

職業訓練教材 異質異能之工作特性 - IGBT

編號：PEN-PET0604

編者：賴世雄

審稿者：唐錫惠

主辦單位：行政院勞工委員會職業訓練局

刊製單位：中華人民職業訓練研究發展中心

刊製日期：九十年十一月

單元 PEN-PET0604 學習指引

在你學習本單元之前，你應該先了解 PN 半導體、電晶體的特性，並且對三用電表（或稱萬用電表）、電源供應器、信號產生器及示波器有著基本操作的認識。

如果你自認自己的程度尚可的話，請翻到下一頁開始學習。但如果你認為自己仍有不夠熟悉之處，請將本教材放回原位，並取出編號 PEB0139（辨認及選用電晶體）、PEB0140（辨認及選用場效電晶體）、PEB0407（使用示波器觀察電路波形）、PEB0408（使用示波器測量波形電壓）、PEB0409（使用示波器測量波形頻率）、PEB0410（使用示波器觀測波形相位）、PEB0411（使用電源供應器以提供電子電路適當電源）及 PEB0414（使用函數信號產生器檢修電路）教材開始學習，或是請教你的老師。

引言

電力電子技術是結合功率半導體元件的開關控制電路、拓樸結構的設計與系統控制的一門綜合性科目。其目的就是利用功率半導體元件對電源加以轉換與控制，以符合各種負載的需求。近年來，電力電子技術的進步得以實現，元件的快速發展乃是主要的關鍵。

IGBT 的輸入端為 MOS 架構，輸出端為 BJT 架構，因此，該元件具有 BJT 的大電流、低飽和導通電壓，同時也具備了 MOSFET 的快速切換與閘極電壓驅動的特性。目前中小型變頻器皆採用此元件作為開關元件。故從事電力電子相關技術的研究與產品的開發設計工程師，都必須能夠對這些元件的特性做深入的瞭解，方能掌握電路的現象與控制。如此，才能設計出符合客戶要求的電路特性與規格。

本單元將讓你實習 IGBT 功率半導體元件，並使你學會這些電力電子元件的特性，以作為設計電力電子電路時，所需的開關元件之選擇。

定義

少數載子：

- (一) 在半導體中的少量載子。
- (二) 在 P 型半導體中，因為電子比電洞少，所以電子為少數載子。
在 N 型半導體中，因為電洞比電子少，所以電洞為少數載子。

多數載子：

- (一) 在半導體中的主要載子。
- (二) 在 P 型半導體中，因為電洞比電子多，所以電洞為多數載子。
在 N 型半導體中，因為電子比電洞多，所以電子為多數載子。

學習目標

- 一、在不參考任何書籍及資料下，你能夠正確地說出 IGBT 的基本原理。
- 二、在不參考任何書籍及資料下，你能夠正確地量測 IGBT 的特性。

學習活動

本單元之學習活動包括相關知識及實際量測。在實際量測之前，我們必須先學習電力電子元件特性之相關知識。而你對於電力電子元件特性之認識與學習上，可以由下列兩條路徑選擇一途徑去學習。

一、 閱讀本教材之第 6 頁至第 20 頁。

二、 閱讀下列參考書籍：

(一) 張立、林清一 87 年 現代電力電子技術 全華科技圖書股份有限公司

本教材的第一個學習目標是

在不參考任何書籍及資料下，你能夠正確地說出 IGBT 的基本原理。

假如你認為勝任上述目標之要求，請翻到第 8 頁做學習評量，如你需要多學點的話，請翻到下一頁或閱讀參考書籍。

相關知識

絕緣閘極雙極電晶體（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT），是1980年代中期發展起來的一種新型的複合型元件。IGBT 結合電晶體 BJT 及 MOSFET 之特性，具有 BJT 的大電流與低飽和導通電壓的輸出架構，同時也具備了 MOSFET 的高速切換與閘極電壓驅動的特性。

一、關於 IGBT：

(一) IGBT 的輸出端是屬於 BJT 結構，由於受限 turn off 儲存時間太長之影響，IGBT 的切換頻率最高可達 20KHZ，超過此頻率的電路仍然可以工作，只是損失與過熱的問題必須解決。

(二) 目前 IGBT 的耐壓可達數千伏特，耐流可達數千安培以上的容量。

(三) 基本特性：

1. 輸入型式為 MOS 架構，輸出型式為 BJT 架構。
2. BJT 是導通電阻小，交換時間長；MOS 是導通電阻大，交換時間短。而 IGBT 是結合 MOS、BJT 的優點。
3. 工作頻率可達到 20KHz。
4. 由於寄生 SCR 緣故，有栓鎖（Latching）效應。

(四) 閘極輸入端為 MOSFET，因此 IGBT 具有 MOSFET 之輸入特性：同樣具有高輸入阻抗，與電壓方式驅動；而在輸出端，則為傳統之電晶體，所以 IGBT 有傳統電晶體能承受高電壓大電流之輸出特性。

二、基本結構：

由 N 通道功率型場效電晶體與雙極型電晶體組合而成的絕緣閘極雙極電晶體單元結構如圖 1.1 所示。

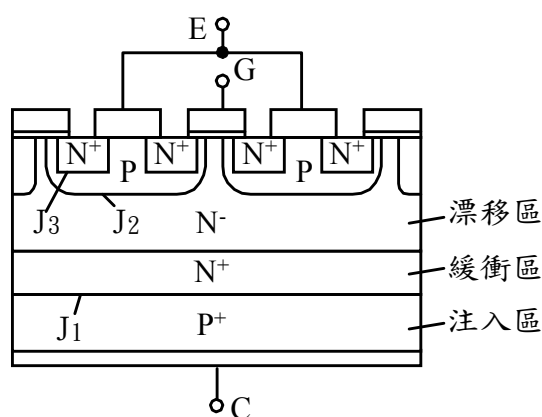


圖 1.1 絕緣閘極雙極電晶體單元結構

- (一) 絕緣閘極雙極電晶體比功率型場效電晶體多一層 P^+ 注入區，因而形成一個大面積的 P^+N 界面 J_1 ，這樣就使得絕緣閘極雙極電晶體導通時可由 P^+ 注入區向 N 基極發射少數載子（電洞），對漂移區電導率進行調整控制，因而絕緣閘極雙極電晶體(IGBT)具有很強的電流控制能力。
- (二) 緩衝區：介於 P^+ 注入區與 N 漂移區之間的 N^+ 層稱為緩衝區。該區的有無與大小，可以影響絕緣閘極雙極電晶體的不同特性。
1. 有 N^+ 緩衝區的 IGBT，稱為非對稱型絕緣閘極雙極電晶體，也稱穿通型絕緣閘極雙極電晶體。它具有正向壓降小、關斷時間短、關斷時尾部電流小等優點；但是，反向阻斷能力相對較弱。
 2. 無 N^+ 緩衝區的 IGBT，稱為對稱型絕緣閘極雙極電晶體，也稱非穿通型絕緣閘極雙極電晶體。它具有較強的正反向阻斷能力；但它的其它特性卻不及非對稱型 IGBT。

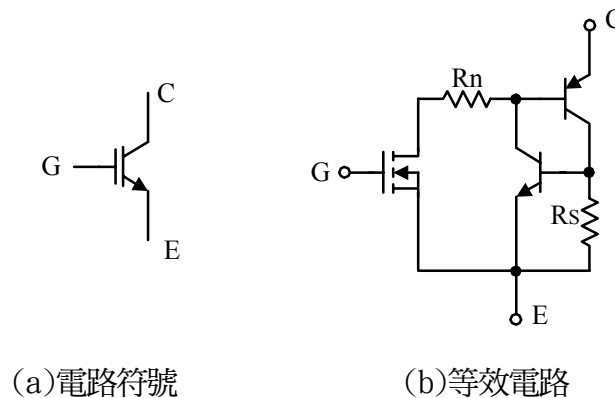


圖 1.2 IGBT 之電路符號及等效電路

3. 如圖 1.2 為 IGBT 之電路符號及等效電路，其中箭頭表示在通道中，電子流動的方向。

三、工作原理：

- (一) IGBT 相當於一個由場效電晶體驅動的厚基極的 PNP 電晶體。簡化之等效電路如圖 1.2 (b) 所示。也就是說，IGBT 是由場效電晶體和電晶體組成之達靈頓結構之複合元件。
- (二) IGBT 是一種場控元件，它的導通和截止係由閘極和射極間的電壓 V_{GE} 決定。
 1. 當 V_{GE} 為正值，且大於開啟電壓 $V_{GE(th)}$ 時，場效電晶體內形成通道，並為 PNP 電晶體提供基極電流進而使 IGBT 導通。
 2. 當閘射極間不加信號或加反向電壓時，場效電晶體之通道消失，PNP 電晶體的基極電流被切斷，IGBT 即隨之截止。

學習評量一

請不要參閱資料或書籍，在下列各題前之空格寫出正確的答案。

一、是非題：

- () 1. IGBT 是一種場控元件，它的導通和截止係由閘極和射極間的電壓 V_{GE} 決定。
- () 2. IGBT 之輸入端具 MOSFET 架構，輸出端具 BJT 架構，同時結合了兩元件之特性。
- () 3. 穿通型 IGBT 較非穿通型 IGBT 具有正向壓降小、開關時間短、關斷時尾部電流小等優點。
- () 4. IGBT 由於寄生 SCR 之緣故，具有栓鎖效應。
- () 5. 對稱型 IGBT 之正反向阻斷能力較非對稱型為差。

筆記欄

學習評量一答案

一、是非題：

1. (○)

2. (○)

3. (○)

4. (○)

5. (×) 為佳。

本教材的第二個學習目標是

在不參考任何書籍及資料下，你能夠正確地量測 IGBT 的特性。

相關知識

一、IGBT 之轉移特性：

- (一) IGBT 的靜態轉移特性用來描述集極電流 I_C 與閘射極電壓 V_{GE} 之間的相互關係，如圖 2.1 所示。

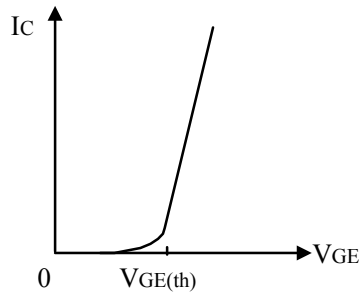


圖 2.1 轉移特性

- (二) 由圖 2.1 可知， I_C 與 V_{GE} 基本上是呈線性關係，只有當 V_{GE} 在開啟電壓 $V_{GE(th)}$ 附近時，才呈現非線性關係。
- (三) 當閘射電壓 V_{GE} 小於 $V_{GE(th)}$ 時，IGBT 處於截止狀態，當 V_{GE} 大於 $V_{GE(th)}$ 時，IGBT 開始導通，由此可知， $V_{GE(th)}$ 是 IGBT 能實現電導控制而導通的最低閘射電壓。
- (四) $V_{GE(th)}$ 隨溫度的升高而略有下降，溫度每升高 1°C ，其值下降 5mV 左右。在 25°C 時，IGBT 的開啟電壓 $V_{GE(th)}$ 一般為 $2\sim 6\text{V}$ 。

二、IGBT 之開關特性：

- (一) IGBT 的導通過程是從正向截止狀態，轉換到正向導通的過程。
- (二) 導通時間 t_{ON} 定義為：從驅動電壓 V_{GE} 的脈衝前緣上升到 $10\%V_{GEM}$ (V_{GE} 的最大值) 處起至集極電流 I_C 上升到 $90\%I_{CM}$ (I_C 的最大值) 處止，所需要的時間。

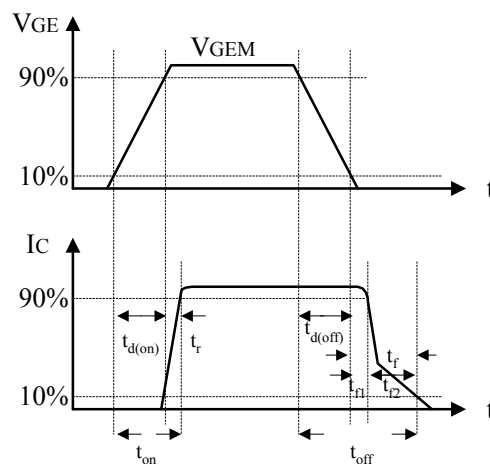


圖 2.2 開關特性

(三) IGBT 的截止過程，是從正向導通狀態轉換到正向截止狀態的過程。

(四) 截止時間 t_{off} 定義為：從驅動電壓 V_{GE} 的脈衝後緣下降到 $90\%V_{GEM}$ 處起至集極電流下降到 $10\%I_{CM}$ 處止。這段轉態過程所需要的時間。

三、IGBT 之開關損失：

(一) IGBT 導通過程和截止過程中的瞬時功率損失分別稱為導通損失 (P_{ON}) 和關斷損失 (P_{OFF})。

(二) 因為 IGBT 的工作頻率較高，開關損失佔元件總損失的比例較大，為此在實際應用中應盡量減小導通和截止損失。

(三) 開關損失與集極電流、閘極電路電阻、工作接面溫度以及負載性質等因素，有密切之關係。

(四) 由圖 2.3 知，開關損失隨著集極電流之增加而近似線性地增加。

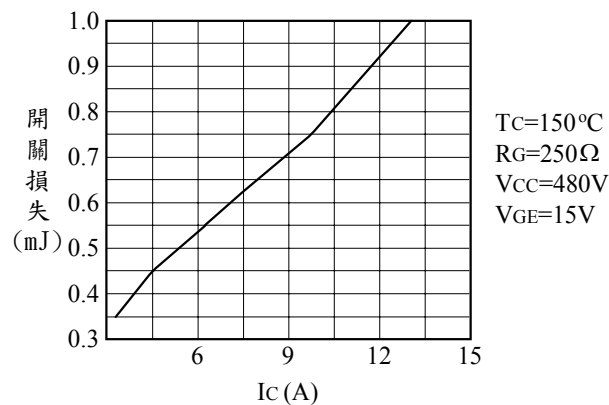


圖 2.3 開關損失與集極電流的關係

(五) 由圖 2.4 可知，閘極電阻增加會使開關時間增加，這勢必引起開關損失的增加。

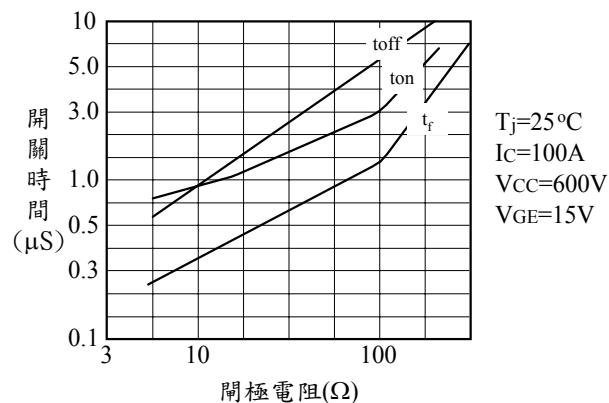


圖 2.4 開關時間與閘極電阻的關係

- (六) 設計驅動電路時，合理選取閘極電阻極為重要。此外，因為接面溫度升高後，關斷時間增長，因而截止損失也隨之增加。
- (七) IGBT 截止時，延時電流較大，延遲的時間也長，所以它的延時截止損失較大，這是 IGBT 的一個缺點。

四、IGBT 之栓鎖 (Latch) 效應：

- (一) 如圖 2.5 所示，IGBT 內含有一個寄生的 NPN 電晶體，它與作為主開關元件的 PNP 電晶體一起組成一個閘流體。在 NPN 電晶體的基極與射極之間存在著體區短路電阻 (Body Region Spreading Resistance) R_s 。

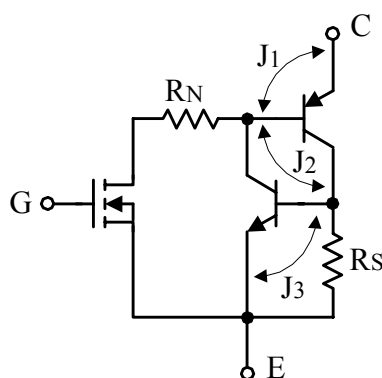


圖 2.5 具寄生閘流體之 IGBT 等效電路

- (二) 在額定的集極電流範圍內，正向偏壓很小，不足以使 J_3 接面導通，NPN 電晶體不起作用。如果集極電流大到一定程度，正向偏壓將上升至使 NPN 電晶體導通，進而使 NPN 和 PNP 電晶體同時處於飽和狀態，造成寄生閘流體導通，IGBT 閘極失去控制作用，這就是所謂的栓鎖效應 (Latch)，也稱為自鎖效應。
- (三) 栓鎖現象屬於一種接近崩潰的現象。IGBT 一但發生栓鎖效應後，元件失控，集極電流增大，造成過高的功率損失，將導致元件損壞。
- (四) 集極電流有一個臨界值 I_{CM} (I_C 之最大值)，大於此值後 IGBT 即會產生栓鎖效應。
- (五) 集極導通狀態電流的連續值超過臨界值 I_{CM} 時，產生的栓鎖效應稱為靜態栓鎖效應。
- (六) IGBT 在截止的動態過程中會產生所謂截止栓鎖或稱動態栓鎖效應。IGBT 產生動態栓鎖現象的主要原因是：元件在高速截止時，電流下降太快，集射電壓 V_{CE} 突然上升， $\frac{dV_{CE}}{dt}$ 很大，在 J_2 接面引起較大的位移電流，當該電流流過 R_s 時，可產生足以使 NPN 電晶體導通的正向偏壓，造成寄生閘流體的栓鎖效應。

實際量測

一、實習電路：

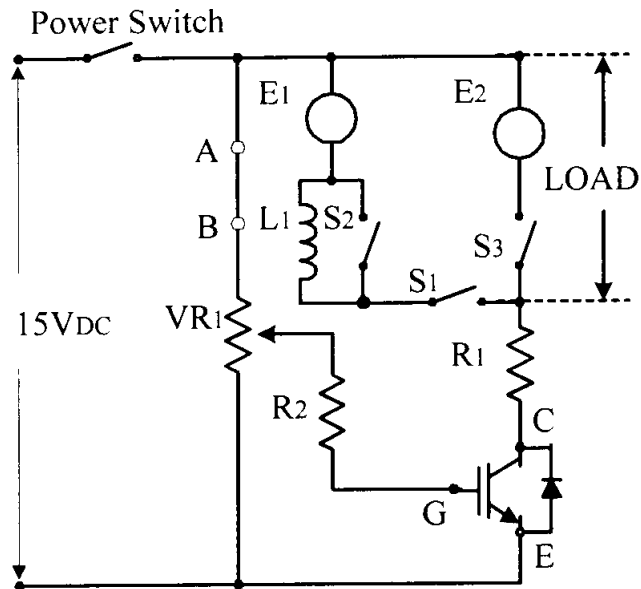


圖 2.6 電路圖

二、實習材料及儀器設備：

表 2.1 材料表

項次	名	規格	單位	數量	備註
1	電源開關		只	1	Power Switch
2	搖頭開關	單投雙極	只	3	S1、S2、S3
3	燈泡	12V, 10W	個	2	E1、E2
4	電阻器	0.1Ω	只	1	R ₁
5	電阻器	500Ω	只	1	R ₂
6	可變電阻器	5KΩ	只	1	VR ₁
7	電感器	50mH	只	1	L ₁
8	IGBT	IXGK50N60BD1	只	1	
9	麵包板		塊	1	

表 2.2 儀器設備表

項次	名稱	規格	單位	數量	備註
1	MOSFET/IGBT 元件模組	PE1188-1F	組	1	已裝置圖 2.6 電路之模組
2	直流電源供應器	3A, ±30V	台	1	
3	信號產生器	2MHz 以上	台	1	方波
4	數位萬用表	AC/DC	台	1	
5	示波器	2 CH 以上	台	1	
6	連接線		條	若干	

三、實習步驟：

- (一) 將直流電源供應器及 MOSFET/IGBT 元件模組架設於實驗機架上或按表 2.1 材料表之元件裝置於麵包板上。
- (二) 依圖 2.6 所示之電路圖完成接線。
- (三) 量測 IGBT 特性曲線：
 1. 將電源開關 ON 再將 S_3 ON 調整 VR_1 以示波器記錄閘—射極(V_{CE})電壓及相對應之集—射極(I_{CE})電流。

V_{CE} (V)	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
I_{CE} (mA)	0	1	6	35	145	750	790	800	800	800

2. 利用步驟 1 之結果畫出 IGBT 之控制特性 $I_{CE} = f(V_{CE})$ 於圖 2.7。

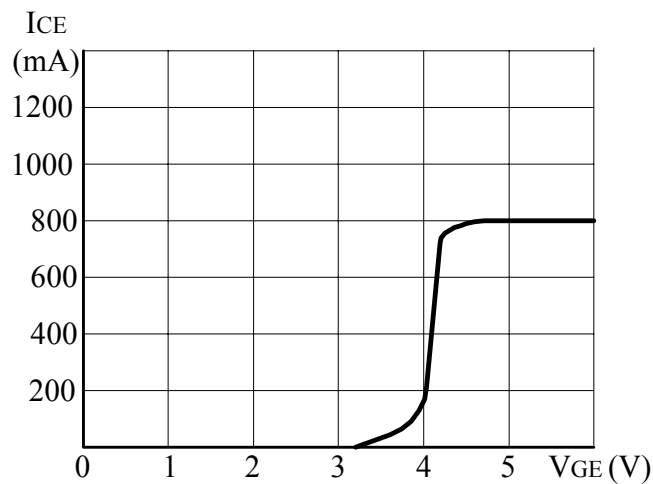


圖 2.7 IGBT 特性圖

3. 當閘-射極電壓為 4.2 V 時，IGBT 開始導通。
4. 當 IGBT 導通時，此時間-射極之觸發電流為 0 A，而集-射極之電壓為多少？ 0.86 V
5. 這種觸發導通方式為電流控制型或電壓控制型？ 電壓控制。

(四) 量測 IGBT 之導通響應圖：

1. 將電路圖之 A、B 兩點予以開路，同時取一信號產生器，將波形選擇開關設定在“方波”，頻率設定於“1KHz”，電壓值調整為“10V”，輸入至 VR₁ 側，調整 VR₁ 使輸入之電壓最大，示波器 X 輸入端 (CH1) 量測閘-射極電壓，示波器 Y 輸入端 (CH2) 量測集-射極電壓，畫出 IGBT 導通之響應圖。

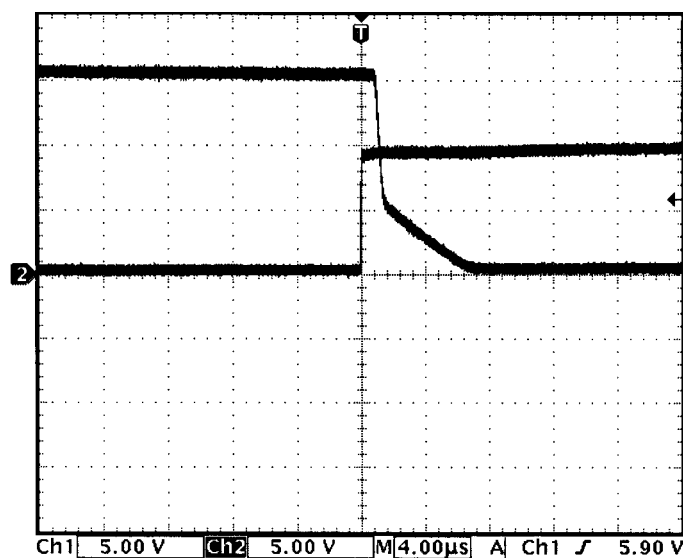


圖 2.8 IGBT 導通響應圖

2. IGBT 之導通時間約為 6 us。

(五) 量測 IGBT 之截止響應圖：

1. 同步驟(四)之 1，畫出 IGBT 截止響應圖。

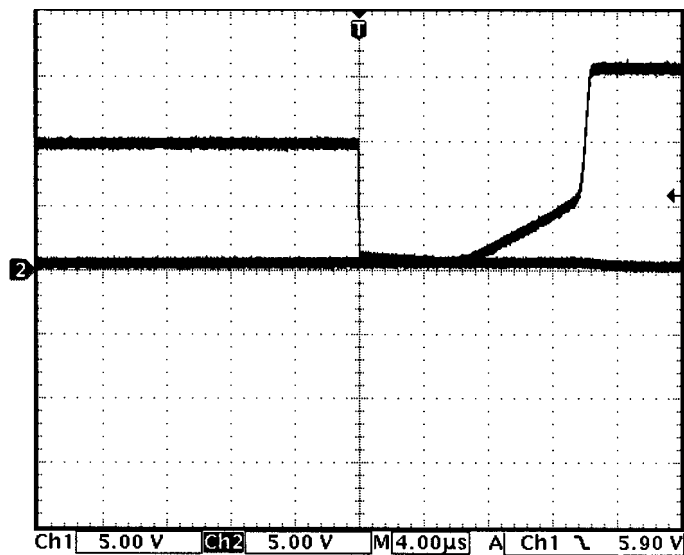


圖 2.9 IGBT 截止響應圖

2. IGBT 之截止時間約為 14 us。

(六) 在 IGBT 完全導通下：

1. 量測 V_{CE} 之電壓為 0.85 V， I_{CE} 之電流為 0.8 A。

2. 計算 IGBT 之功率損失 $P=I_{CE} \times V_{CE} =$ 0.68 W。

學習評量二

請不要參閱資料或書籍，在下面的空白處寫出正確的答案。

一、填充題：

- (一) 先將實習電路（圖 2.6）之電源開關 ON，再將 S_1 、 S_2 及 S_3 ON 同第 17 頁之步驟(四)、(五)，將負載加倍，則 IGBT 之導通時間約為_____us，而 IGBT 之截止時間約為_____us。

學習評量二答案

一、填充題：

(一) 導通時間約為 7 us。

截止時間約為 15 us。

學後評量

在無人幫助的情況下，你能在二十分鐘內，根據下述要求完成量測工作。在工作之前，請你先填好工作計劃，送給教師認可後，再行執行與量測。

- 一、依電路圖 E. 1，將電源開關 ON，再將 S_1 及 S_3 ON，同第 17 頁之步驟(四)、(五)，在 R-L 負載下 IGBT 之導通時間約為 _____ us，IGBT 之截止時間約為 _____ us。

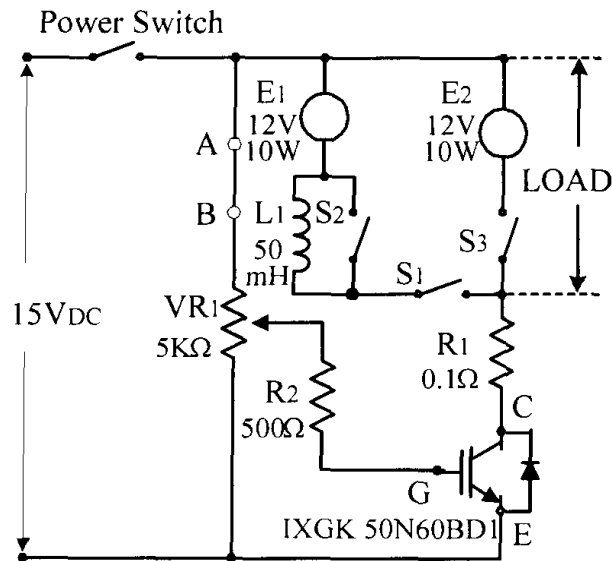


圖 E. 1 IGBT 測試線路

我的工作計畫

作業名稱： _____

工作開始日期： _____ 完成日期： _____

工作時間： _____ 小時 教師認可： _____

我製作上列工作時，所需用之工具及儀器：

1 _____	5 _____	9 _____
2 _____	6 _____	10 _____
3 _____	7 _____	11 _____
4 _____	8 _____	12 _____

我所需要的材料及消耗品：

名 稱	說 明	規 格	數 量	估 價

一、我對我作業的評分

	項	目	配分	得分	評分標準
1.	接線		20%		每處缺漏者扣 5%，完整者給予滿分
2.	信號產生器 使用操作	波形：方波 波幅：10V	20%		
3.	示波器使用操作	X 軸 (CH1) Y 軸 (CH2)	20%		
4.	是否會讀值	t_{on} 、 t_{off}	20%		
5.	時間	20 分鐘	20%		

我的作業評分：_____分，屬於_____等。

A=100 分 B=75 分 C=50 分

D=25 分 E=25 分以下

二、我的工作計畫得分：_____分，屬於_____等。

三、我的安全習慣得分：_____分，屬於_____等。

四、學習態度得分：_____分，屬於_____等。

五、教師評分：

(一) 作業得分：_____分 (三) 安全習慣：_____分

(二) 工作計畫：_____分 (四) 學習態度：_____分

總得分：_____分，屬於_____等。

六、時間：

參考書目

- 一、張立、林清一 87年 現代電力電子技術 全華科技圖書股份有限公司。