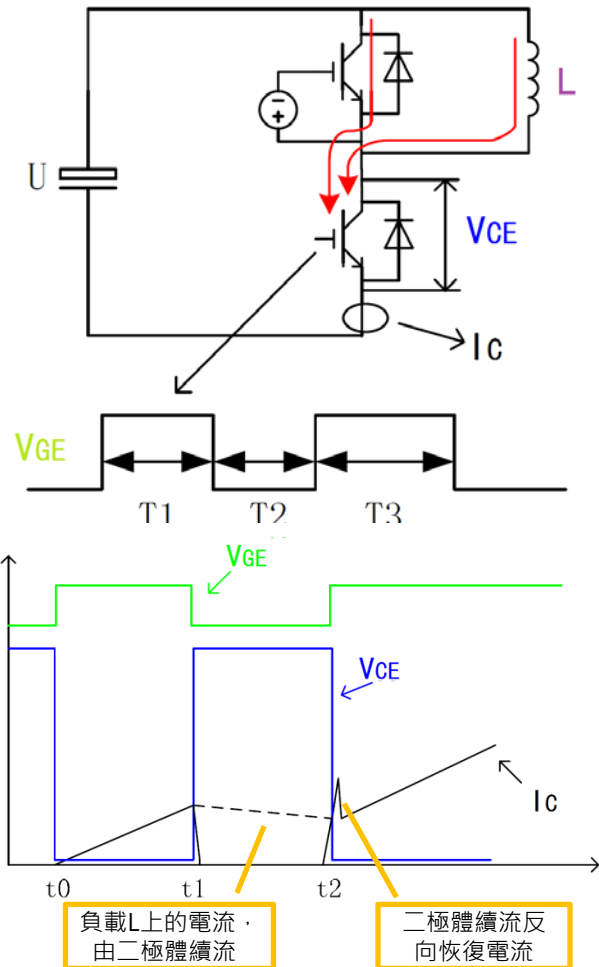
## 雙脈衝實驗的基本原理 ( 2 )

- 在 $t_1$ 時刻，被測IGBT關斷，負載 $L$ 的電流由上臂二極體續流該電流緩慢衰減如圖虛線所示。
- 由於電流探棒放在下臂的射極處，因此，在二極體續流時，IGBT關斷，示波器上是看不見該電流的。



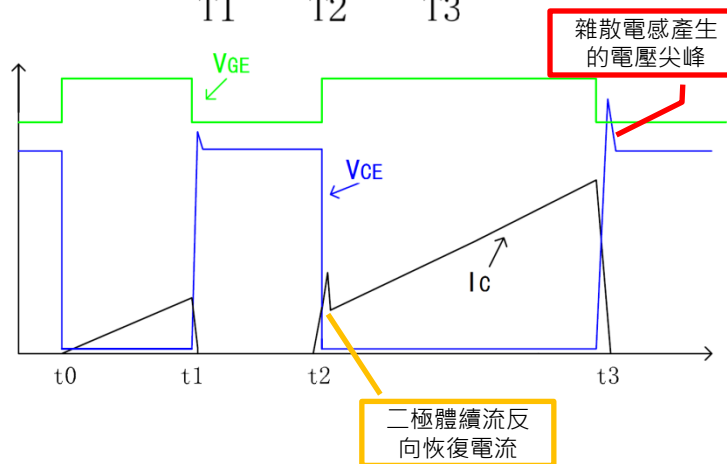
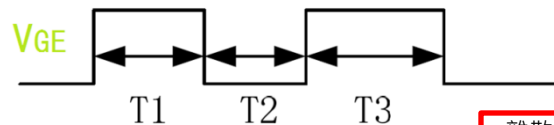
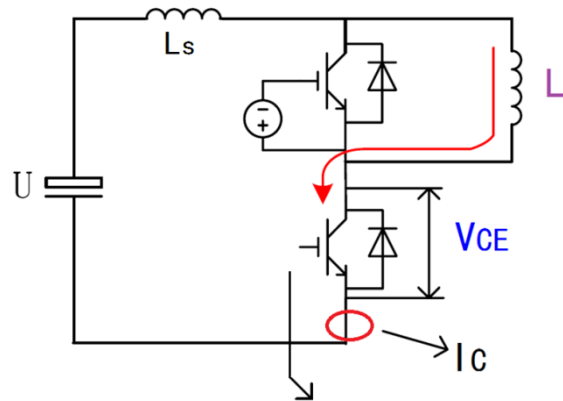
# 雙脈衝實驗的基本原理 ( 3 )

- 在 $t_2$ 時刻，第二個脈衝的上升緣到達，被測IGBT再次導通續流二極體進入反向恢復導通，反向恢復電流會穿過IGBT，在電流探棒上能捕捉到這個電流，如圖所示。
- 在 $t_2$ 時刻，重點是觀察IGBT的開通過程。反向恢復電流是重要的監控物件，該電流的形態直接影響到換流過程的許多重要指標。



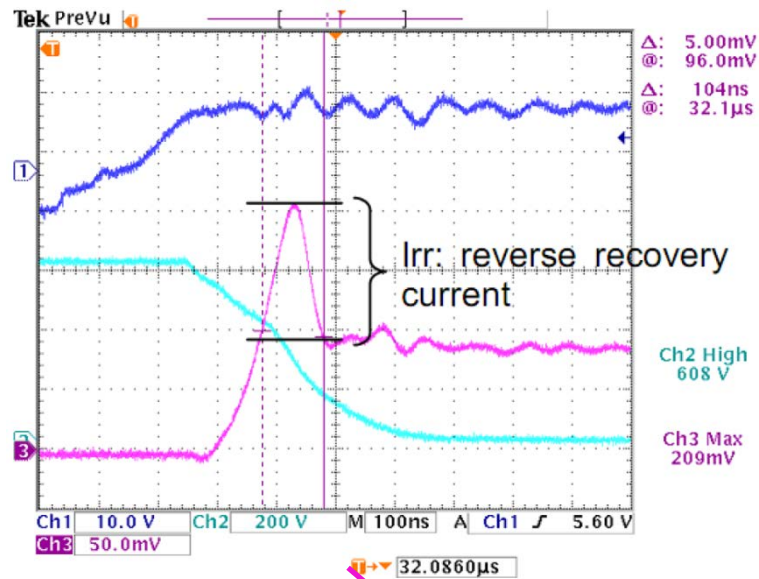
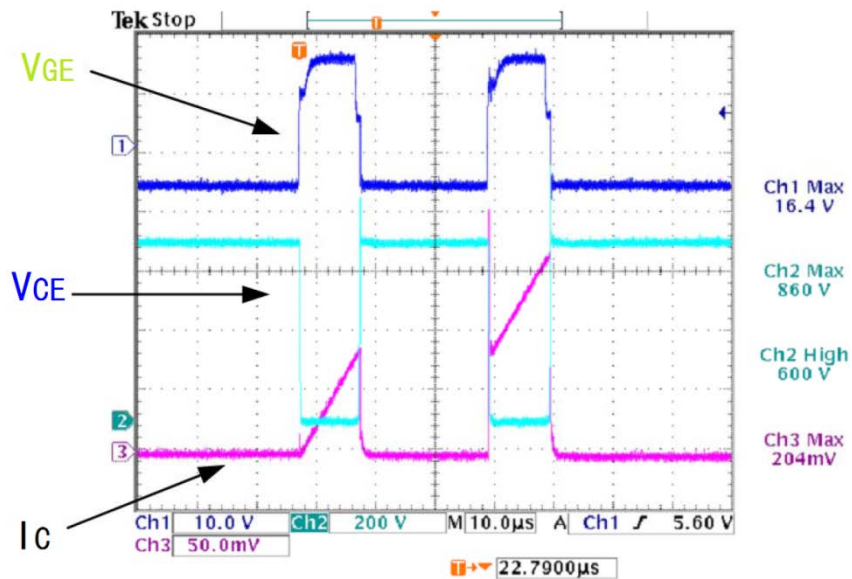
# 雙脈衝實驗的基本原理 ( 4 )

- 在 $t_3$ 時刻，被測IGBT再次關斷，此時電流較大，因為母線(DC - Link)雜散電感的存在，會產生一定的電壓尖峰。
- 在 $t_3$ 時刻，重點是觀察 IGBT的關斷過程。電壓尖峰是重要的監控物件。同時關斷之後電壓和電流是否存在不合適的震盪，也是需要注意的觀察對象。





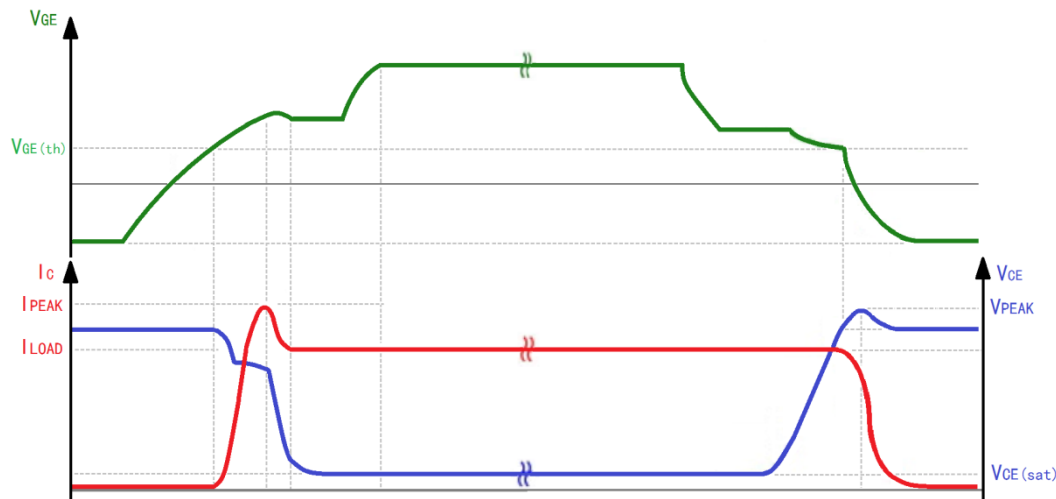
# 雙脈衝實驗的實測波形



第二次開通局部放大

# 雙脈衝實驗的關注點----開通過程

- 右圖是IGBT典型的開通波形，當柵極電壓到達門檻值時，IGBT導通， $I_c$ 開始增長，直到 $I_c$ 基本到達電感電流的數值，續流二極體進入反向恢復後，IGBT的 $V_{CE}$ 才開始下降，反向恢復過程結束後，續流二極體截止， $V_{CE}$ 到達飽和值，換流過程完成。



# 雙脈衝實驗的關注點----開通過程

## ■ 右圖是IGBT實測開通波形，我們需要關注的點是：

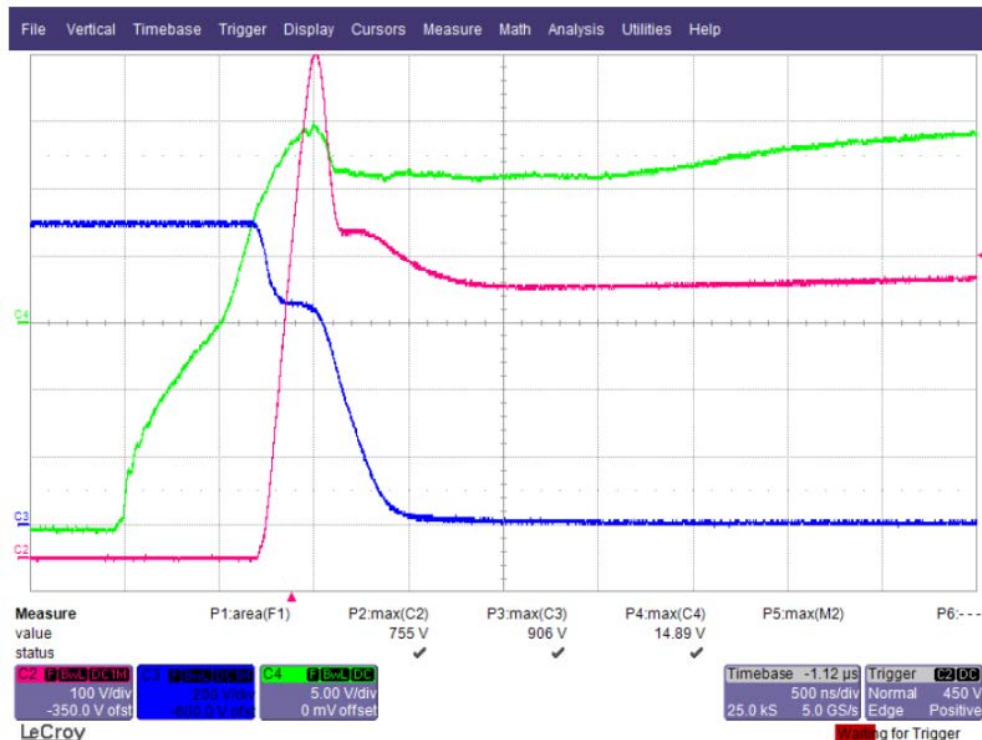
- ▶ 二極體的反向恢復電流的 $di/dt$ 。
- ▶ 二極體的反向恢復電流的峰值。
- ▶ 反向恢復後電流是否有震盪，拖尾有多長。
- ▶  $V_{ce}$ 電壓是否正確變化
- ▶ 測算出損耗，(依賴示波器功能)

紅線: $I_C$

藍線: $V_{CE}$

綠線: $V_{GE}$

- ## ■ 調整柵極電阻 $R_{Gon}$ 可以強烈地影響該過程，用以確定 $R_{Gon}$ 的數值是否合適。

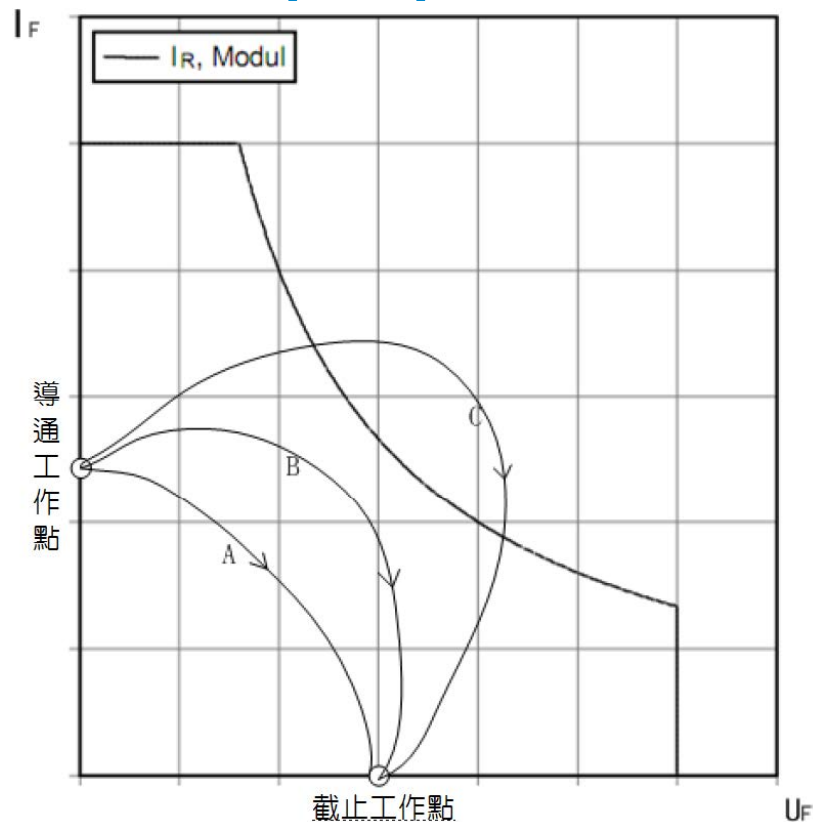


# 關於二極體的討論

- IGBT中的續流二極體，實際上是一個非常重要的元件，但往往容易被忽視。請注意以下幾條：
  - ▶ 在IGBT開通的時刻，實際上是續流二極體關斷的時刻。
  - ▶ 所有的功率半導體，包括IGBT晶片和二極體晶片，在關斷的時刻面臨的風險遠大於其開通時面臨的風險。換句話說，在IGBT關斷的時刻，IGBT晶片的損壞風險是最大的；在IGBT開通的時刻，二極體晶片的損壞風險是最大的。
  - ▶ IGBT晶片出現短路時，驅動器可以幫忙保護；但二極體晶片損壞時，沒有其他的防護手段

# IGBT開通過程中二極體的風險點（1）

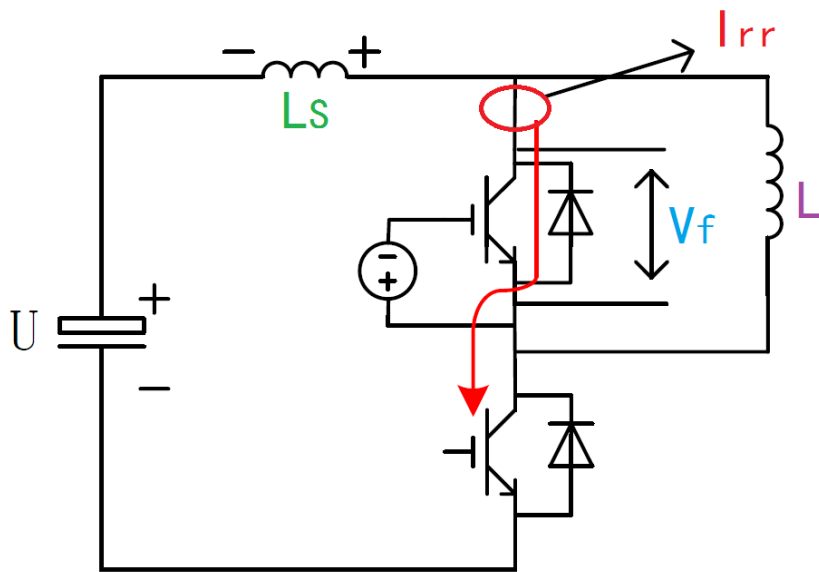
- 右圖是二極體的安全工作區的示意圖。實際上這是一條恒功率曲線。
  - ▶ 其意義是：二極體在反向恢復過程中，其暫態功率不能超過規定的數值，否則就有損壞的風險。
  - ▶ 因此，二極體的暫態功率是重要的判斷標準。
  - ▶ 二極體在反向恢復的過程中，實際上其工作點從導通過度到截止。其工作點的運動軌跡有多種選擇，如右圖所示。顯然，軌跡A是最安全的，軌跡C則是危險的。



# 二極體的風險點的測試方法

## ■ 右圖是 $I_{rr}$ 評估二極體的方法的示意圖：

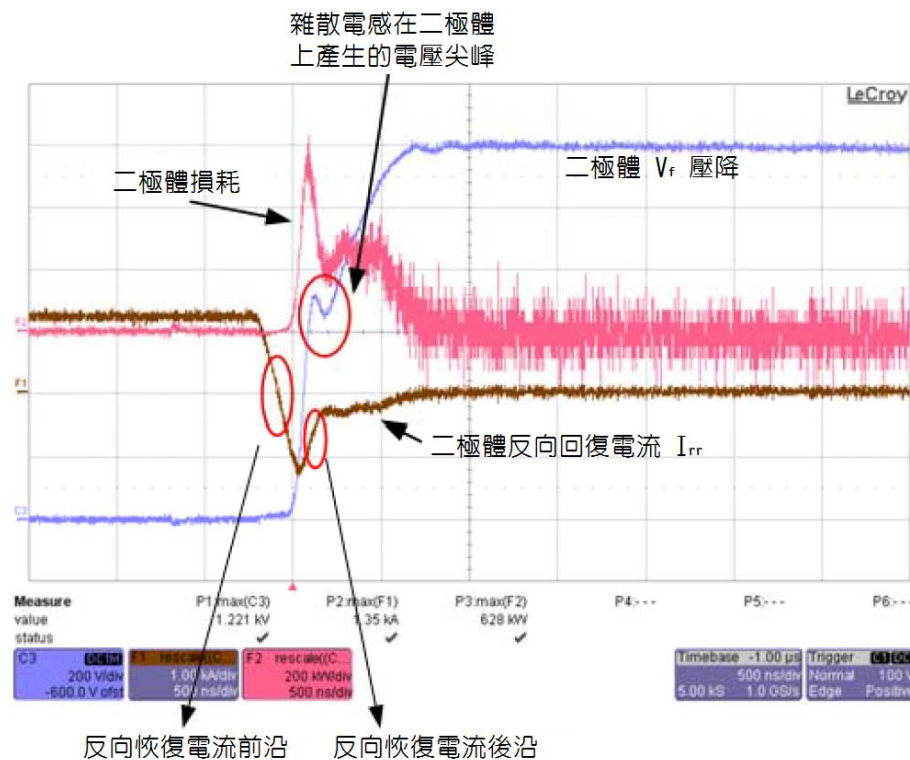
- ▶ 將電流探頭加在上管IGBT的集極；
- ▶ 將電壓探棒加在上管IGBT的CE極間；
- ▶ 將電壓及電流的瞬時值的積做為一個函數通道，表示二極體的暫態功率；
- ▶ 用示波器捕捉上管二極體的反向恢復時刻



# IGBT開通過程中二極體的風險點（2）

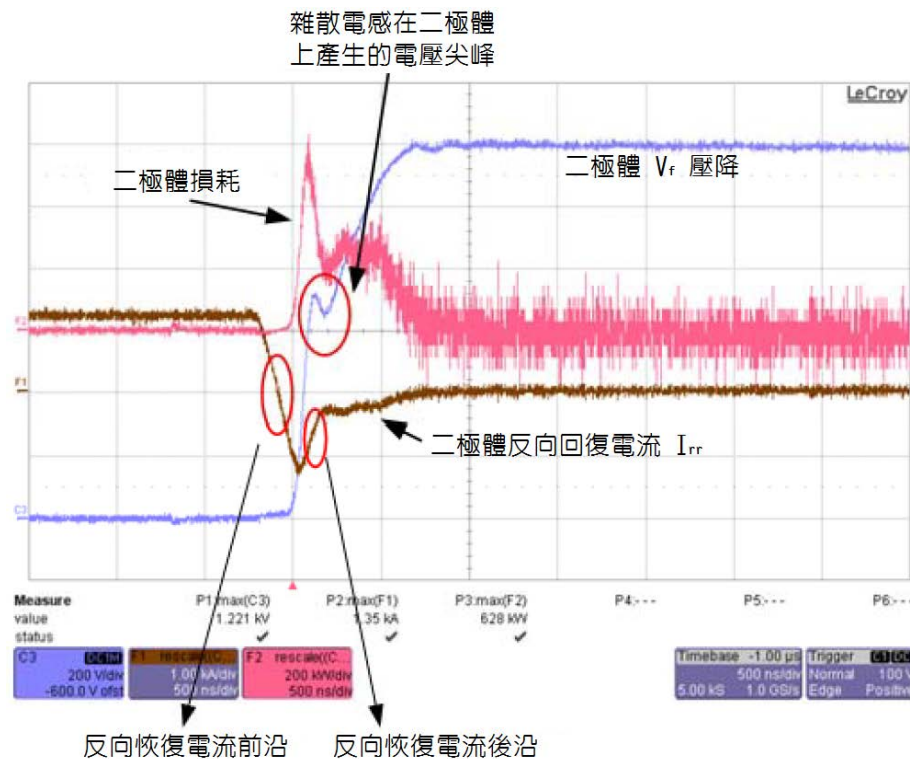
- 右圖表示的是二極體反向恢復時，實測的電壓及電流波形，同時利用示波器計算出暫態功率的波形。

- ▶ 二極體反向恢復電流上升時，雜散電感上產生的電壓是與母線電壓相抵的。反向恢復電流下降時，雜散電感電壓與母線電壓同向，電壓落在二極體上，二極體出現電壓尖峰，風險加大。如果雜散電感比較大，二極體就更加危險了，容易跑出安全工作區。



# IGBT開通過程中二極體的風險點（3）

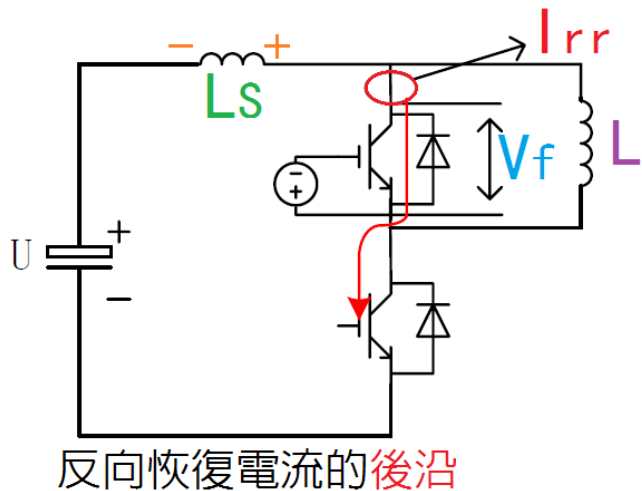
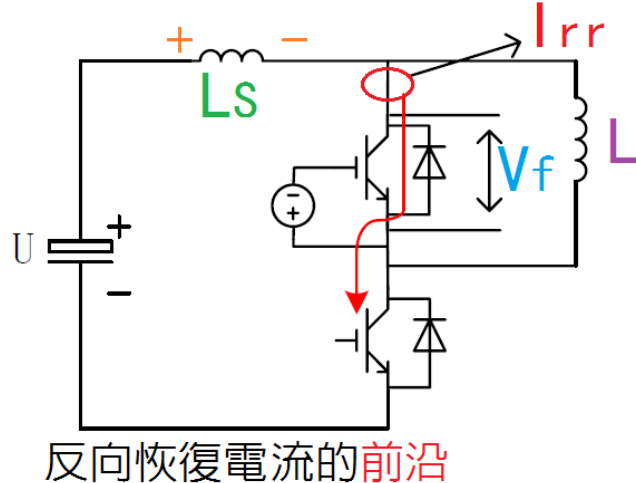
- 二極體的電壓尖峰是由於雜散電感與二極體反向恢復電流的後沿相作用而產生的。所以減小直流母排的雜散電感及優化反向恢復電流的後半沿的斜率都可以有效提高二極體的安全餘量。
- 圖中紅色線為二極體的暫態功率，在二極體反向恢復電流達到最大值後，二極體的功率也達到最大值，如果此時二極體電壓尖峰明顯，則二極體損壞的風險將大大增加，因此雜散電感大小對二極體意義也很大。





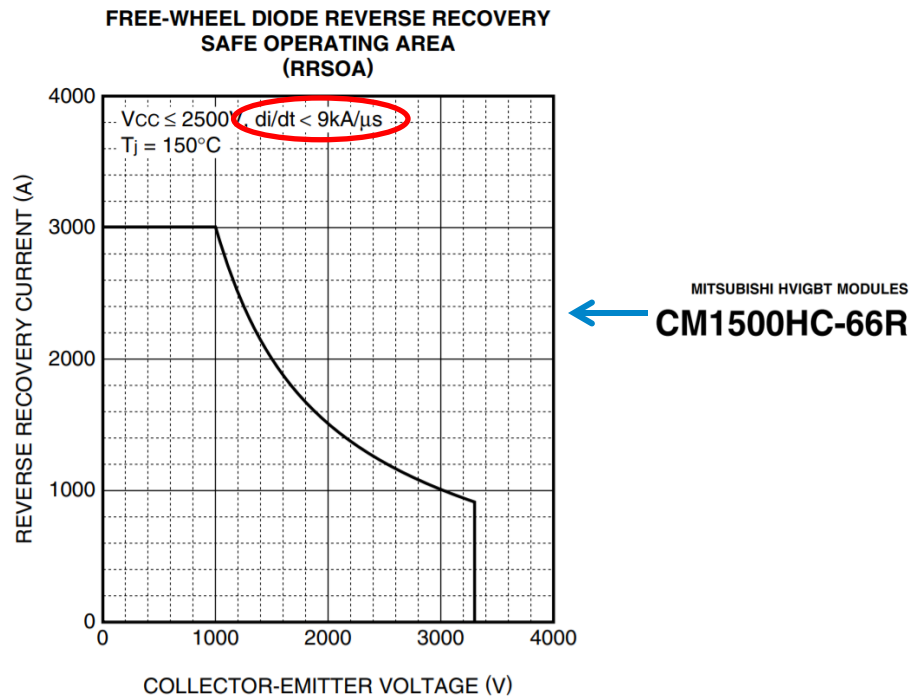
## 二極體的風險點---小結

- 二極體的反向恢復電流的前沿對應在雜散電感上產生的電壓方向是與母線電壓相抵的，因此沒有風險
- 反向恢復電流的後沿對應在雜散電感上產生的電壓的方向與母線電壓相同，二極體會承受此電壓尖峰，同時也會出現暫態功率的尖峰，因此是最危險的時刻



# IGBT開通過程中二極體的風險點（4）

- 通常在IGBT的datasheet中，關於二極體的部分會注明反向恢復電流的最大的 $di/dt$ 水準，通常不能超過這個數值。否則可能導致反向恢復電流震盪。在右圖該邊界為 $9kA/\mu s$ 。
- 二極體反向恢復電流的的形狀主要取決於IGBT廠商的設計，其前沿的斜率及後沿斜率在很大程度上受 $R_{Gon}$ 的影響。一旦增大 $R_{Gon}$ ，反向恢復電流則會緩和很多。在大功率的場合，通常需要追求的二極體的柔軟度，而這主要體現在反向恢復電流的後沿的形狀上。



Rückstromspitze Peak reverse recovery current	$I_F = 1800 \text{ A}$ , $di/dt = 9100 \text{ A}/\mu\text{s}$ ( $T_{vj}=175^\circ\text{C}$ )	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 175^\circ\text{C}$	$I_{RM}$	1350 1600 1800	A A A
--	--	---	----------	----------------------	-------------

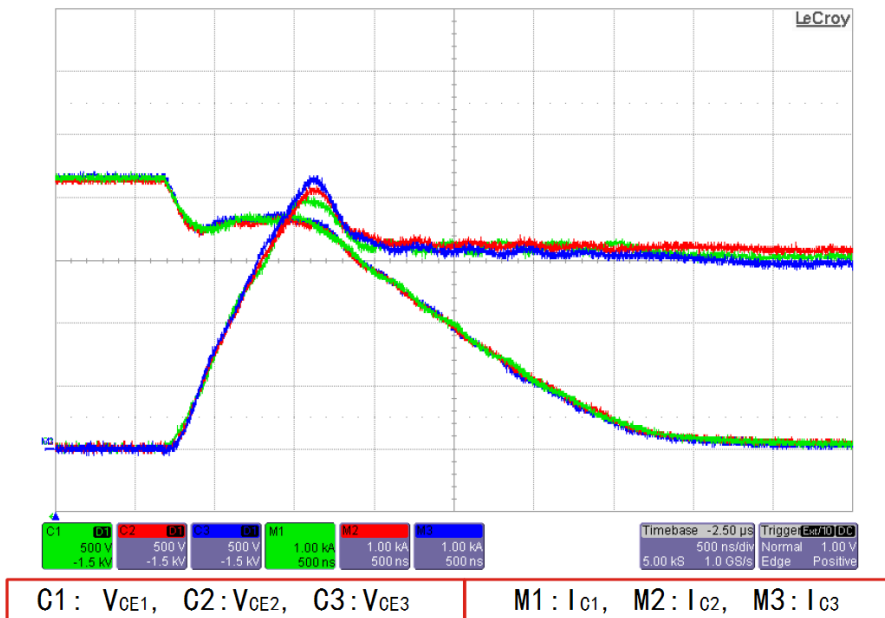
FF1800R17IP5P

# 續流二極體的風險與外部參數的關係

- 在外部參數發生變化時，二極體的風險也在發生變化，在此，我們舉個參數，
  - ▶ 接面溫度(Junction Temperature)
  - ▶ 續流電流的大小
  - ▶ DC Link母線電壓的高低
    - 當接面溫度越低，二極體的速度越快，反向恢復電流後沿也越陡峭，產生的電壓尖峰也越高，情況越惡劣；
    - 二極體關斷大約10%的額定電流時，其關斷時的功率會出現最高峰，關斷1倍額定電流時，功率次之，關斷2倍額定電流時，功率再次之；也就是說，電流越小，情況越惡劣；
    - 母線電壓越高，情況越惡劣

# 通過開通過程觀察並聯的動態均流水平

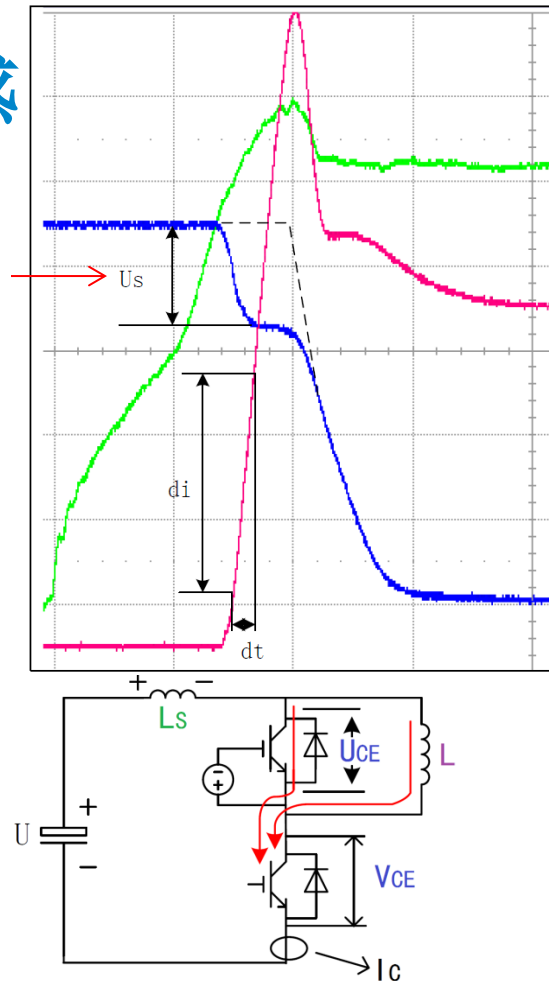
- 在IGBT開通時， $R_{Gon}$ 的影響很大，它可以影響 $di/dt$ 的速度反向恢復電流的峰值，進而決定開通損耗。所以確定 $R_G$ 最好的方法，是靠雙脈衝測試法動態調試該參數。下圖是在3個IGBT並聯的情況下測試的開通波形，M1、M2、M3分別為3個IGBT的 $I_C$ 。用此方法可以很準確的測試出動態均流的情況。從而進行動態均流調試。



# 利用開通過程測量主電路雜散電感

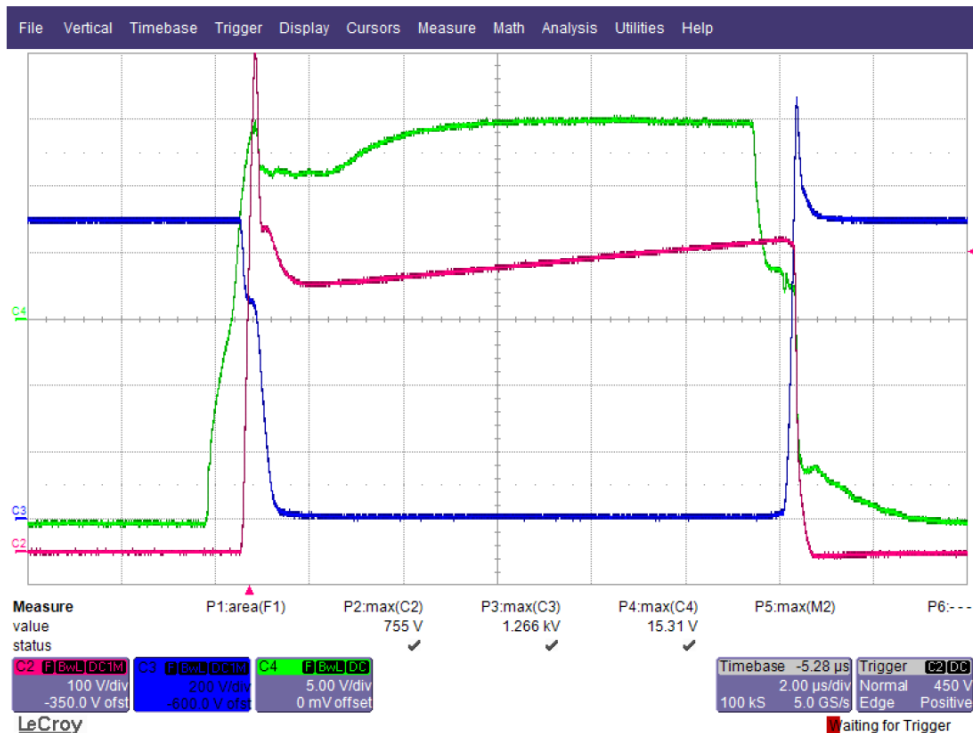
- 在IGBT開通時， $I_c$ 開始增長，而此時上臂IGBT的續流二極體處於反向恢復，該二極體沒有阻斷能力，上臂 $U_{CE}=0$ 。
- 在 $I_c$ 開始增長時，雜散電感上感應的電壓的 $U_s$ 方向如圖所示，是與母線電壓相反的，所以此時在下管的 $V_{CE}$ 上測得的波形出現了一個缺口如右圖波形中的虛線所示這個缺口。電壓產生的原因是雜散電感抵消了一部分母線電壓。也就是說，缺口的電壓是雜散電感上的感應電壓。
- 從示波器上讀出 $U_s$ ，再讀出 $di/dt$ ，代進算式，就能算出雜散電感 $L_s$ 的數值。這個模型是比較準確的因此得出的資料比較可靠。

$$U_s = L_s * \frac{di}{dt}$$



# 雙脈衝實驗的關注點----關斷過程

- 關斷過程的關注點為 $V_{CE}$ 的電壓尖峰，它是直流母線雜散電感與 $di/dt$ 的乘積，通過觀察這個尖峰可以評估IGBT在關斷時的安全程度。
- $V_{CE}$ 尖峰一般都客觀存在，在短路或者超載時，這個尖峰會達到最高值，比正常工作時要高得多，通常可以使用有源鉗位元電路 (Active-Clamping) 進行抑制。



# 對關斷過程中電壓尖峰的認識

- 通常在大功率的IGBT的應用中，有源鉗位的功能是非常必要的，而功率越小，必要性越低。其原因是隨著系統的功率變大，IGBT的 $di/dt$ 會增大，且雜散電感也會越大，因此電壓尖峰會越高。
- 下表說明不同IGBT在關斷額定電流時的 $di/dt$  的水準(從 $d_h$  中計算出):

IGBT 型號	關斷額定電流時的 $di/dt$
FF150R12KT4	1500A / $\mu$ s
FF1400R12IP4	7000A / $\mu$ s
FZ2400R17KE3	15000A / $\mu$ s

- 在IGBT短路時，關斷短路電流的 $di/dt$ 會更高，比關斷額定電流要高很多，因此短路時電壓尖峰更高。所以有可能出現，驅動器發現了IGBT的短路現象，並且也及時關斷，但是由於 $di/dt$ 太高，產生了非常高的電壓尖峰，在關斷該短路電流後仍然可以打壞了IGBT。這時，有源鉗位電路就非常必要。
- 假設母排雜散電感為100nH，則在7000A/ $\mu$ s的電流變化率下，電壓尖峰將高達700V。

# 怎樣科學準確地確定驅動電阻和柵極電容

- 雙脈衝實驗中，可以準確地觀察到半導體晶片在某種溫度下的開通或者關斷行為，與真實的某種應用相比，其結果具有極高參考價值，可以這樣說，在該實驗中表現出來的行為，就是IGBT在實際應用中的行為。
  - ▶ 在做開通測試時，IGBT的開通速度，會極大地影響二極體的安全程度及損耗的大小可以據此調整出合適的開通電阻 $R_{Gon}$ ；
  - ▶ 在做關斷測試時，IGBT的關斷速度，可以決定IGBT是否超出RBSOA（安全工作區）及損耗的大小可以據此調整出合適的關斷電阻 $R_{Goff}$ ；
  - ▶ 柵極電容 $C_{GE}$ 對於不同的IGBT，有很不一樣的影響，不是所有IGBT都需要 $C_{GE}$ ，不能盲目添加，通過校核開通及關斷來確定其取值是最為科學的方法



# 為什麼要用雙脈衝，單脈衝不行嗎？

- 在大部分電力電子裝置中，負載的電感量都比較大，在IGBT關斷後，電感電流不會斷流，二極體會一直續流，在此時開通IGBT，會有二極體的反向恢復過程。而單脈衝實驗中是沒有二極體反向恢復過程的，因而雙脈衝實驗比單脈衝實驗真實。
- 但是單脈衝實驗可以充分觀察關斷過程，如果只需要觀察關斷過程，則單脈衝實驗也是可以的。

# 實驗前的計算工作

- 在這個實驗中，涉及4個物理量：

- ▶ 母線電壓(U)
- ▶ 電感電流(I)
- ▶ 電感量(L)
- ▶ 脈沖寬度(t)

- 關係式為:

$$I = \frac{U * t}{L}$$

- 我們以FF1000R17IE4為被測對象，來做一次計算

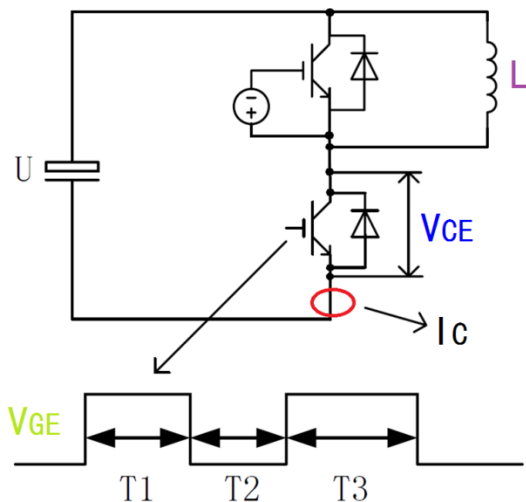
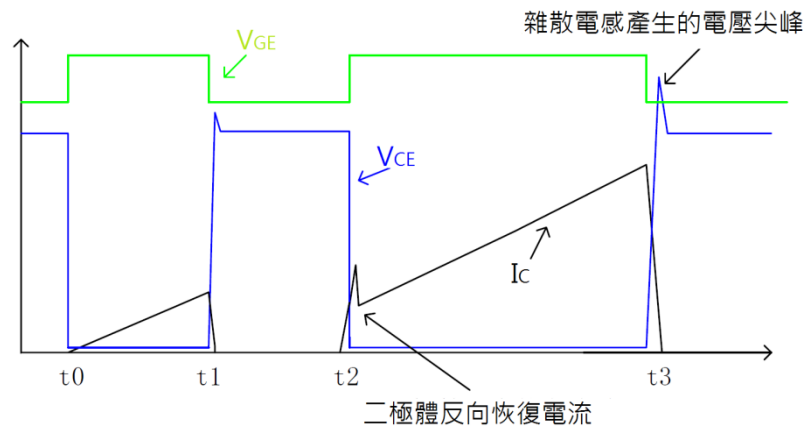
# 實驗前的計算工作

- U取IGBT的額定母線電壓:1100V
- I取此IGBT的安全工作區的邊緣：2000A
- L則取實驗室條件下可簡單繞制的空心電感：28μH

代入

$$I = \frac{U * t}{L}$$

- 得 $t=51\mu\text{s}$
- 從圖可知，要使電流在第二個脈衝關斷時到達2000A，則2個脈衝的寬度之和為：
- $T1+T3=51\mu\text{s}$



# 實驗前的硬體準備工作

## ■ 我們需要的硬體包括：

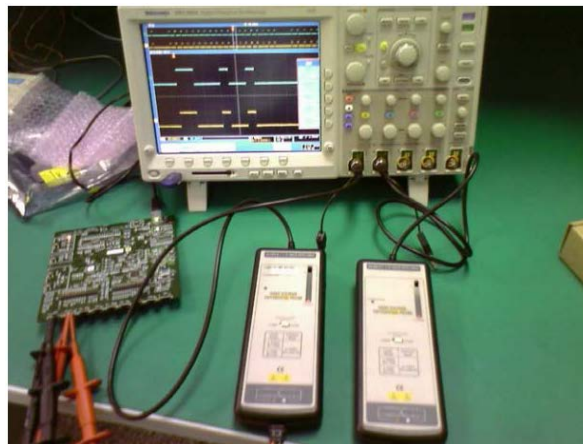
- ▶ 高壓電源
- ▶ 電容組
- ▶ 疊層直流母排
- ▶ 負載電感（可以自己繞制，不要飽和即可）
- ▶ 被測IGBT及驅動電路
- ▶ 示波器（最好是4通道，高頻寬）
- ▶ 高壓差分電壓探棒
- ▶ 羅氏線圈電流探棒
- ▶ 可程式化信號發生器或簡易信號產生裝置（發出一組雙脈衝信號）

# 實驗儀器及硬體

- 羅氏線圈電流探棒



- 多通道示波器及高壓隔離探棒



- 手工繞制的空心電感：



# 雙脈衝測試實驗台

- 對於開發電力電子裝置的工程師，無須專門搭建測試平臺，直接使用正在開發中的變流器即可。在該平臺上得到的資訊可以充分反映實際應用變流器的情況。

