

國立臺灣海洋大學

電機工程學系

電子學實驗期末書面報告

指導教授：何志傑 博士

題目：雙極性接面電晶體的研究

Research on Bipolar Junction Transistor

學生：01053215 葉致均

中華民國一一一年十二月二十四日

摘要

本論文主要藉由了解雙極性接面電晶體(BJT)的運作原理，進而發展其不同材質、結構甚至於同種 BJT 在不同的工作區的應用。最後介紹 BJT 在實際電路模型上會發生的效應(公式推導)，及在現今生活上的主要應用。

本研究主要目的在於將 BJT 的原理及公式套到實際應用上，藉此了解 BJT 對於現今科技的貢獻及未來展望。

關鍵詞：雙極性電晶體、運算放大器、工作區、爾利效應。

Abstract

This paper focuses on elucidating the operational principles of Bipolar Junction Transistors (BJTs) and subsequently explores their applications using different materials, structures, and within various operational regions. The study also presents the effects that occur in practical circuit models of BJTs (derived formulas) and highlights their primary applications in contemporary life.

The primary objective of this research is to apply the principles and formulas of BJTs to real-world applications, aiming to comprehend the contributions of BJTs to current technology and their future prospects.

Keywords: Bipolar Junction Transistor, Operational Amplifier, Operational Region, Early Effect.

目次

I、摘要.....	2
II、Abstract.....	3
III、目次.....	4
第一章、雙極性接面電晶體的簡介.....	5
第二章、雙極性接面電晶體的運作原理.....	8
第三章、分析方法與主要參數.....	9
第四章、雙極性接面電晶體的工作區.....	12
第五章、爾利效應.....	13
第六章、結論與建議.....	14
6.1 結論：對於放大器研究的簡單結論.....	14
6.2 建議：對於本學期單元放大器的建言.....	14
參考文獻.....	15

第一章 雙極性接面電晶體的簡介

一、雙極性接面電晶體的發展

真空管的發明推動了電子工業的發展，控制真空中的電子流動。在第二次世界大戰後，各種設備的複雜性與功耗都急遽上升，卻因為大量的分立組件，設備的性能反而下降，每增加一個組件都會降低其可靠性且會增加故障排除時間。

1947 年，貝爾工作室的 John Baden 和 Watter Brattain 在 William Shockley 的指導下共同發明了點觸式的雙極性電晶體。1948 年，William Shockley 發明了接面型構造的雙極性電晶體。此元件在之後 30 年內成為製造分立元件與積體電路的首選。

由於鍺的禁帶寬度較窄，在工作時的溫度控制要求嚴格，否則容易熱失控。所以之後的電晶體多採矽製造，而矽也因容易形成穩定的二氧化矽，與其他金屬的粘性也大，易於製造電子元件。

後來，人們發現砷化鎵的電子移動速率為矽的 5 倍，可以達到更高的工作頻率，且砷化鎵的熱導率較低，有利於高溫加工，因此常被用於高速元件的製造上。

雙極性電晶體適用在訊號放大、功率控制、類比訊號處理等領域。此外，由於基極-射極偏壓電壓與溫度、電流的關係已知，雙極性電晶體還可以被用來測量溫度。

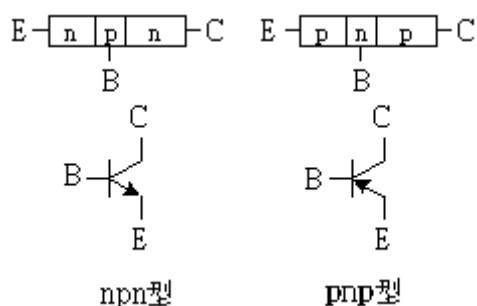
隨著能源問題越來越被重視，場效電晶體憑著更低的功耗，成為了數位積體電路中的主流，雙極性電晶體在積體電路中的使用因此逐漸變少。但即使在現代的積體電路中，雙極性電晶體依然是一種重要的元件。與金屬氧化物半導體場效應電晶體相比，雙極性電晶體可提供較高的跨導和輸出電阻，且具有高速、耐久的特性，在功率控制方面也很突出。因此，雙極性電晶體依舊是組成類比電路，尤其是甚高頻電路的重要配件。雙極性電晶體可以通過 BiCMOS 技術與 MOSFET 製作在一塊積體電路上，如此就能充分利用兩者的優點。

二、雙極性接面電晶體的結構

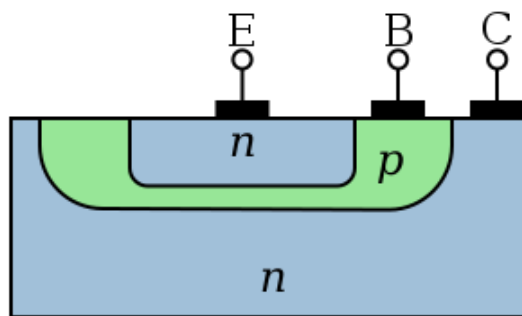
雙載子接面電晶體(bipolar junction transistor, BJT)依結構區分，有 npn 型及 pnp 型兩種，其電晶體結構及符號如圖(1)所示。

BJT 可以視為兩個 pn 接面背對背連接在一起。因為此元件中有二種極性的載子(電洞及電子)共同負責傳輸電荷，所以它稱為雙載子。

一個雙極性電晶體由三個不同的摻雜半導體區域組成，其中 E 表示射極(emitter)、B 表示基極(base)、C 表示集極(collector)。



圖一、BJT 的結構與符號



NPN 型雙極性電晶體的截面圖

基極由輕摻雜、高電阻率的材料製成。集極包圍著基極區域，由於集極接面逆向偏壓，電子很難從這裡被注入到基極區域，這樣就造成共基極電流增益 α 約等於 1，而共射極電流增益 β 取得較大的數值。射極具有相當高的摻雜濃度。

雙極性電晶體不對稱，假設電晶體位於順向主動區，如果此時將電晶體集極和射極在電路中的連接互換，將使電晶體離開順向主動區，進入逆向工作區。電晶體的內部結構決定了它適合在順向主動區工作，所以逆向工作區的共基極電流增益 α 和共射極電流增益 β 比電晶體位於順向主動區時小得多。原因是射極和集極的摻雜程度不同。

因此，在 NPN 型電晶體中，儘管集極和射極都為 N 型摻雜，但是二者的電學性質和功能不能互換。射極區域的摻雜程度最高，集極區域次之，基極區域摻雜程度最低。

此外，基極區域很薄，而集極面積大於射極面積。因此可以為集極接面提供一個逆向偏壓，但前提是這個逆向偏壓不能過大，可能會讓電晶體損壞。對射極端進行重摻雜是為了增加射極電子注入到基極區域的效率，進而使電流增益盡量提高。

NPN 型

NPN 型電晶體由兩層 N 型摻雜區域夾著一層 P 型摻雜半導體（基極）組成。輸入到基極的電流將被放大，產生較大的集極-射極電流。當基極電壓高於射極電壓且集極電壓高於基極電壓時，電晶體處於順向放大狀態。此時集極和射極之間存在電流。射極注入到基極區的電流被放大，之後在電場的推動下漂移到集極端。由於電子移動率比電洞遷移率高，因此現在使用的大多數雙極性電晶體為 NPN 型。

PNP 型

PNP 型由兩層 P 型摻雜區夾著一層 N 型摻雜半導體組成。當基極電壓小於射極且集極電壓低於基極時，電晶體處於順向主動區，流經基極的微小電流在射極端被放大。

在符號中，PNP 型與 NPN 型相反，PNP 型電晶體的箭頭從射極指向基極。

異質接面雙極性電晶體

異質接面雙極性電晶體（heterojunction bipolar transistor）是一種改良的雙極性電晶體，它擁有高速工作的能力，可以處理頻率高達幾百 GHz 的超高頻訊號，因此適用於射頻功率放大、雷射等對工作速度較要求的應用。

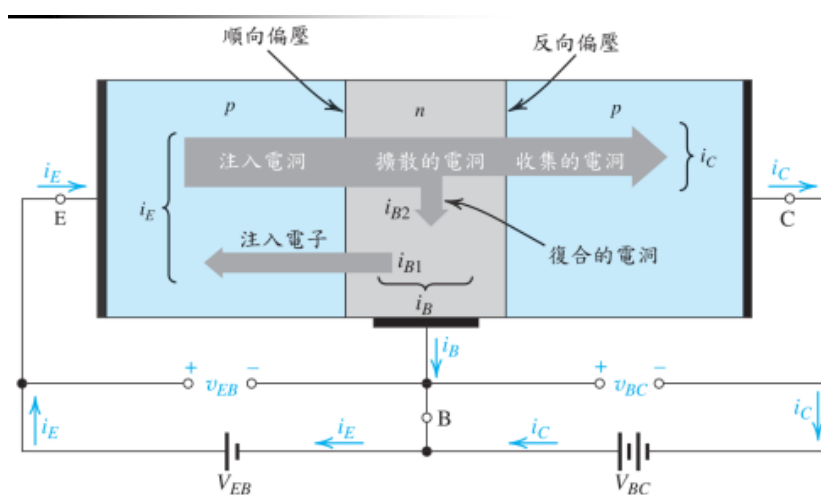
異質接面是 PN 接面的一種，射極和基極使用了不同的半導體材料。射極接面通常採用異質接面結構，射極區域採用寬禁帶材料(如: 鋁-鎵-砷固溶體)，基極區域採用窄禁帶材料(如: 砷化鎵)，可提升注入效率及電流增益 β 。

異質接面的基極區域的摻雜濃度大幅提升，可以降低基極端的電阻及基極區域的寬度。在同質結構電晶體中，射極到基極的載子注入效率主要是由射極和基極的摻雜比例決定的。因此，為了得到較高的注入效率，必須對基極區域進行輕摻雜，這樣就能增大基極電阻。

第二章 雙極性接面電晶體的運作原理

NPN 型雙極性電晶體可視為共用陽極的兩個二極體接合。在正常工作狀態下，基極與射極間的 PN 接面處於順向偏壓，而基極與集極間的 PN 接面處於逆向偏壓。在沒有外部電壓時，射極接面 N 區的電子濃度大於 P 區的電子濃度，部分電子會擴散到 P 區；同理，P 區的部分電洞也將擴散到 N 區。射極接面上將形成一個空間電荷區（也稱為空乏區），產生一個內在的電場，方向由 N 區指向 P 區，此電場會阻礙擴散過程進一步發生，進而達成動態平衡。此時，若再加一個順向電壓在射極接面上，載子的擴散運動和空乏層中電場間的動態平衡將被打破，會使熱激發電子注入基極區域。在 NPN 型電晶體裡，基區為 P 型摻雜，這裡電洞為多數摻雜物質，而電子為少數載子。

從射極被注入到基極區域內的電子，與基極區域內的多數載子電洞發生複合，由於基極區域摻雜程度低且物理尺寸薄，當集極接面處於逆向偏壓（集極電位相對於基極是正的），大部分電子將通過漂移運動抵達集極區域，形成集極電流。為了儘量緩解電子在到達集極接面前發生的複合，電晶體的基極區域的厚度必須遠小於電子的擴散長度，使得載子擴散所需的時間短於半導體少數載子的壽命。在現代的雙極性電晶體中，基極區域厚度的典型值為十分之幾微米。需要注意的是，集極、射極雖然都是 N 型摻雜，但是二者摻雜程度、物理屬性並不相同，因此要將雙極性電晶體與兩個相反方向二極體串聯在一起的形式區分開來。



PNP 運作原理示意圖

第三章 分析方法與主要參數

一、分析方法

集極-射極電流受基極-射極電流的控制，因此可以把雙極性電晶體視為一種「電流控制」的元件。集極-射極電壓也受射極接面電壓的控制，即為一種「電壓控制」的元件。兩種看法可以藉由看基極-射極接面上的電流電壓關係相互關聯起來，可以用 PN 接面的 I-V 曲線表示。

從基極區域的少數載子濃度看，可以解釋集極的載子流動。雙極性擴散（即非平衡多數載子和少數載子以相同速率流動）的速率由非平衡少數載子決定。雙極性電晶體處理高頻訊號的能力受限於基極區域載子的擴散時間。

古梅爾-潘模型（Gummel-Poon Model）提出可以利用電荷分布來解釋電晶體的運作。電荷控制的觀點可以處理光電二極體的相關問題，因為基極區域的少數載子是通過吸收光子（光注入）產生的。電荷控制模型還能處理關斷、恢復時間等動態問題，這些都與基極區域電子和電洞的複合密切相關。但是基極電荷無法從基極處觀察，因此在實際的電路設計、分析中，電流、電壓控制的觀點更為普遍。

在主動區內，雙極性電晶體具有近似線性的特徵，集極電流約略等於基極電流的 β 倍。但在真實的情況中，雙極性電晶體是一種較為複雜的非線性元件，若偏壓電壓分配不當，會使其輸出訊號失真。此外，即使工作在特定範圍，其電流放大倍數也受到溫度等其他因素影響。為了設計出可靠的雙極性電晶體電路，必須採用電壓控制的觀點（艾伯斯-莫爾模型）。其引入了一個指數函數來描述電壓、電流關係，在一定範圍內，函數關係為近似線性，可以將電晶體視為一個電導元件。

目前，電晶體的電路設計主要使用 SPICE 或其他類似的類比電路仿真器進行，因此模型的複雜程度並不會有太大的問題。但以人工分析類比電路的問題時，無法像處理經典的電路分析那樣採取精確計算的方法，所以採用近似的方法是非常必要的。

二、主要參數

電流放大參數

射極擴散到基極的電子，大部分都能夠漂移到集極，剩下的電子會與基極區域的電洞發生載子複合。抵達集極的電子濃度占射極擴散出來的電子總濃度的比值，可以用來衡量雙極性電晶體效率。由於射極區域為重摻雜，基極區域為輕摻雜，所以從射極被注入到基極的電子濃度大於從基極注入到射極的電洞濃度。

如果電晶體採用共射極接法，輸入電流為基極電流 I_B ，輸出電流為集極電流 I_C ，當射極接面順向偏壓、集極接面不施加偏壓時，電晶體的共射極直流短路電流增益可以表示為集極電流 I_C 與基極電流 I_B 的比值 $\beta_F = I_C/I_B$

如果集極從無偏壓變為逆向偏壓，那麼 I_C 與 I_B 的比值稱為共射極靜態電流增益，它的表達式為 $h_{FE} = I_C/I_B$ ，對於小訊號模型中的電晶體， β_F 的數值通在 20 到 200 之間。

如果採用共基極接法，輸入電流為射極電流 I_E ，輸出電流為集極電流 I_C ，當射極接面順向偏壓、集極接面不施加偏壓時，電晶體的共基極直流短路電流增益可以表示為集極電流 I_C 與射極電流 I_E 的比值 $\alpha_F = I_C/I_E$ ，如果集極從無偏壓變為逆向偏壓，那麼 I_C 與 I_E 的比值稱為共基極靜態電流增益，表達式為 $h_{FB} = I_C/I_E$

上述兩個參數可以通過下面的公式相互轉換（在 NPN 型電晶體中）

$$\beta_F = \alpha_F / (1 - \alpha_F) \quad \longleftrightarrow \quad \alpha_F = \beta_F / (1 + \beta_F)$$

當對低頻的交流小訊號進行近似分析時，也可以採用上述直流參數。但若需提高精確度，就必須考慮及雙極性電晶體中的電容效應造成的影響。當訊號電壓的頻率達到一定程度後，電流的放大倍數將會下降。

功率參數

雙極性晶體管在工作時，集電極電流在集電結上會產生熱量而使三極體發熱。若耗散功率過大，三極體將燒壞。在使用中如果三極體在大於 P_{CM} 下長時間工作，將會損壞三極體。

極限電流和極限電壓

當集電極電流增大到一定數值 I_{CM} 後，電流增益會明顯降低，但還不會造成雙極性晶體管的損壞。為了使晶體管按照設計正常工作，需要限制集電極電流的數值。由於雙極性晶體管具有兩個 PN 結，因此它們的反向偏置電壓不能夠過大，防止 PN 結反向擊穿。當功率雙極性晶體管集電極的反向偏置電壓 V_{CE} 超過一定數值，且流經晶體管的電流超出允許範圍，使得晶體管功率大於二次擊穿臨界功率 P_{SB} ，超出設計範圍的電流將造成器件內部不同區域的溫度不均衡，就會產生一種被稱為「二次擊穿」的危險現象。因為摻雜的硅具有負的溫度係數（temperature coefficient），所以當它處於較高的溫度時，其導電性能更強。因此，較熱部分就能傳導更多的電流，這部分電流會

產生額外的熱能，造成局部溫度將超過正常值，使器件不能正常工作。二次擊穿是一種熱失控，一旦溫度升高，電導率提升，造成惡性循環，最終損毀晶體管的結構。整個二次擊穿過程只需要毫秒或微秒量級的時間。

溫度漂移

雙極性晶體管的所有參數都會受溫度影響，特別是電流增益 β 。溫度每升高 1 攝氏度， β 大約會增加 0.5%到 1%。

第四章 雙極性接面電晶體的工作區

正向放大區(active mode)：當射極正向偏置，集電結反向偏置時，晶體管工作在放大區。大多數雙極性晶體管的設計目標，是為了在正向放大區得到最大的共射極電流增益 β_F 。集極-發射極電流與基極電流近似成線性關係。由於電流增益的緣故，當基極電流發生微小的擾動時，集電極-發射極電流將產生顯著變化。

反向放大區：如果把上述處於正向放大區晶體管發射結、集電結的偏置電壓互換，則雙極性晶體管將工作在反向放大區。射極和集電極區扮演的角色與正向放大區正好相反，但是由於晶體管集電極的摻雜濃度低於發射極，反向放大區產生的效果與正向放大區並不相同。大多數雙極性晶體管的設計目標是儘可能得到最大正向放大電流增益，因此，反向放大區中的電流增益會比正向放大區的小一些。實際上，這種工作模式幾乎不被採用，但是為了防止錯誤接法造成器件損壞或其他危險，設計時必須考慮。

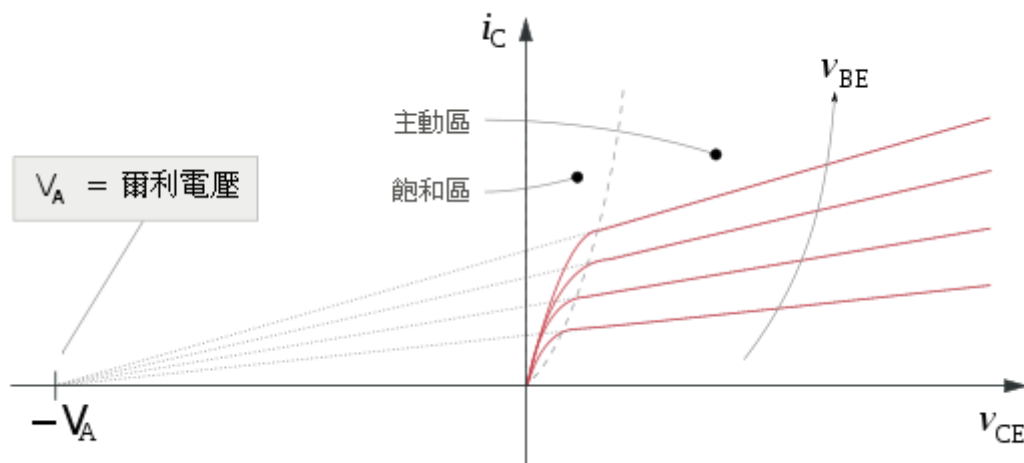
飽和區(saturation region)：當雙極性晶體管中兩個 PN 結均處於正向偏置時，它將處於飽和區，晶體管發射極到集電極的電流達到最大值，此時即使增加基極電流，輸出的電流也不會再增加。

截止區(cutoff region)：如果雙極性晶體管兩個 PN 結的偏置情況與飽和區恰好相反， V_{BE} 、 V_{BC} 均為逆偏，那麼晶體管將處於截止區，輸出電流非常小。

突崩潰：當施加在集電結上的反向偏置將超過集電結所能承受範圍時，這個 PN 結將被擊穿，若電流足夠大會造成器件損壞。

第五章 爾利效應(Early effect)

爾利效應又稱基區寬度調製效應，是指當雙極性電晶體 (BJT) 的集電極—射極電壓 V_{CE} 改變，基極—集電極空乏區寬度 W_{B-C} (空乏區大小) 也會跟著改變。



從爾利效應可以看出，如果 BJT 的基區寬度發生變化，會導致更大的逆向偏壓電壓在集極—基極接面，會增加集極—基極空乏區寬度，減少基區寬度。整體來說，增加集極電壓 (V_C)，集極電流 (I_C) 也會跟著上升。

某些模型把集極電流校正係數建立在集極—基極電壓 V_{CB} (見基區寬度調變) 而不是集極—射極電壓 V_{CE} 的基礎上。利用 V_{CB} 建模在物理上似乎更為合理，因為從爾利效應的物理原因上來看，集極—基極空乏層的變寬取決於 V_{CB} 的變化。

第六章 結論與建議

6.1 結論：對於放大器研究的簡單結論

經過研究及撰寫這份論文，讓我對課堂上做實驗所用到的原理有了更深層的認識，由於時間因素沒有做到大、小訊號模型的研究有些遺憾，但在繳交這份小論文後我仍會將沒有提到的部分搞懂。下學期的實驗課程會有更多關於 BJT 的知識，讓我非常期待。

6.2 建議：對於本學期單元放大器的建言

在做實驗的過程常會有出錯卻找不到問題之時，常會埋頭苦苦研究許久仍沒有進展，想尋求助教幫助，但助教總是非常忙，故希望能有更多可以對助教提問的時間，在想提問時就能找到助教，如此便可大大增加做實驗的效率。

參考文獻

[1] <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%8C%E6%9E%81%E6%80%A7%E6%99%B6%E4%BD%93%E7%AE%A1>

[2] <https://physcourse.thu.edu.tw/bs508a/2017/02/24/%E9%9B%BB%E6%99%B6%E9%AB%94%E7%9A%84%E4%B8%89%E5%80%8B%E5%B7%A5%E4%BD%9C%E5%8D%80/>

[3] http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public_html/_private/electronics/bjt/concept.htm

[4] <https://inf.news/zh-hant/news/c581188ceb467a5d3f077b0831deaa6a.html>

[5] <https://www.mrchip.cn/newsDetail/291>

圖來源：

[1] <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%8C%E6%9E%81%E6%80%A7%E6%99%B6%E4%BD%93%E7%AE%A1>

[2] http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public_html/_private/electronics/bjt/concept.htm