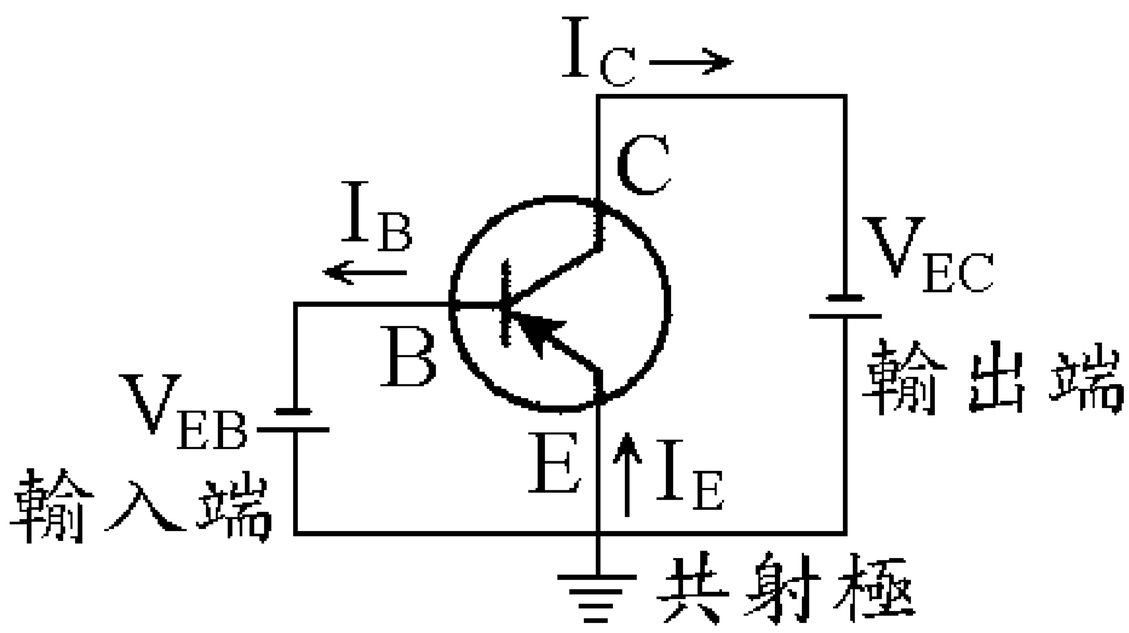
PHYSICS

第二十二章

電子學



_____年 _____班 _____號

姓名：_____

吳錫玠老師 編授

第二十二章　電子學

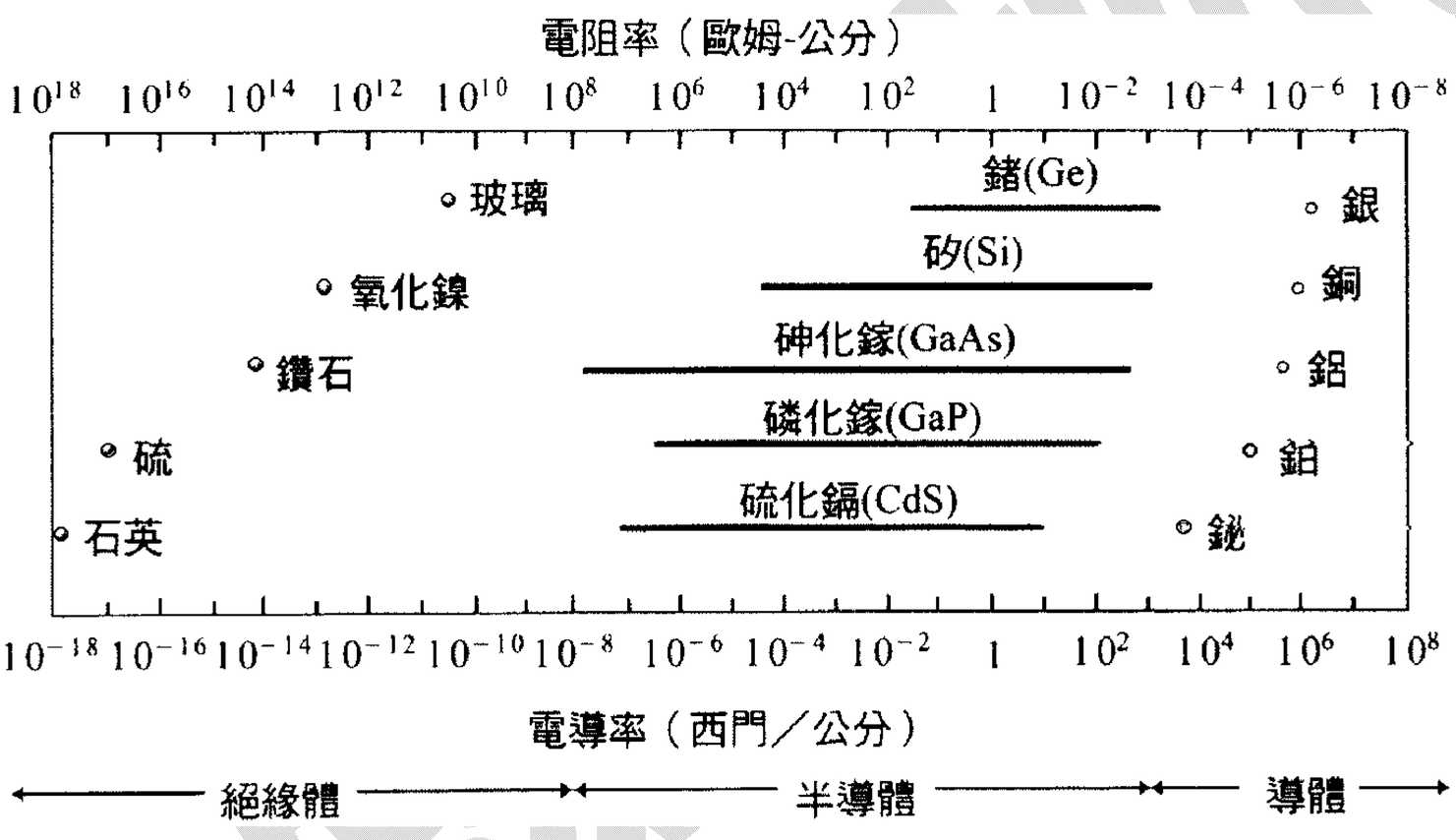
基礎科學探討自然世界的現象與原理。而以其研究成果，用來增進我們的物質生活，則屬應用科學的範疇。電機工程**(Electrical Engineering)**和電子工程**(Electronic Engineering)**即是以物理學的電磁學為基礎，所發展而來的應用科學。

今日，電子電器及資訊產品已普遍深入到我們的生活中，因此有人認為現在是電子科技的時代。要讓每個國民都能善加利用與我們生活息息相關的電子資訊產品，電子學的基本知識，將是現代國民必修課題。

22-1　半導體

一、物質的導電性

半導體物質的導電能力按電阻率ρ或電導率σ的大小來區分時，可分為導體、半導體與絕緣體。通常，電阻率小於10^{-3}歐姆-公分之間的材料，歸類為導體;電阻率大於10^{8}歐姆-公分的材料為絕緣體;電阻率介於兩者之間的材料，則屬於半導體。



1.雜質對物質導電能力的影響：

把微量的「雜質」**(impurity)**摻入**(doping)**半導體中，可以很大程度的改變半導體材料的電阻率，使得半導體材料特別適用於製作電子元件。相反的，無論怎麼摻入雜質到導體或絕緣體中，它們的電阻率卻幾乎是固定不變的，縱使有些絕緣體**(**如玻璃**)**的電阻率有不小的變化，但其電阻率仍然太大，故不易用來製作電子元件。

2.電導率

(1)電導率σ與電阻率ρ互為倒數，意即$\sigma = 1/\rho$

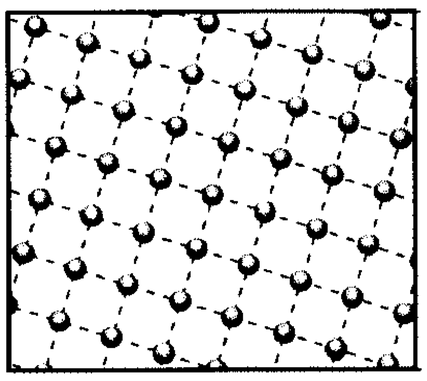
(2)單位記為：西門/公分。西門**(siemens)**＝歐姆$^{-1}$＝安培-伏特$^{-1}$。

註：金屬的電導率隨溫度的增高而變小；但半導體的電導率，則隨溫度的增高而增加！

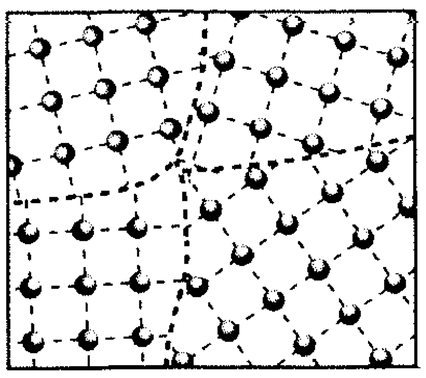
二、半導體材料

1.單晶體、多晶體與非晶體：

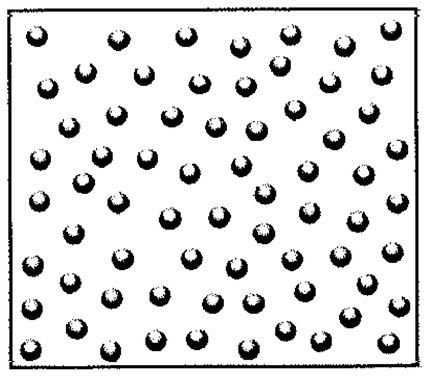
按照固態材料內部原子的排列狀況，可區分為單晶**(single crystalline)**體**(**圖**(a))**、多晶**(Poly-crystalline)**體**(**圖**(b))**及非晶**(amorphous)**體**(**圖**(c))**三種。



(a)



(b)



(c)

2.晶體中原子排列狀況：

(1)單晶體內的每個原子或原子群，在空間上整齊的排列並且具有週期性。

(2)多晶體由許多區塊所組成，各個區塊內的原子有其週期性的排列方式，但不同的區塊，排列方向並不一致。

(3)非晶體內的原子或原子群則幾乎沒有週期性排列可言。

※對同一種類材料而言，理論分析和實驗操作可知，單晶體的導電性與品質的可控制性最佳。儘管製作單晶材料所需的的設備規格、技術層次、與生產成本，均較製作多晶及非晶的材料來得高，常見的電子元件，仍多以單晶的半導體材料製作而成。

3.元素半導體及化合物半導體：

在固體、液體與氣體三種狀態中，以固體較不容易變形，具有較大的力學強度(機械強度)，適合加工塑形，因此半導體材料一般以固態物質為主，而由固態材料所製作的電子元件，也稱為固態電子元件。目前已知的半導體材料約有六百種，常見的半導體為週期表中的第四族的元素半導體或三-五族或二-六族元素所組成的化合物**(compound)**半導體。其中以矽相關的元件製作技術最成熟，因此以矽製作的半導體元件也最多。

IIB	IIIA	IVA	VA	VIA
	B 硼	C 碳	N 氮	O 氧
	Al鋁	Si矽	P 磷	S 硫
Zn鋅	Ga鎵	Ge鍺	As砷	Se硒
Cd鎘	In銦		Sb銻	Te碲
Hg汞				

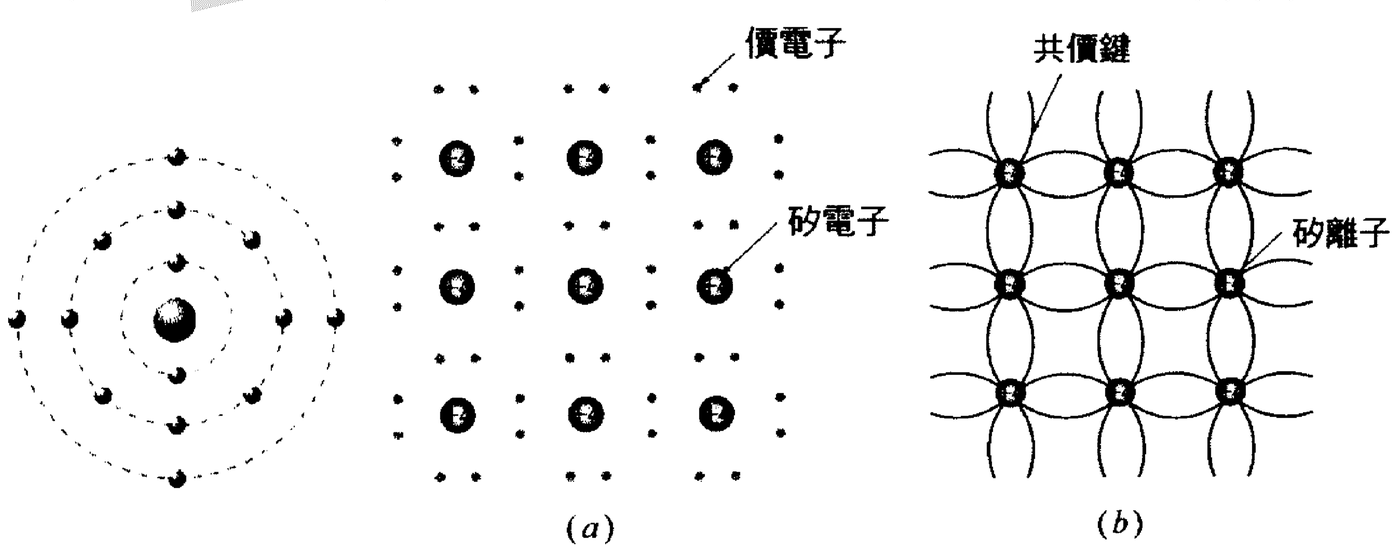
註：三、五族與二、六族元素化合物，其發光效率比矽為高，因此光電**(opto-electronic)**半導體元件多以三、五族與二、六族化合物來製作。例如常見的發光二極體**(light emitting diode，LED)**與雷射二極體**(laserdiode，LD)**，大都是以 **GaAs**、**GaN**、**AlCaAs**、**AlGaInP** 等三、五族化合物製作而成。

三、半導體的導電原理

茲以純矽半導體，來說明半導體的導電原理。

1.純矽的結構：

矽原子有 **14** 個電子，其中有 **4** 個排列於最外層，這 **4** 個在最外層的電子，稱為「價電子」**(valenceelectron)**，如下圖所示。矽原子與矽原子間，靠共用這些價電子形成共價鍵**(covalent bond)**，而將彼此緊緊拉在一起，如下圖**(a)(b)**所示。

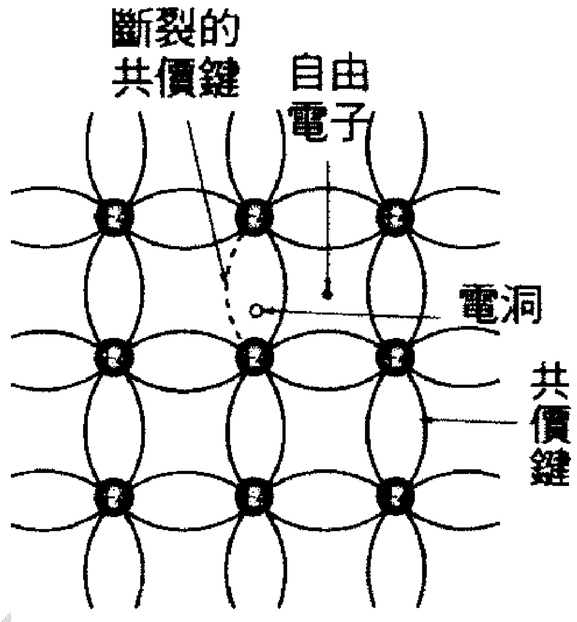


(a)　(b)

註：由近代原子分子的理論知，當原子最外層有**8**個電子時，原子的穩定性最高。就矽原子而言，經由電子共用的方式，每個矽原子的外層都相當有**8**個電子，因此純矽的結構很穩定。

2.純矽的導電原理：

當環境的溫度大於絕對零度時，原子會有不規則的熱運動，這種運動會隨著溫度的上升，而愈趨激烈，甚至大到使原子間的鍵結被打斷，如右圖**(c)**所示。當矽原子間的鍵結斷裂時，價電子變成了自由電子而到處遊走，並在鍵結斷裂處，遺留下一個空位，這個空位稱為「電洞」。自由電子與電洞便是造成純矽導電的主要原因。



(c)

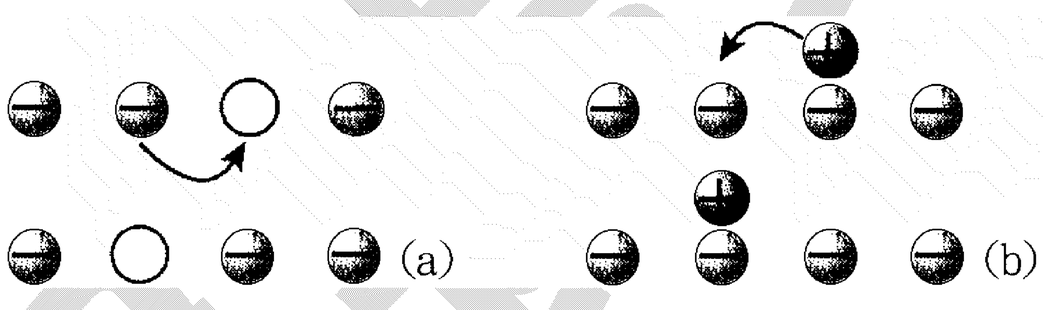
(1)自由電子：

由鍵結斷裂處所釋出的自由電子**(**或稱傳導電子**)**，若受到電場作用時，形成漂移電流。自由電子漂移方向雖然與電場方向相反，但漂移電流方向仍與電場方向相同。

(2)電洞**(hole)**：

當價電子落入鄰近的電洞時，會在價電子原來的位置上造成一個新的電洞，這種現象，由外觀看起來就像是電洞在移動一般。

※下圖**(a)**表示當價電子向右填補電洞時，會造成電洞向左移動的效果**!**注意，這種現象也可以用下圖**(b)**來表示**!**在圖**(b)**中，假定所有的價電子是不動的，但有一個帶正電的質點向左移動，當正電質點與價電子重合時，該處即為電洞，因此正電質點向左移動，就代表電洞向左移動一樣，因此價電子向右移動造成的電流，就可以用正電質點向左移動來表示！**(**我們可以將電洞視為帶正電的質點，而將此時的電流解釋為電洞所造成的電流。**)**



※綜合以上的說明可知：

當純矽半導體導電時，電流係自由電子與電洞的移動共同造成。在半導體內負責導電任務的自由電子與電洞，也稱為載子**(carrier)**。

※當有電場存在時，半導體內的自由電子受電場的作用，會沿著與電場相反的方向移動，而形成電子電流。同樣的，價電子遞補電荷空缺的過程，也會受電場影響，使得接替移動的價電子亦沿著與電場相反的方向移動，而形成電洞電流。以上兩項電流皆為受電場影響而產生的電流，稱為傳導電流，亦稱為漂移電流**(drift current)**。

3.本質載子濃度：

純半導體，亦稱為本質**(intrinsic)**半導體。在本質半導體內，由於原子熱運動而造成的自由電子與電洞，皆是成對產生**!**因此自由電子與電洞的濃度相等，此濃度稱為本質載子濃度**(intrinsic carrier concentration)**。在室溫下，由熱能所造成的本質載子的濃度通常很低，因此本質半導體的導電性能不佳。若在本質半導體中摻雜微量的**3**價元素或**5**價元素時，並能大幅提高半導體的導電能力。本質半導體，摻雜**3**價元素或**5**價元

素後，可分別製造出 **p** 型半導體與 **n** 型半導體。

註：室溫下，電子的熱能約為 **26** 毫電子伏特**(meV)**，此能量遠小於使其價鍵斷裂所需的能量，因此僅有非常少量的自由電子與電洞產生(室溫下，矽的本質載子濃度約為 10^{10} 個/公分^3，約每 5×10^{12} 個共價鍵才斷裂一個)。

註：質量作用定律**(mass-action law)**：

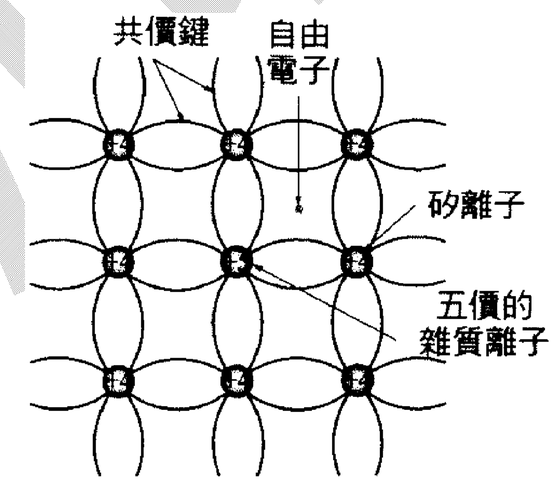
在熱平衡時，半導體材料中的自由電子濃度 **n** 和電洞濃度 **p** 的乘積，等於本質濃度 n_i 的平方，意即 $np=n_i^2$。

註：摻雜**(Doping)**：

在本質半導體中添加雜質，用以控制材料導電性的製造過程，稱為摻雜。一般摻雜濃度約為 $10^{15}\sim10^{18}$ 公分$^{-3}$，此濃度比矽原子的濃度 5×10^{22} 公分$^{-3}$ 小了許多，因此除了半導體的導電能力有明顯的變化外，半導體的其他物理性質如熔點、密度等等，幾乎沒有什麼變化。

四、n 型半導體

※在純矽中摻入少量的第五族元素(如磷)，以取代部分矽原子，如右圖所示。由於磷原子的最外層有 **5** 個價電子，當其中 **4** 個電子與周圍的矽原子共用時，剩餘的 **1** 個價電子，將不受磷原子的束縛，成為可自由移動的傳導電子。在矽半導體中摻雜足量的 **5** 價元素後，會使得矽半導體內原已稀少的電洞，很容易與電子的復合，而使得濃度變得更低。這種多數載子為負電(電子)的半導體，稱為 **n** 型半導體，此種半導體的載子濃度幾乎等於雜質濃度。



*n*型半導體共價鍵結圖

※摻入了第五族原子雜質的矽半導體擁有非常多量的自由電子，由於此多數載子**(majority carrier)**帶負電**(negative)**，所以此類的半導體稱為 **n** 型半導體。

※**n** 型半導體材料中，僅有少量的電洞，故電洞為此材料的少數載子**(minority carrier)**。

仍需留意的是，**n** 型半導體，雖然有較高濃度的自由電子，但也有相同濃度的正離子，故仍屬於電中性**(neutral)**的材料，且可量化其電導率或電阻率的大小。

註：本質半導體中摻入雜質後，也稱為外質半導體。

註：多數載子**(majority carrier)**與少數載子**(minority carrier)**：

在添加雜質後，半導體內能產生電流的多數帶電粒子(可能是電子或電洞)，稱為多數載子。在添加雜質後，半導體內少數的帶電粒子(可能是電子或電洞)，稱為少數載子。

※施體**(donor)**：

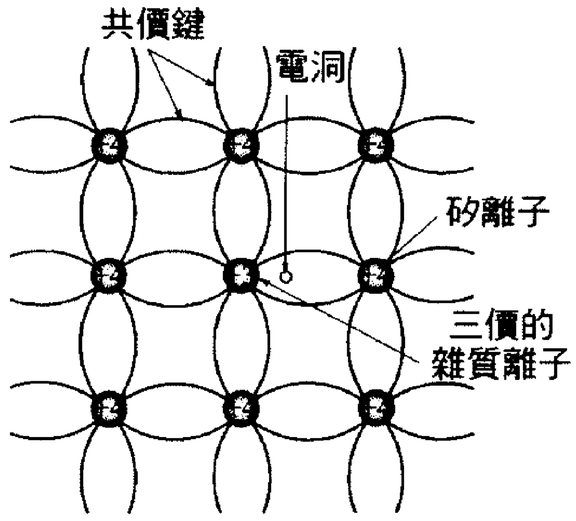
以 **5** 價元素取代矽原子時，**5** 價元素能提供額外的傳導電子，以增加半導體的導電性，故稱 **5** 價元素為施體。

註：施體原子提供 **1** 個自由電子後，即成為帶正電的正離子。

五、p 型半導體

※在純矽中摻雜少量的第三族元素(如硼)，以取代部分矽原子，如右圖所示。由於硼原子的最外層有 **3** 個價電子，與周圍的矽原子鍵結時，尚不足 **1** 個價電子，此時周圍

的其他價電子，可遞補欠缺電子的位置，並在價電子原來的位置造成電洞，使得半導體的導電能力增強。矽半導體中摻雜足量 **3** 價元素，使導體中的電洞濃度將遠大於電子濃度，這種多數載子為正電(電洞)的半導體，也稱為 **p** 型半導體，此種半導體的載子濃度幾乎等於雜質濃度。



*p*型半導體共價鍵結圖。

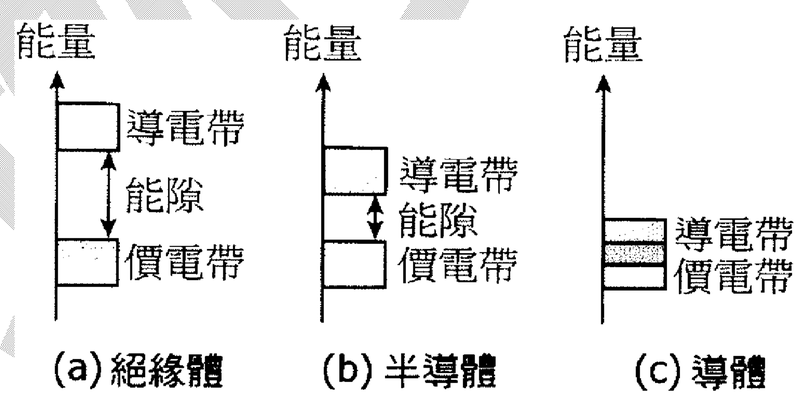
※當電洞形成時，雜質原子變成負電性的離子，故此 **p** 型半導體仍為電中性材料，且電洞的濃度與受體雜質的濃度幾乎相同。

※受體**(acceptor)**：

以 **3** 價元素取代矽原子時，**3** 價元素能提供額外的電洞，以增加半導體的導電性，故稱 **3** 價元素為受體。

註：受體原子的電洞捕捉到價電子時，即成為帶負電的負離子。

六、能帶與物質的導電性



原子中的電子，能量各不相同，價電子的能量較低，自由電子的能量較高。價電子所處的能量區域，稱為價電帶；自由電子所處的能量範圍，稱為導電帶。導電帶與價電帶的能量間隔稱為能隙。上圖**(a)(b)(c)**分別表示出絕緣體、半導體與導體的能帶圖。對絕緣體而言，由於能隙甚大，除非加上很高的電壓，否則價電帶中的電子，無法得到足夠的能量到達導電帶，成為傳導電子。對於半導體而言，其能隙較窄，因此價電帶的電子，比較容易取得足夠的能量到達導電帶，成為傳導電子。對於導體而言，其導電帶與價電帶有部分重疊，因此有許多自由電子，而使得其導電能力極佳。

《例 1》已知矽的比重為 2.33，則矽晶體的濃度每立方厘米若干個原子？(Si 原子量 28.09)

(A)8.3×10^{18} (B)5×10^{20} (C)5×10^{22} (D)8×10^{23} (E)6×10^{24}。答：C

《例 2》n 型半導體物體兩端受有電壓(左端為正電位，右端為負電位)時，

(A)施體離子是否會移動？

(B)自由電子如何移動？

(C)所造成的電流方向為何？

(D)半導體物體內部的電子濃度有何變化？

答：(A)不會移動(B)自右向左移動(C)自左向右(D)皆為固定值

《例 3》根據半導體理論—群體作用定律：在一定的溫度下，半導體內的自由電子濃度 n 和電洞濃度 p 有下列的關係式：$np=n_i^2$，式中 n_i 為該半導體為純晶體時，在同一溫度的自由電子濃度。現在，室溫時純矽半導體之導電電子濃度為 $1.00\times10^{16}/m^3$ 若在其晶體中摻入磷，使其濃度增為 10^6 倍。已知矽的密度為 $2.33\times10^3 kg/m^3$，莫耳原子量為 0.028kg，則

(A)這個摻雜的組合是 p 型或是 n 型半導體？

(B)矽原子濃度若干？

(C)磷原子濃度若干？

(D)晶體內磷原子與與矽原子的比例若干？

(E)摻雜後，導電電洞的濃度若干？

答：(A)n 型半導體(B) $5\times10^{28}m^{-3}$ (C) $10^{22}m^{-3}$ (D) $1:5\times10^6$ (E) $10^{10}\mathrm{m}^{-3}$。

《例 4》下列關於半導體性質的敘述中，哪些是正確的？

(A)純矽晶中，自由電子為電流載子，但電洞不是。

(B)純矽晶中若摻入磷的雜質，則成為 p 型半導體。

(C)p 型矽晶中，電洞為主要的(或多數的)電流載子，自由電子為次要的(或少數的)電流載子。

(D)p 型矽晶中有電流流通時，電洞和自由電子流動所形成的電流，兩者異向。

(E)二極體有整流的功能，乃因晶體內有一內建電場之故。【93.指考】【答】(C)(E)

《例 5》下列有關半導體的敘述，哪些正確？

(A)不含雜質的純半導體材料，其電子、電洞的密度相同

(B)純的半導體材料溫度越高時，電子、電洞的密度越大

(C)矽半導體加入 5 價雜質，會形成 P 型半導體

(D)二極體的 P、N 接觸面形成一空乏區，空乏區的 P 型部分帶正電

(E) PNP 三極體的基極為 N 型半導體【92.指考】【答】(A)(B)(E)

練習題1：

1. 何以 p 型半導體內的受體離子帶有負電性？

2. 設在 300K 時，純矽的原子密度爲 $5.00\times10^{28}\,m^{-3}$，其電子與電洞濃度均爲 $1.50\times10^{16}\,m^{-3}$，若使其晶體中每 1.00×10^{7} 個矽摻雜一個磷，求
(A)每單位體積內固有半導體之載體總數？
(B)摻雜後，導電載體的濃度總數？
(C)摻雜後，導電電洞的濃度？
(D)摻雜前後，導電載體濃度的關係？
答：(A) $3\times10^{16}\,m^{-3}$ (B) $5\times10^{21}\,m^{-3}$ (C) $4.5\times10^{10}\,m^{-3}$ (D) 6×10^{-6} :1

3.下面有關半導體導電性的敘述，何者正確？(A)在純矽半導體內摻入第三族元素，可以增加導電能力 (B)在純矽半導體內摻入第五族元素，可以增加導電能力 (C)在純矽半導體內摻入第二族元索，可製成 p 型半導體(D)在純矽半導體內摻入第六族元素，可製成 n 型半導體 (E)在純矽半導體內，不論摻雜何類原子，都可製成半導體。答：AB

4.下列有關金屬與半導體導電能力的敘述，何者正確？(A)溫度增加時，金屬與半導體的導電能力都會增加 (B)溫度增加時，金屬導電能力增加，但半導體的導電能力下降 (C)溫度增加時，金屬導電能力下降，但半導體的導電能力增加 (D)溫度增加時，金屬與半導體的導電能力都下降 (E)溫度變化只影響金屬的導電能力，但不影響半導體的導電能力。答：C

5.將微量的硼摻入純矽中，下列哪一敘述正確？(A)電洞數量增加 (B)自由電子數量增加 (C)電洞數多於自由電子數 (D)硼原子得到電子而帶負電 (E)矽帶正電。答：ACD

6.某半導體內有濃度爲 N_A 與 N_D 的受體雜質與施體雜質，且受體雜質與施體雜質均已游離。若該半導體內的自由電子與電洞的濃度爲 n 與 p 時，則下面哪個關係是正確的?(A)$N_D+p=N_A+n$ (B)$N_D+n=N_A+p$ (C)$N_D+N_A=n+p$ (D)$N_Dp=N_An$ (E)$N_Dn=N_Ap$。答：A

7.在半導體材料砷化　(GaAs)中摻入第二族元素時，砷化　會變成 p 型半導體或 n 型半導體？
答：p 型半導體

8.下列敘述何者正確？
(A)在本質半導體中加入微量的 5 價元素則形成 p 型半導體 (B)n 型半導體的多數載子爲電洞 (C)p 型半導體的少數載子爲電子 (D)本質半導體中所加入的 3 價元素，整體帶正電。(E)在 p 型半導體中，負責傳導電流的只有電洞，電子是沒有貢獻的。答：C

9.在本質半導體中(A)當溫度升高時，電阻係數減少 (B)在同一溫度下，矽之電阻係數較　爲高 (C)電阻係數係由本質載子密度決定 (D)電導係數與電阻係數相同 (E)在半導體中，不論 n 型或 p 型半導體，其電洞數目與自由電子數目皆相等。答：ABCE

10.n 型半導體材料在電性上屬於(A)帶負電 (B)帶正電 (C)電中性 (D)不一定。答：C

11.下列哪些元素摻入純矽半導體材料中，可將矽半導體轉變爲 n 型半導體？
(A)砷 (B)磷 (C)硼 (D)鋁。答：AB

12.摻雜(doping)是在本質半導體中加入雜質原子，若是摻雜濃度比爲 10^8：1，則矽晶體原子濃度約 5×10^{22} 個原子/cm^3，則雜質原子濃度爲何？答：5×10^{14} 個原子/cm^3

13.半導體內擴散電流發生的原因是：(A)兩端有電壓 (B)內部有電場 (C)載子之濃度不均勻 (D)溫度變化 (E)有雜質摻入。答：C

14.在本質半導體中摻入 5 價元素，則
(A)5 價原子會取代矽原子而釋放一個自由電子 (B)雜質原子變成正離子 (C)雜質原子稱爲施體 (D)稱爲 n 型半導體 (E)多數載子爲自由電子。答：ABCDE

15.下面有關半導體導電性的敘述，何者正確？(A)在純矽半導體內摻入第三族元素，可以增加導電能力 (B)在純矽半導體內摻入第五族元素，可以增加導電能力 (C)在純矽半導體內摻入第二族元索，可製成 p 型半導體(D)在純矽半導體內摻入第六族元素，可製成 n 型半導體 (E)在純矽半導體內，不論摻雜何類原子，都可製成半導體。 AB

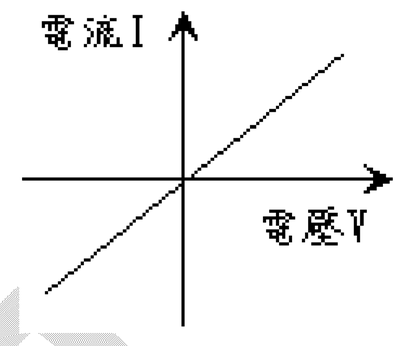
16.下列有關金屬與半導體導電能力的敘述，何者正確？(A)溫度增加時，金屬與半導體的導電能力都會增加 (B)溫度增加時，金屬導電能力增加，但半導體的導電能力下降 (C)溫度增加時，金屬導電能力下降，但半導體的導電能力增加 (D)溫度增加時，金屬與半導體的導電能力都下降 (E)溫度變化只影響金屬的導電能力，但不影響半導體的導電能力。 C

17.將微量的硼摻入純矽中，下列哪一敘述正確？(A)電洞數量增加 (B)自由電子數量增加 (C)電洞數多於自由電子數 (D)硼原子得到電子而帶負電 (E)矽帶正電。 ACD

18.某半導體內有濃度爲 NA 與 ND 的受體雜質與施體雜質，且受體雜質與施體雜質均已游離。若該半導體內的自由電子與電洞的濃度爲 n 與 p 時，則下面哪個關係是正確的?(A)$N_D+p=N_A+n$ (B)$N_D+n=N_A+p$ (C)$N_D+N_A=n+p$ (D)$N_Dp=N_An$ (E)$N_Dn=N_Ap$。 A

6-2　二極體

一、歐姆特性與非歐姆特性



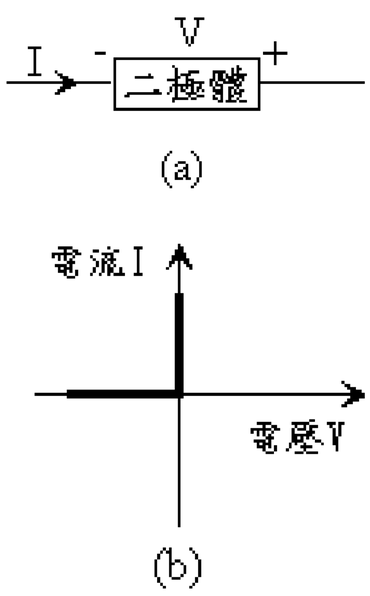
1.我們熟知的電阻器，其電流-電壓特性曲線為一直線，如圖所示，此直線斜率的倒數即為該電阻器的電阻值。此類電流-電壓成線性關係的性質，稱為歐姆特性**(ohmic property)**。

2.若一個兩端點的電子元件其電流-電壓曲線並非一條直線，則稱該元件具有非歐姆**(non-ohmic)**特性。尤其當正負電壓兩區段所對應的電阻值差異極大時(亦即，某一區段極易導通電流，另一區段不易導通電流)，則稱元件具有整流**(rectifying)**的特性，此元件稱為二極體**(diode)**。

註：每個電子元件都有其特別的電性表現或功能，通常我們以通過元件的電流及該元件端點上的電壓降之關係來描述電子元件的特性。通常，電子元件在直流電路中較容易分析，其工作原理與特性亦較易理解，若未特別聲明，則習慣上所稱的電流-電壓特性關係，都是指元件在直流電路的特性表現。將此直流的電流-電壓特性關係以線條圖形表示，稱為元件的靜態**(static)**特性曲線。

二、理想二極體

對理想的二極體而言，若其所受的電壓 **V** 與其導通的電流 **I** 極性如圖**(a)**所示時，則其所對應的電流-電壓特性曲線將如圖**(b)**所示的一般，在某一偏壓極性下(例如圖**(a)**中，**V＞0)**，導通的電流為零，因此其對應的電阻值為無窮大；在另一偏壓極性(例如圖**(a)**中，**V＜0)**的條件下，其導通的電流可為任意值，既然可導通任意大小(甚至無窮大)的電流，可見其對應的電阻值為零，因此電壓降亦為零。



三、半導體二極體～～p-n 二極體

1.p-n 二極體：

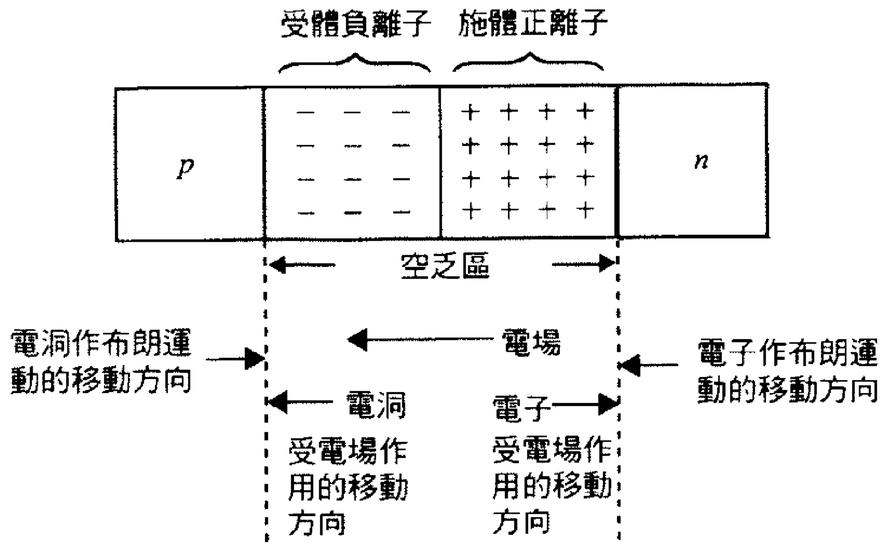
p-n 二極體由 **p** 型半導體與 **n** 型半導體接合而成，其工作特性取決於兩半導體接面**(junction)**處的電荷變化，下圖**(a)**、**(b)**與**(c)**為 **p-n** 二極體的外觀、構造與電路符號圖。

註：在分析二極體的基本工作特性時，通常只需考慮 **p** 型與 **n** 型半導體接面處的電荷變化情形，至於金屬層與半導體的接觸面所產生的電阻，成半導體本身所具有的電阻都可予忽略不計。

註：故若 **n** 型的雜質濃度遠大於 **p** 型的雜質濃度，則空乏區主要落於原為電中性的 **p** 型區；相反的，若 **p** 型的雜質濃度遠大於 **n** 型的雜質濃度，則空乏區主要落於原本為電中性的 **n** 型區。

2.p-n 接面與空乏區：

p 型半導體與 **n** 型半導體接在一起時，即使無外加電場的作用，但是由於布朗運動作用的關係，在 **p-n** 接面附近之 **p** 型區的多數載子(電洞)與 **n** 型區的多數載子(電子)會發生復合而消失。因此，靠近 **pn** 接面處的 **p** 型區與 **n** 型區，可移動的載子都消失了，分別剩下受體離子(電性為負；在 **p** 型區)與施體離子(電性為正；在 **n** 型區)及原即為電中性的半導體原子，如圖所示。此種缺乏載子的區域稱為空乏區。空乏區的寬度約等於可見光的波長(零點幾微米)，且在空乏區內的施體離子與受體離子的數目相等。



註：在空乏區內存在一個由正、負離子所建立的電場 $\mathbf{E_{in}}$，此電場的方向由施體正離子指向受體負離子(或由 **n** 型區指向 **p** 型區)。這個存在於空乏區的電場，會阻止 **p** 型區的多數載子(電洞)與 **n** 型區的多數載子(電子)通過空乏區。

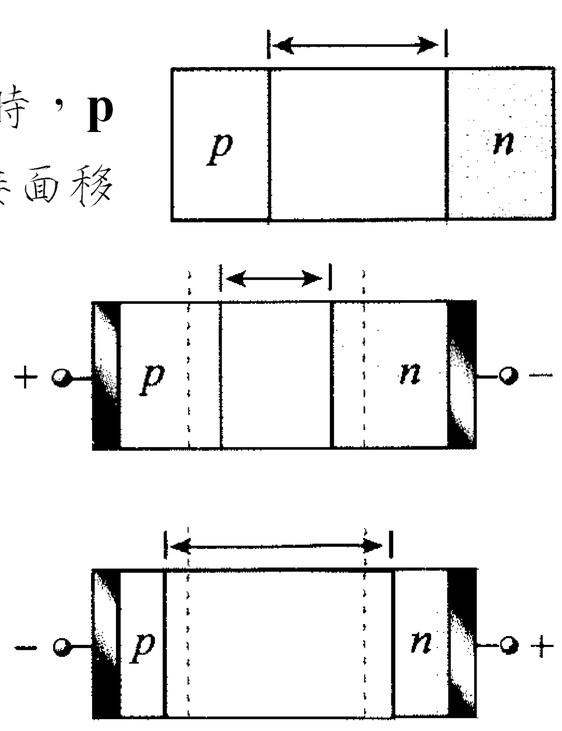
註：在溫度 $\mathbf{25^oC}$ 時，矽半導體內空乏區電場造成的電位差(或稱障壁電壓，切入電壓)約為 **0.7** 伏特，而　半導體的障壁電壓約為 **0.3** 伏特。當電子或電洞要橫越此區時，外界要對他們做功，以克服這個障壁電壓。接面處的障壁電壓高低與接面溫度有關，當接面處的溫度愈高時，障壁電壓也愈低。

3.電壓對空乏區寬度的影響：**p-n** 接面附近的空乏區寬度，可利用電壓改變。

(1)右圖同表示未加電壓時的空乏區。

(2)右圖中，**p** 型區接於電源的正端，而 **n** 型區接於電源的負端時，**p** 型區的電洞與 **n** 型區的電子，因受到電力作用，會向 **p-n** 接面移動，而使空乏區的寬度變窄。空乏區寬度變小時，區域內的正、負離子減少，多數載子容易通過此區。

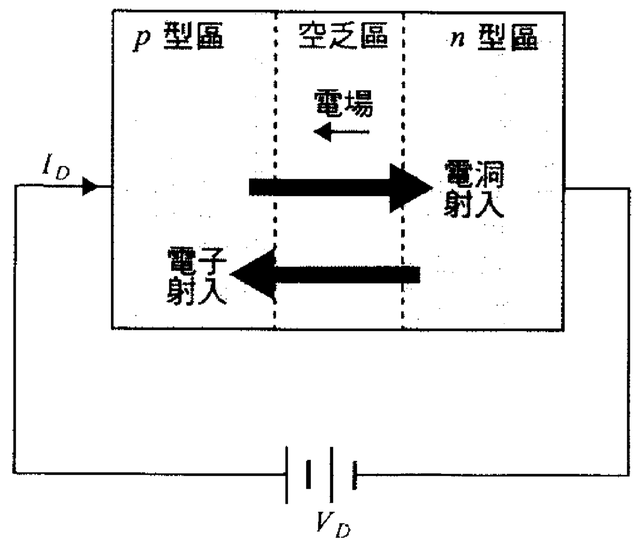
(3)右圖中，**p** 型區接於電源的負端，而 **n** 型區接於電源的正端時，**p** 型區的電洞與 **p** 型區的電子，受到電力作用，會往離開 **p-n** 接面的方向移動，而造成空乏區的寬度變寬。空乏區寬度變寬時，區域內的正、負離子增加，多數載子不容易通過此區。



四、二極體的順向偏壓

1.順向偏壓：

將電壓 $\mathbf{V_D}$ 接於 **p-n** 二極體的兩端，使 **p** 端接正，而 **n** 端接負，如右圖所示，由於此電壓會使空乏區的寬度減小，故而使得多數載子可以擴散通過空乏區，而造成電流 $\mathbf{I_D}$。當電壓 $\mathbf{V_D}$ 愈大時，空乏區愈窄，而電流 $\mathbf{I_D}$ 也會愈大，如此接法的電壓 $\mathbf{V_D}$，稱為順向偏壓。



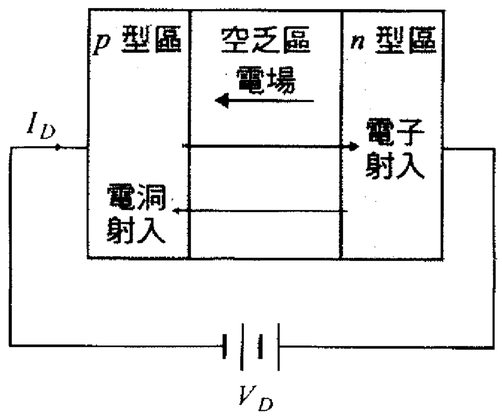
註：漂移電流與擴散電流：

載子受電場作用而移動造成的電流，稱為漂移電流；載子因濃度分布不均勻，而由高濃度擴散到低濃度造成的電流，稱為擴散電流。在二極體中，多數載子的電流為

擴散電流，而少數載子的電流為漂移電流。

2.逆向偏壓：

將電壓 V_D 接於 **p-n** 二極體的兩端，使 **p** 端接負，而 **n** 端接正，如右圖所示。由於此電壓會使空乏區的寬度增大，使得多數載子無法擴散通過空乏區，故電流 I_D 幾乎為零。如此接法的電壓 V_D，稱為逆向偏壓。



註：在逆向偏壓時，少數載子仍有機會進入空乏區內，並受到空乏區內電場 E_{in} 的作用，而產生微弱的電流(約為微安培～毫微安培)，此電流稱為逆向飽和電流。

※總體來說，在順向偏壓時，通過 **p-n** 二極體的電流主要由多數載子所決定，但在逆向偏壓時，因多數載子無法通過 **p-n** 接面，此時電路上的電流由少數載子決定，但其值幾乎為零。這樣的性質，清楚說明了 **p-n** 二極體的整流特性。

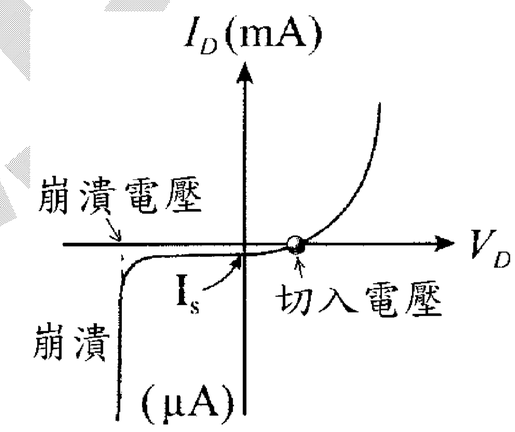
五、p-n 二極體的電流-電壓特性曲線

由實驗知：

1.偏壓為零($V_D=0$)：$I_D=0$

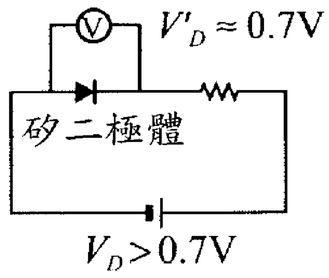
2.順向偏壓($V_D>0$)：

V_D 大於切入電壓(即障壁電壓)，I_D 會隨 V_D 的增加而增加，如右圖所示。(若 V_D 小於切入電壓時，$I_D=0$)



註：切入電壓：矽約為 **0.7** 伏特；　約為 **0.3** 伏特。

註：切入電壓與溫度有關，溫度升高時，切入電壓會降低。當順向偏壓大於切入電壓時，電流會大幅增加，因此電路上必須串一個電流，以限制電流大小，避免二極體燒毀，如右圖所示。當二極體導通時，其電壓降即為切入電壓。



3.逆向偏壓($V_D<0$)：

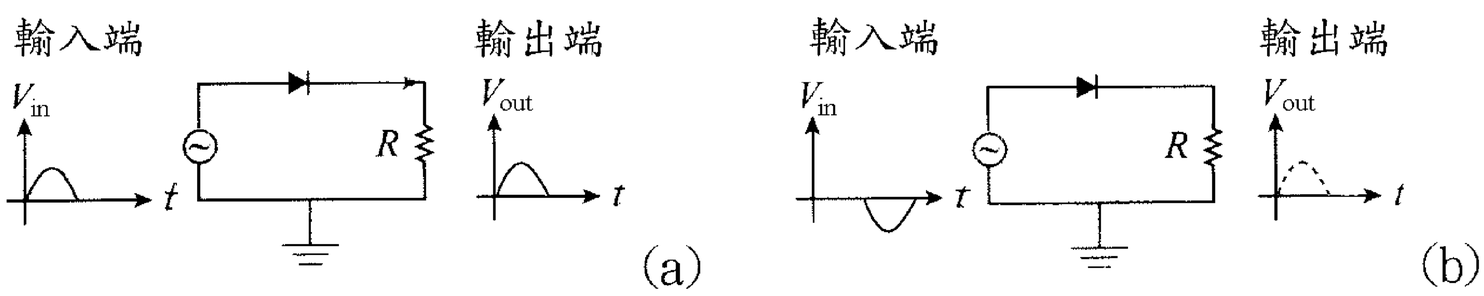
逆向偏壓未超過 **50** 伏特時，I_D 約為一定值，如上圖所示，一般將此電流記為逆向飽和電流 **Is**，其範圍約在 10^{-9} 安培～10^{-6} 安培間。逆向飽和電流，會隨著接面溫度的升高而變大。當逆向偏壓過大時(例如 **50** 伏特以上)，二極體會產生逆向崩潰現象，此時的電流極大。大多數的二極體，不能在逆向崩潰時工作。

六、p-n 二極體的應用

二極體具有單向導通電流的特性，可利用此特性搭配其他電子元件而設計裝置電路，以執行自動控制、電信號檢測等各類工作。本小節簡述二極體最直接的應用～～整流電路或整流器(**rectifier**)。

1.半波整流器：

下圖(**a**)、(**b**)表半波整流器電路的示意圖。將週期為 **T** 的正弦變化電壓施加在電路上，若不考慮二極體的切入電壓時：



(1)上半週期**(t＝0～T/2)**：

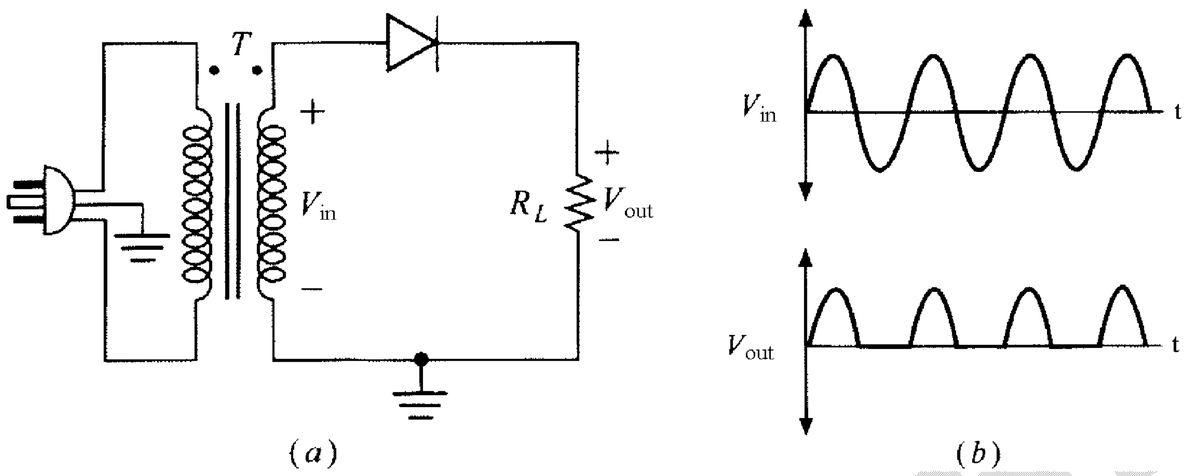
輸入電壓為順向偏壓**($V_{in}>0$)**，如上圖**(a)**所示，電流可順利通過 **p-n** 二極體，而在電阻器 **R** 上造成同相變化的電壓。

(2)下半週期**(t＝T/2～T)**：

輸入電壓為逆向偏壓**($V_{in}<0$)**，如上圖**(b)**所示，電流無法通過 **p-n** 二極體，因此電阻器 **R** 兩端無電壓。

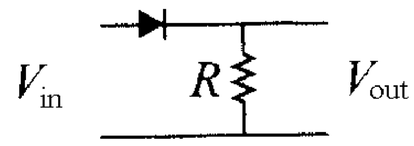
(3)由於在一個週期中，只有半個週期可以通過電流，因此將這種電路稱為半波整流器。

註：常見的半波整流器，在其輸入端處，都會先加上一個變壓器**(**稱為變壓器耦合式半波整流器**)**加上變壓器的設計，具有兩項優點：一來可依需要提高電壓或降低電壓，二來則可有效隔離交流電源與整流電路，避免造成電擊的危險。



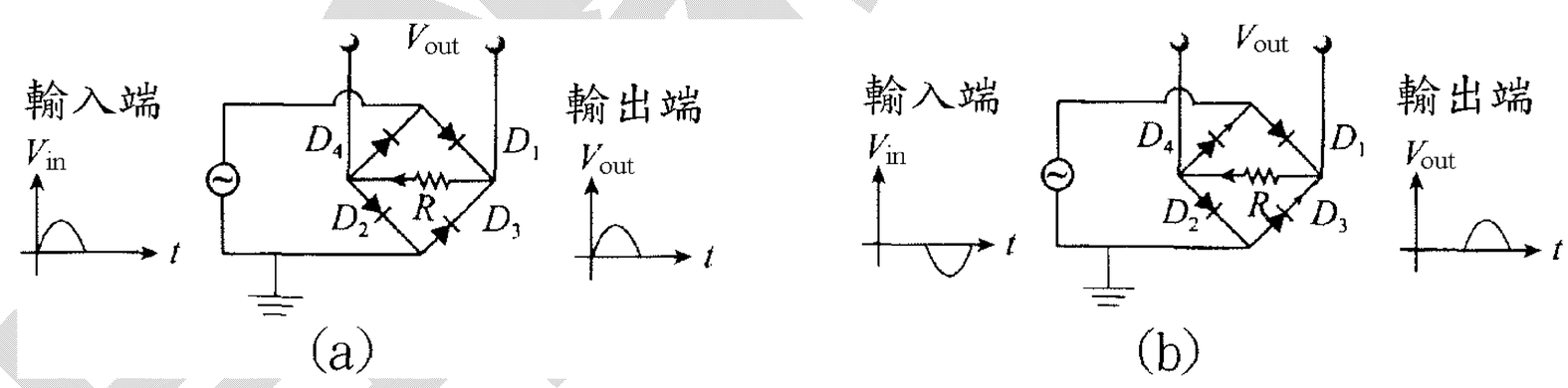
2.切入電壓對輸出的影響

右圖中，當二極體導通時，由於二極體上存在一個電位降**(**即為障壁電壓**)**，因此電壓兩端的輸出電壓 V_{out} 與輸入電壓 V_{in} 的數值是不同的。假定輸入電壓的最大值為 V_{in}，而對應輸出電壓的最大值為 V_{out}，則　對矽二極體而言：$V_{out}=V_{in}-0.7$



3.全波整流器：

下圖**(a)**、**(b)**表全波整流器電路的示意圖。當週期為 **T** 的正弦變化電壓施加在電路上，若不考慮二極體的切入電壓時



(1)上半週期**(t＝0～T/2)**：

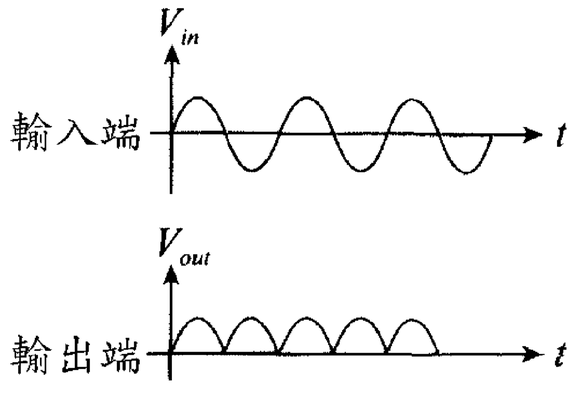
輸入電壓對二極體 D_1、D_2 為順向偏壓，但對二極體 D_3、D_4 為逆向偏壓，如圖**(a)**所示 因此電流會沿著 D_1、R、D_2 的路徑通過，並在電阻器 **R** 上造成同相變化的電壓。

(2)下半週期**(t＝T/2～T)**：

輸入電壓對二極體 D_1、D_2 為逆向偏壓，但對二極體 D_3、D_4 為順向偏壓，如圖**(b)**所示，因此電流會沿著 D_3、R、D_4 的路徑通過，並在電阻器 **R** 上造成反相變化的電壓。

註：注意，在一個週期內，不論是上半週期或是下半週期，通過電阻器 **R** 的電流方向始終是相同的**!**故將這種整流電路稱為全波整流器。此種由四個二極體連成的整流器，也稱為橋式整流器。

註：全波整流器的輸入端，一般也會加裝變壓器，構成變壓



器耦合式的全波整流器。

七、二極體的檢測

1.判定二極體的功能良好與否，依照下面三個原則

(1)正常的二極體：在逆向偏壓時，電阻很大，但在順向偏壓時，則呈現低電阻。

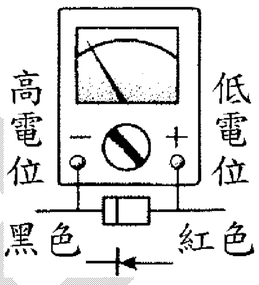
(2)完全損壞**(**斷路**)**的二極體：不論是逆向偏壓或是傾向偏壓，都有很高的電阻。

(3)短路的二極體：當二極體的內部發生短路時，會呈現極低的電阻。

2.利用三用電表檢測二極體

(1)將三用電表撥至 **R×10(Ω)**檔，並做好歸零調整與零歐姆調整。

(2)將三用電表的黑色測試棒與二極體的負端 **n** 接觸，而紅色測試棒與二極體的正端 **p** 接觸，如右圖所示。檢查三用電表的指針，若有偏轉，則代表二極體損壞。右無偏轉，則進行下一個步驟。



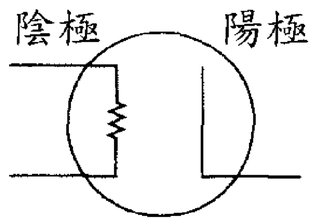
(3)將三用電表的黑色測試棒與二極體的正端 **p** 接觸，而紅色測試棒與二極體的負端 **n** 接觸，如右圖所示。檢查三用電表的指針，若無偏轉，則代表二極體損壞。若有偏轉，則進行下一個步驟。

(4)通過**(2)(3)**步驟後，表示二極體為正常，此時由三用電表的 **LV** 刻度線讀出電壓，若指針的位置在 **0.3** 伏特左右，表示此二極體為　　二極體；若指針的位置在 **0.7** 伏特左右，表示此二極體為矽二極體。

註：注意**!**當三用電表置於歐姆檔時，其黑色測試棒為內部電源的正端，而紅色測試棒為內部電源的負端。

八、真空管二極體：(參考)

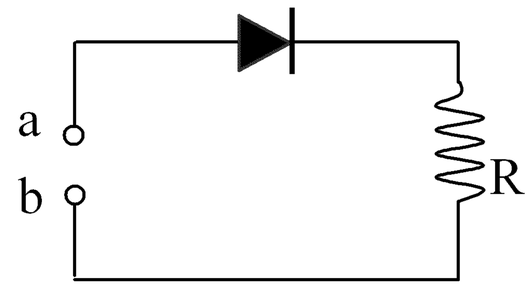
右圖為真空管二極體構造的示意圖。它是由真空管、可發射電子的陰極(電阻絲)與接收電子的陽極所組成。當陰極兩端接上電壓時，通過電阻絲的電流，會使電阻絲發熱而釋出電子。若在陽極-陰極間，再加上一個電壓，則電子的運動，會受到這個電壓的作用而加速或減速。



註：真空管二極體於 **1904** 年由英國科學家佛來明所發明。

註：真空管二極體有體積較大、工作溫度較高與壽命較短等缺點，因此於 **1939** 年後，被科學家歐耳所發明的半導體二極體～**p-n** 二極體所取代。

《例 6》請在下列電路中 a、b 處，劃上電池，使二極體的接法為順向偏壓。



《例 7》試判斷下圖中哪些矽二極體的偏壓屬順向偏壓？

(A)　+12V　0V

(B)　0V　-5V

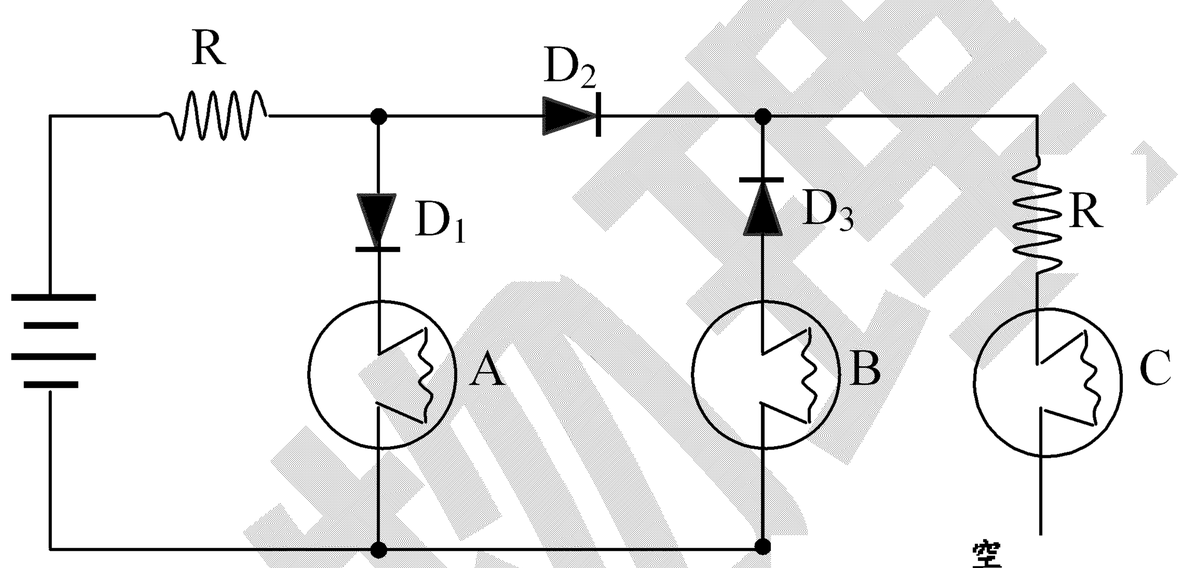
(C)　+5V　+3V

(D)　-5V　-3V

(E)　-3V　-5V

答：ABCE

《例 8》下圖所示的電路中，哪一個燈泡可能會亮？答：A、C



《例 9》在二極體內，p 型與 n 型半導體的接合面附近存在一個所謂的空乏區，如圖 10 所示。下列有關半導體及二極體的敘述，哪些正確？

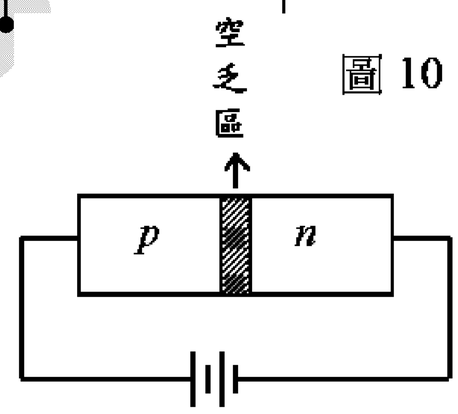


圖 10

(A)在空乏區內，靠近 p 型半導體處帶有正電

(B)純矽晶中若摻入磷的雜質便形成 n 型半導體

(C)n 型矽晶半導體中，自由電子及電洞均會傳導電流

(D)偏壓相等時，二極體在順向偏壓時的電流小於逆向偏壓時的電流

(E)在空乏區內，存在有一方向從 p 型半導體邊指向 n 型半導體邊的內建電場【93.指考補考】【答】(B)(C)

《例 10》關於二極體的工作特性，下列哪些敘述是正確的？

(A)二極體導通時，其電阻值完全消失

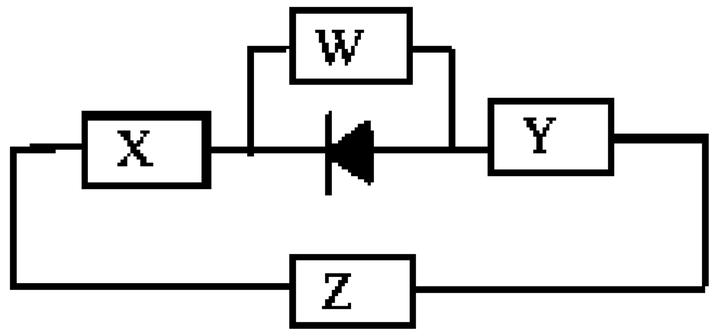
(B)只要加直流電壓訊號就可導通二極體

(C)加適當的交流電壓訊號可導通二極體

(D)當加順向偏壓時，二極體間的空乏區會增大

(E)當加逆向偏壓時，二極體間的空乏區會增大【95.指考研究】【答】(C)(E)

《例 11》若下圖所示為測量二極體特性曲線的電路圖，則 W，X，Y，Z 分別代表何種儀器或元件？



(A)W：伏特計，X：電阻，Y：安培計，Z：60Hz 交流電源供應器

(B)W： 60 Hz 交流電源供應器，X：電阻，Y：伏特計，Z：安培計

(C)W：安培計，X：輸出電壓可調變的直流電源供應器，Y：電阻，Z：伏特計

(D)W：伏特計，X：安培計，Y：電阻，Z：輸出電壓可調變的直流電源供應器

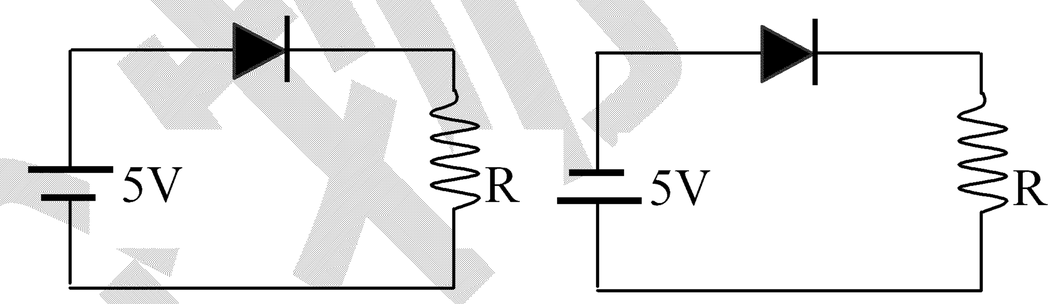
(E)W：電阻，X：伏特計，Y：安培計，Z：輸出電壓可調變的直流電源供應器【95.指考】

【答】(D)

《例 12》(1)電阻器(1kΩ)、矽二極體與電源(5V)連接如圖(a)，求電阻器的端電壓與電流。(矽的導通電壓為 0.7V)

(2)若連接如圖(b)，求電器的端電壓與電流。(參考二極體的 I-V 關係圖)答：

(1)4.3V、0.0043V(2)0V、0A



圖(a)　　圖(b)

《例 13》如圖 12 所示的電路中，交流電源的最大電壓為 12.0 V，理想變壓器的原線圈與副線圈的匝數比為 2：1，二極體可視為理想的整流器：順向偏壓時，二極體形同短路；逆向偏壓時，二極體形同斷路，電阻 R = 5.0 Ω。電阻 R 兩端的電位差(或稱電壓) VAB 定義為 VAB= VA -VB，VA 和 VB 分別為 A 點和 B 點的電位。試問下列敘述中，哪些正確？

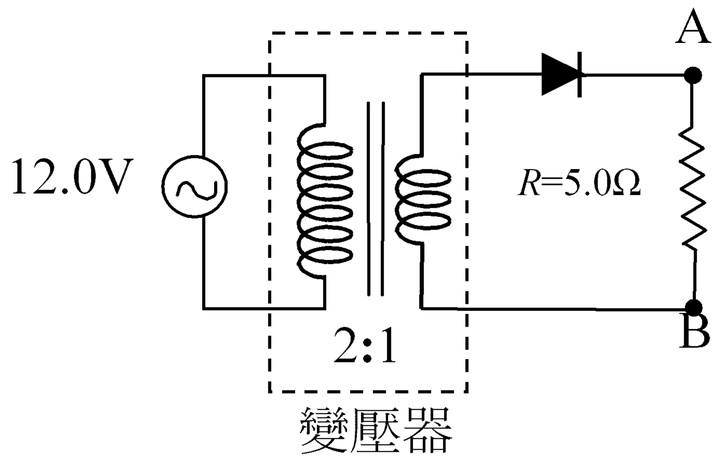


圖 12

(A)VAB 的最大值為 4.0V

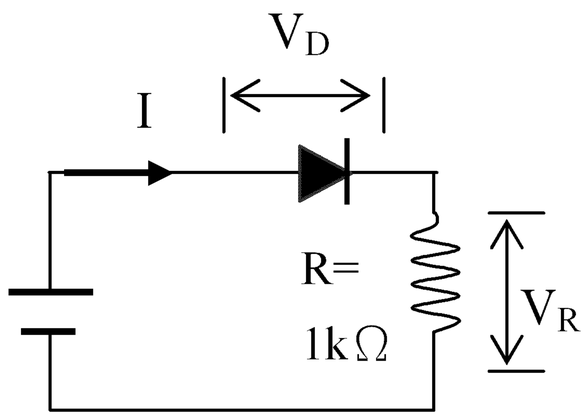
(B)VAB 的最小值為 0 V

(C)流經電阻 R 的電流為直流

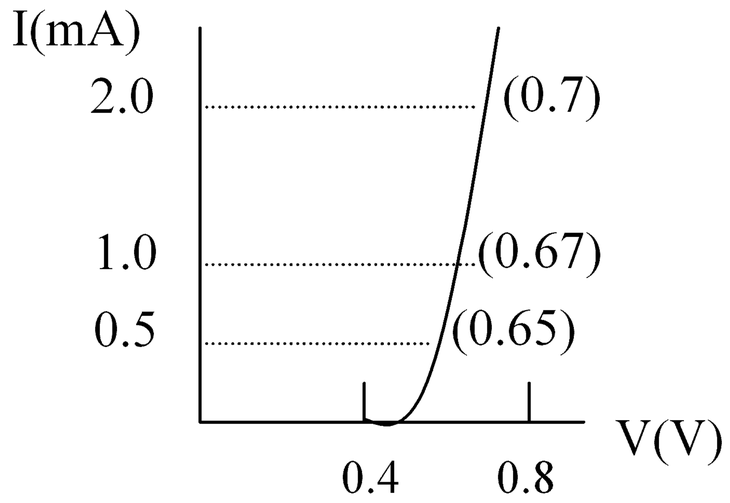
(D)流經電阻 R 的平均電流為零

(E)流經電阻 R 的最大電流值為 0.8A【94 指考】【答】(B)(C)

《例 14》用具有圖(b)特性的二極體構成如圖(a)的電路時，若電流 I=2mA，則電源電壓 V 為何？(A)0.7 (B)1.7 (C)2.7 (D)1.3 (E)0.6　伏特。



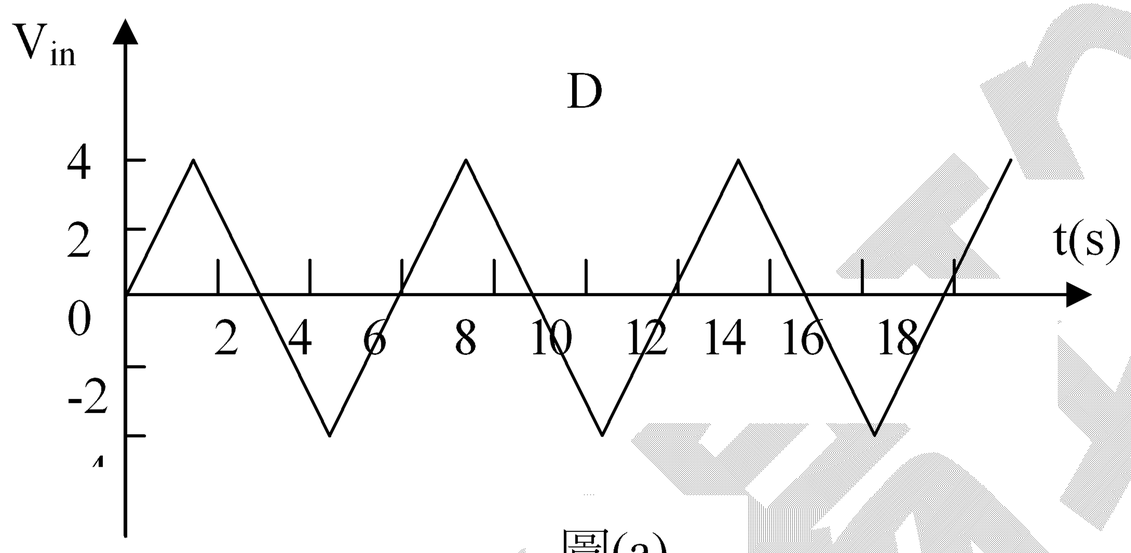
圖(a)



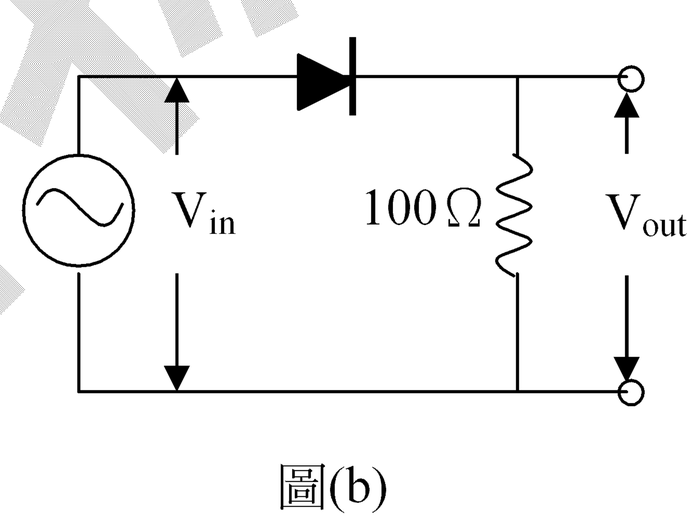
圖(b)

答：(C)

《例 15》在右圖(b)所示的電路中，若輸入電壓為下圖(a)所示的三角波形，試繪出在電阻兩端的輸出電壓 V_{out} 的波形。



圖(a)



圖(b)

《例 16》一個標示為 6V、5W 的白熾燈泡，原接通 6V、60Hz 的交流電源，其電路如圖 10(a)所示。若在電路上串接一個二極體，如圖 10(b)所示，則下列有關此二電路的敘述，何者正確？

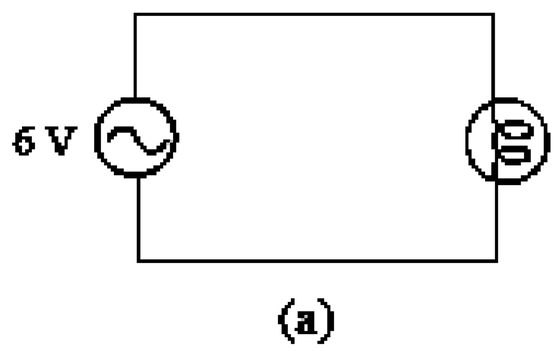
(A)若將二極體反接，則燈泡不會亮

(B)串接二極體後，燈光顏色較偏向紅色

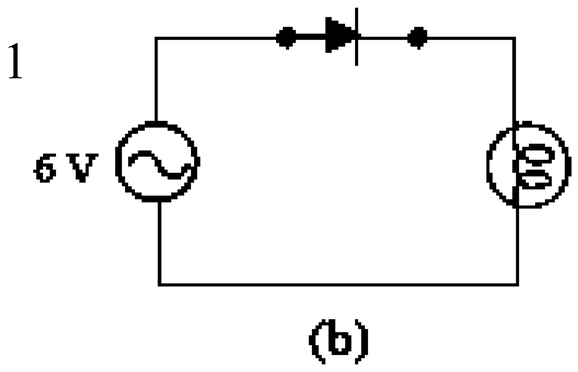
(C)串接二極體後，燈泡消耗的電功率減少

(D)串接二極體後，會明顯看到燈泡時亮時滅

(E)若將二極體改用一個 n 型半導體，則電流斷路，燈泡不會亮【94.指考研究】【答】(B)(C)



(a)



(b)

《例 17》二極體 D、小燈泡 L 和電動勢為 1.5V 的電池(內電組可以不計)組成如圖 1 所示的電路。此二極體的電流-電壓特性關係如附表所示。已知通過小燈泡的電流為 2.0mA，則此燈泡的耗電功率約為何？

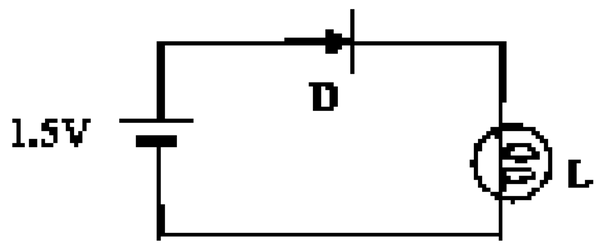


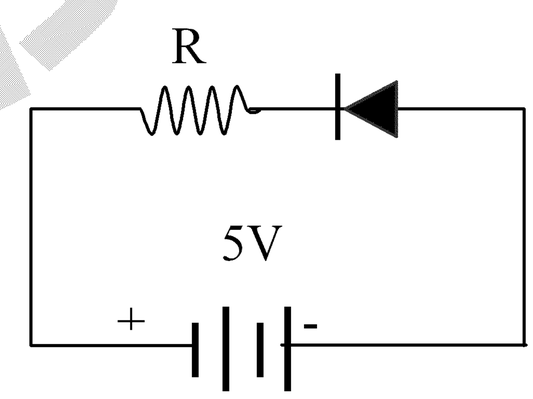
圖 1

電壓 (V)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
電流	0	0.02 μA	0.90μA	41 μA	2.0 mA	96 mA

(A)0.8mW
(B)1.6mW
(C)2.2mW
(D)2.5mW
(E)3.0mW【91.指考】【答】(C)

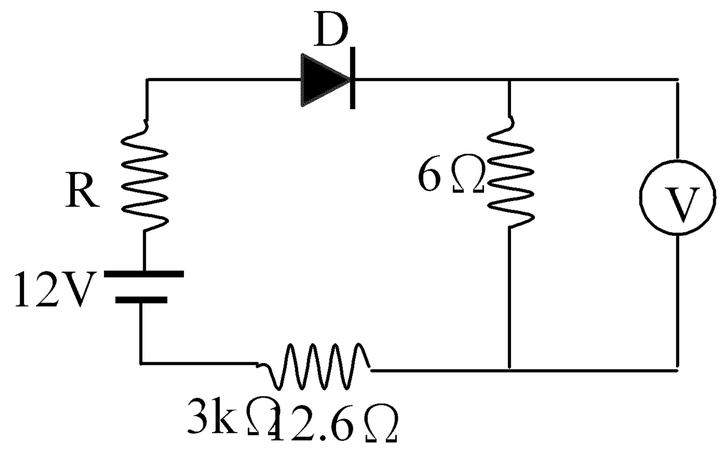
練習題 2：

1. 如右圖所示，通過二極體的電流為 1mA，
(1)圖中電阻 R 應為多少？(此時二極體電壓約為 0.7V)
(A)5kΩ (B)4.3kΩ (C)5Ω (D)4.3Ω (E)700Ω。
(2)若圖中的電源大小增為 15V，則通過二極體的電流應為：
(A)3.3 (B)3 (C)2.7 (D)2 (E)1 mA。答：B、A

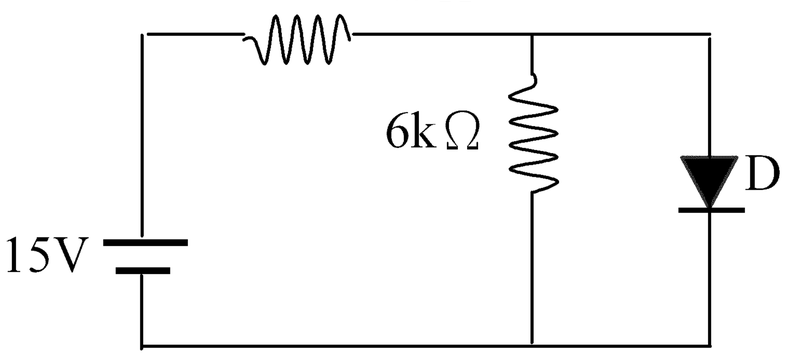


2.二極體若加順向偏壓，則：
(A)壁障電壓降低，空乏區寬度變小。(B)壁障電壓升高，空乏區變小。(C)壁障電壓便低，空乏區變大。(D)壁障電壓變高，空乏區變大。(E)壁障電壓與空乏區皆不變。
答：A

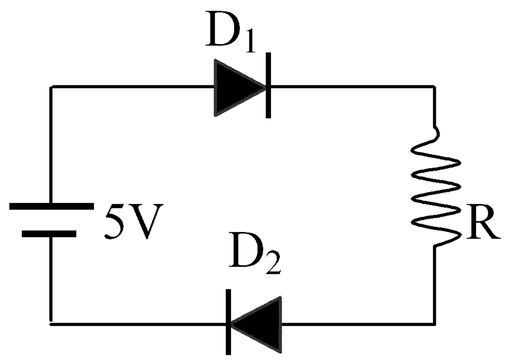
3.如圖所示，電路中伏特記所測得電壓為 3V，則 R 值應約為多少？(二極體的端電壓約為 0.7V) (A)2Ω (B)8Ω (C)4Ω (D)6Ω。
答：D



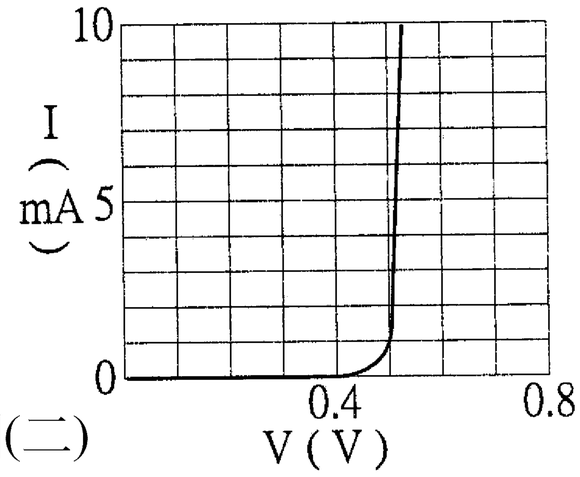
4.在右圖中，D 為理想二極體，則
(1)在電阻 2kΩ上的電壓和電流值應為：
(A)0V、0mA (B)4V、2mA
(C)6V、2mA (D)15V、5mA
(2)若 D 反接，則在 2kΩ上的電壓和電流應為：
(A)6V、3mA (B)6V、3mA
(C)6V、5mA (D)15V、5mA
答：(1)A(2)B



5.在右圖(一)的電路中，D_1 和 D_2 為兩個相同的二極體，R 為電阻。已知二極體的電流電壓特性曲線如右圖(二)所示，今測得電阻兩端的電壓為 4V，則電阻的耗電功率為：
(A)1mW (B)2mW (C)4mW (D)8mW (E)16mW。答：C



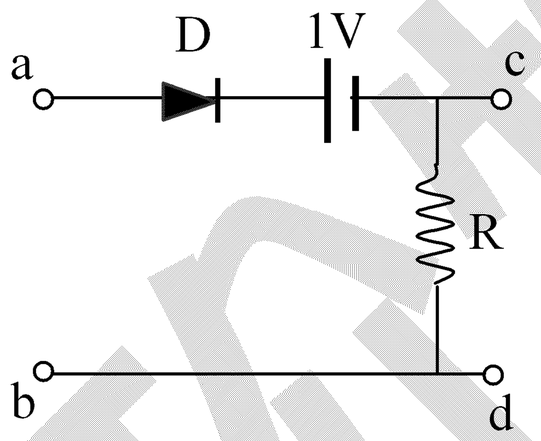
圖(一)



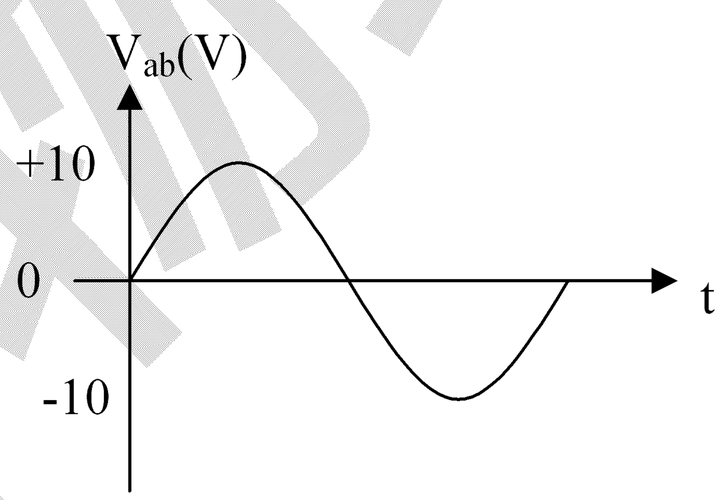
圖(二)

6.有關 p-n 接面二極體的特性，下列敘述錯誤的是：
(A)受到逆向偏壓時，空乏區的寬度變大(與不加偏壓時比較)
(B)空乏區電場方向，由 p 區域指向 n 區域。(C)當順向偏壓時，電壓越大，二極體的電阻越小。(D)接逆向偏壓時，會有微弱的逆向電流，此電流隨著電壓而逐漸升高。
答：BD

7.右圖(一)的電路中，將交流電壓加在 a、b 兩端上，其波形如圖(二)所示。已知矽二極體 D 的導通電壓為 0.7V，則
(1)電阻器兩端 c、d 間的電壓 V_{CD} 隨時間 t 變化的圖形為何？
(2)承上題，若將二極體反接時，輸出的波形又為何？答：



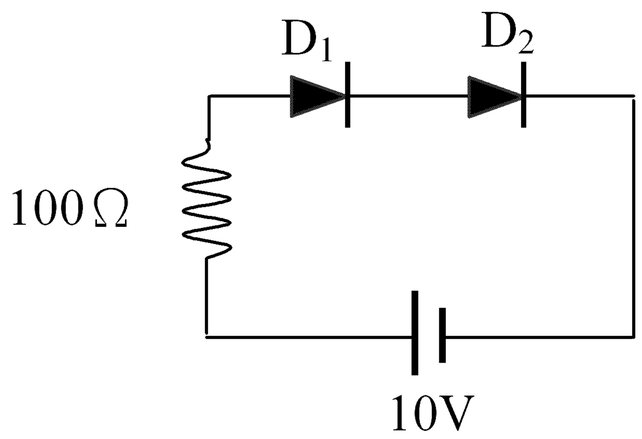
圖(一)



圖(二)

8.關於 p-n 二極體，下列敘述何者錯誤？
(A)pn 接面附近會產生一空乏層。(B)pn 二極體具有單向導通作用，故具整流性。(C)pn 二極體在逆向偏壓下，處於沒有導通狀態，仍有微量的逆向飽和電流，其大小與外加偏壓沒有太大關係，但對溫度甚敏感。(D)pn 二極體為順向偏壓時，空乏層寬度會變小，而使得載子越過接面到達對面，造成大量的電流流動，而達到電流放大的效果。
答：D

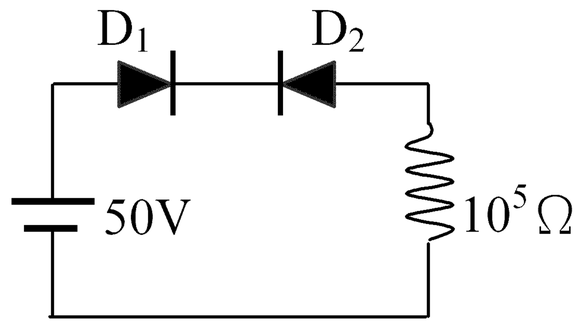
9.兩個矽二極體 D_1 和 D_2 串聯如右圖，若電池的內電阻不計，則：
(1)D_1 與 D_2 的偏壓是順向或逆向偏壓？
(2)電阻兩端的電壓為何？
(3)通過電阻的電流為何？
答：(1)順向偏壓(2)8.6V(3)0.086A



10.二極體串聯 20Ω電阻，若電阻電壓為 2V，二極體電流為何？答：0.1A

11.若二極體電壓為 0.7V，電流為 10mA，則二極體功率為何？答：7×10^{-3} 瓦特

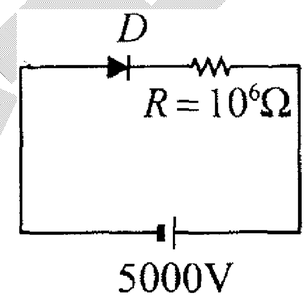
12.將一個 50V 的直流電源與兩個矽二極體連接如右圖。已知二極體的逆向飽和電流為 10-6A，則電阻器的電壓為何？
答：0.1V



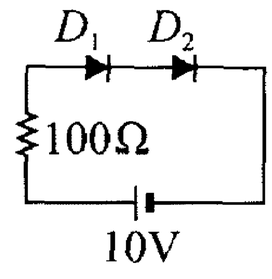
13.作半波整流時，最少需要幾個二極體？答：1 個

14.在某個二極體的 p-n 接面中，其 p 型區內空乏區的寬度大於 n 型區內的空乏區。若此二極體 p 型區與 n 型區摻入雜質的濃度分別為 N_A 與 N_D，則 (A)$N_A>N_D$ (B)$N_A=N_D$ (C)$N_A<N_D$ (D)條件不足，不能決定。　C

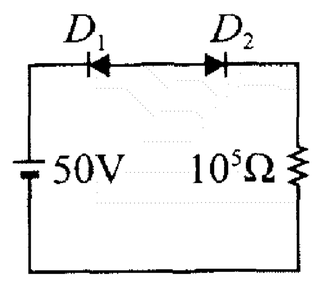
16.在右圖的電路中，假定矽二極體處於順向偏壓時，其電阻值為 25 歐姆；處於逆向偏壓時，其電阻值為 10^8 歐姆，則 (1)圖中所示的二極體 D 是順向偏壓或逆向偏壓？(2)通過二極體的電流約為多少？



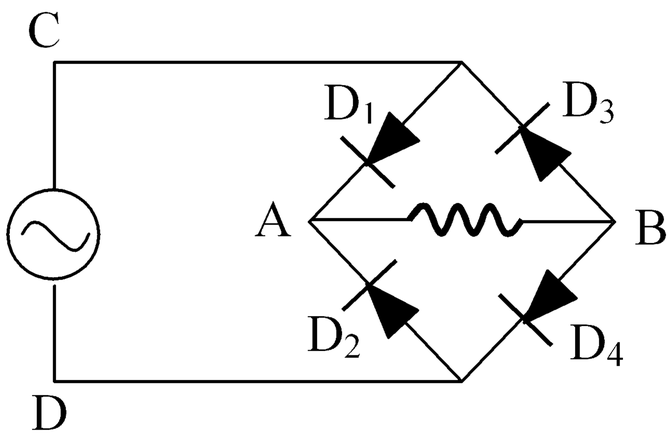
17.兩個矽二極體 D_1 與 D_2 串聯如右圖，若電池的內電阻不計，則 (1)D_1 與 D_2 的偏壓是順向偏壓或逆向偏壓？(2)電阻兩端的電壓為何？(3)通過電阻的電流為何？(矽二極體的切入電壓為 0.7 伏特)



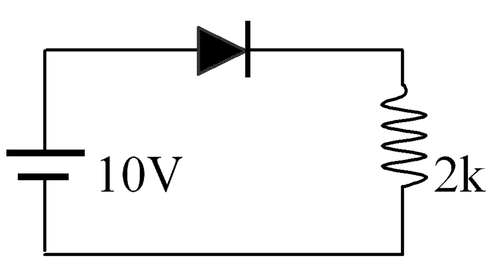
18.將一個 50 伏特的直流電源與兩個矽二極體連接如右圖。已知二極體的逆向飽和電流為 10^{-6} 安培，則電阻器的電壓為何？



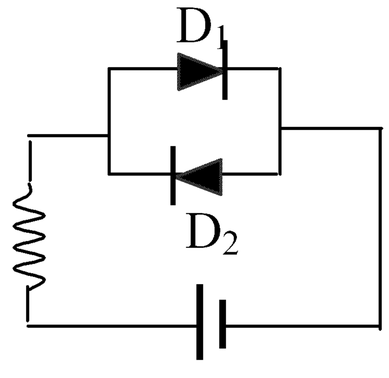
19.如圖為全波整流電路，以交流電輸入，電阻 R 代表負載。當 C 電位高於 D 電位時，
(1)會作用的二極體是：
(A)D_1 (B)D_2 (C)D_3 (D)D_4 (E)線路為斷路。
(2)承上題，此時電流的方向為何？
(A)CDD_2D_1C (B)CDD_2RD_3C (C)DD_4D_3C
(D)DD_2 再分為 D_1 及 RD_3 回到 CD
(E)線路為斷路，所以沒有電流。答：B



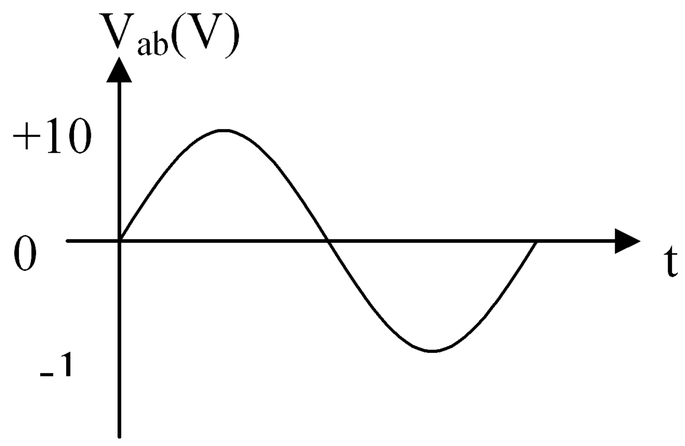
20.如圖所示，計算通過電阻的電流、電阻兩端的電位差、電阻的消耗功率及二極體的功率。
答：4.65mA、9.3V、43.245×10^{-3}w、3.255×10^{-3}w



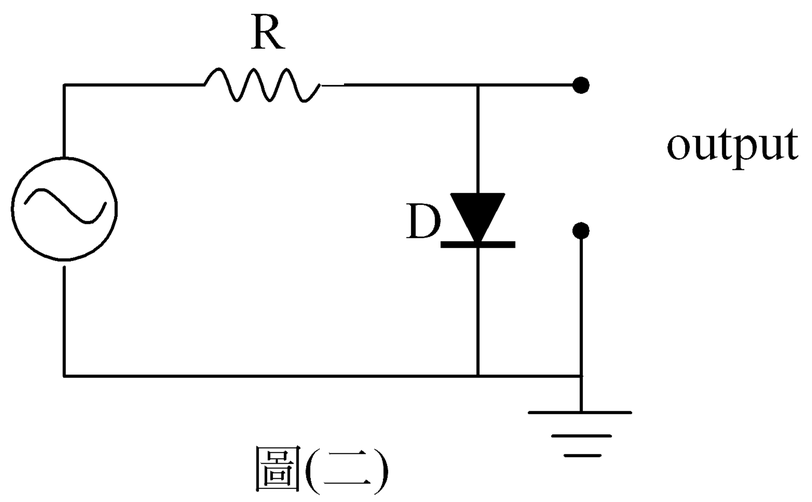
21.在右圖的線路中，二極體 D_1 和 D_2，何者是順向偏壓狀態？答：D_1



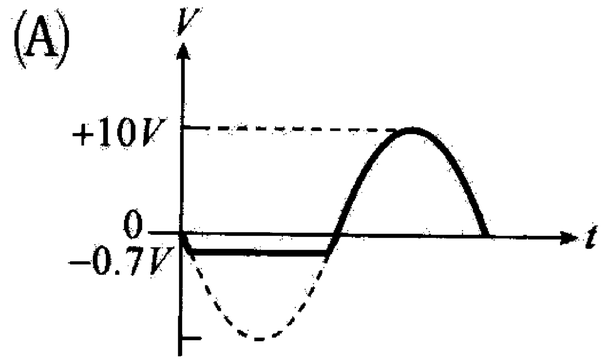
22. 右圖為交流電源的波形與電路，則輸出端電壓的波形應為下列哪一項？(已知二極體導通電壓為0.7V)

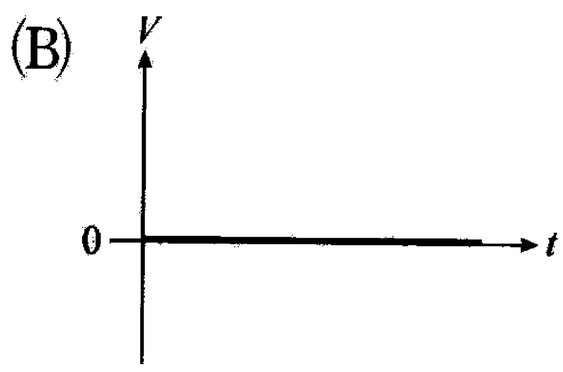


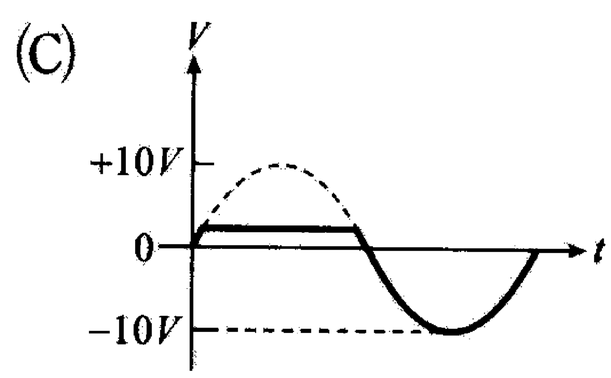
圖(一)

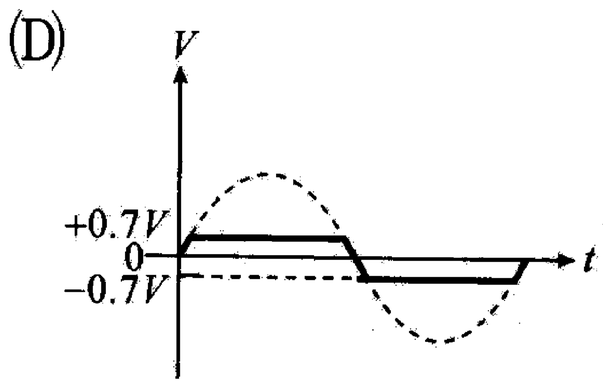


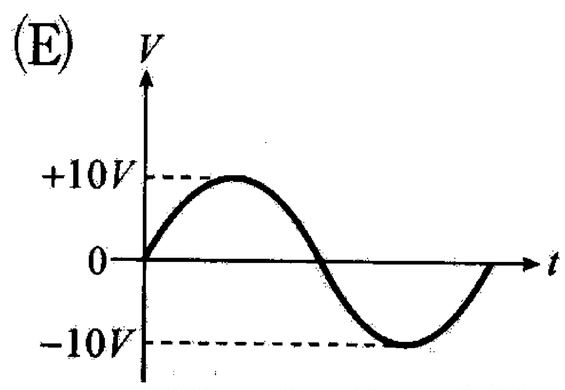
圖(二)









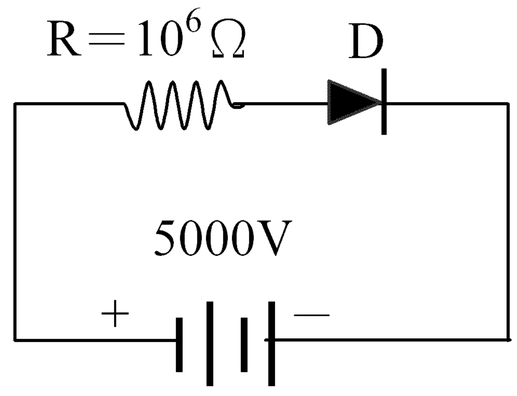


23.在下圖的線路中，假定矽二極體處於順向偏壓時，其電阻值為 25 Ω；處於逆向偏壓時，其電阻值為 $10^8\Omega$。則：

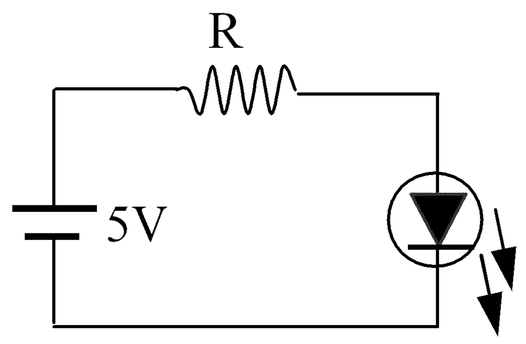
(1)圖中所示二極體 D 是順向或逆向偏壓？

(2)通過二極體的電流約為多少？

答：(1)逆向偏壓(2)4.95×10^{-5}A



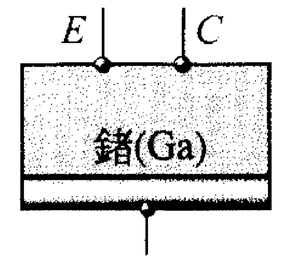
24.對一般發光二極體而言，約 5~20mA 便足以見到所發出的可見光。當電壓繼續升高時。所通過更大電流的熱效應將造成二極體內部溫度迅速提升，足以毀壞二極體。因此使用時，應該串聯一適當的電阻，限制所能導通的電流，以保護二極體。以圖中的電路而言，若想限制發光二極體的最大電流為 20mA，且對應二極體的電壓為 0.8V。若電源電壓最大為 5V，則保護電阻的最小阻值應為何？答：210Ω



22-3　雙極性接面電晶體

一、電晶體

※**1947** 年間，巴丁**(John Bardeen**，美國人，**1908-1991)**、布萊登**(Walter Brattain**，美國人，**1903-1987)**和蕭克利**(William Shockley**，美國人，**190-1989)**在美國貝爾實驗室首次製造出具有電流放大作用的固態三極體，並稱為點接觸電晶體**(Point contact transistor)**。



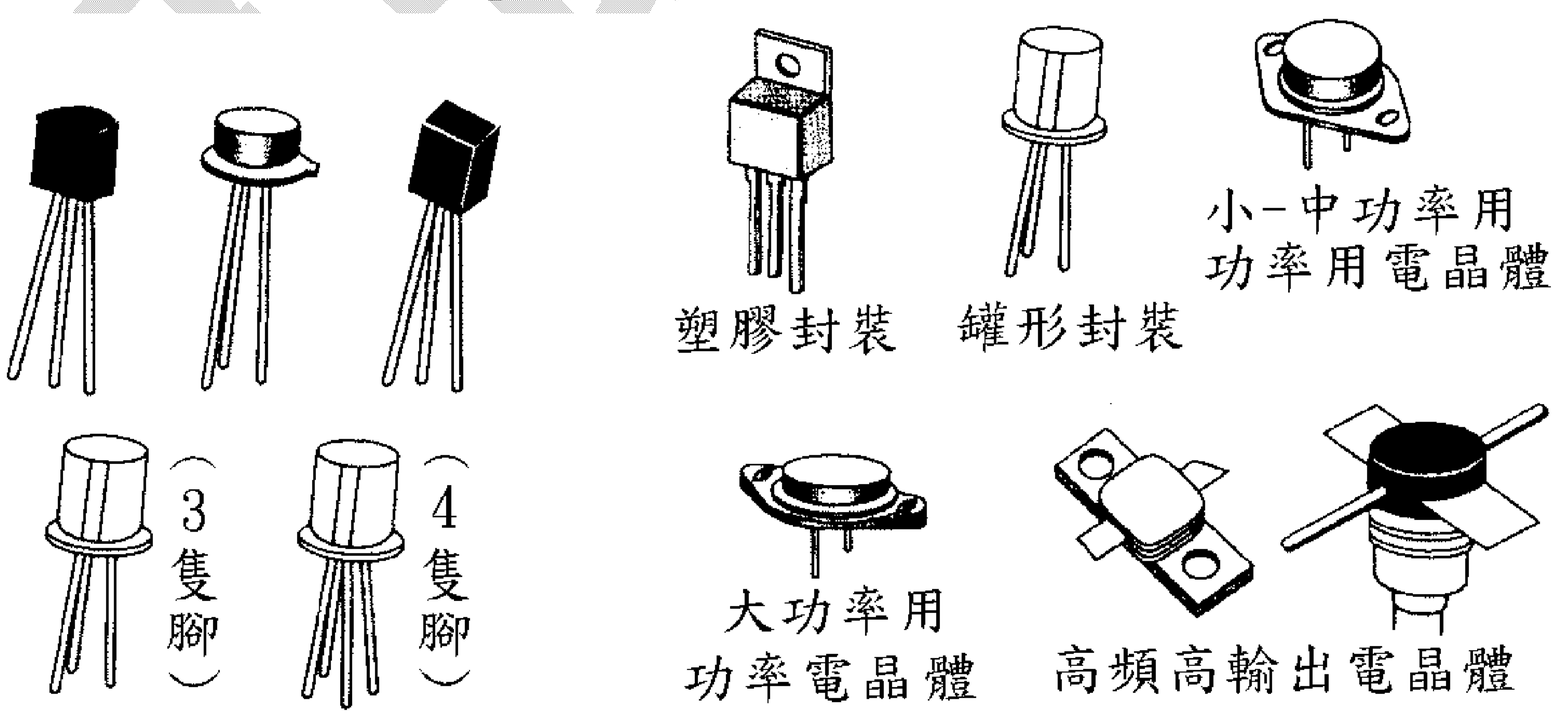
※右圖為點接觸電晶體的示意圖，兩根金屬電極以非常接近的距離，分別與半導體- 的基座連接，由其中一根金屬電極射出的電子，通過半導體後，可由另一根金屬電極收集，若改變金屬電極的電壓，則可控制通過半導體上的電流量。點接觸電晶體是一個三端元件，其三個對外的接點分別稱為射極**(emitter**，簡記為 **E)**，基極**(base**，簡記為 **B)**與集極**(collector**，簡記為 **C)**。由於點接觸電晶體的穩定性不佳，因此被後來的接面電晶體所取代。

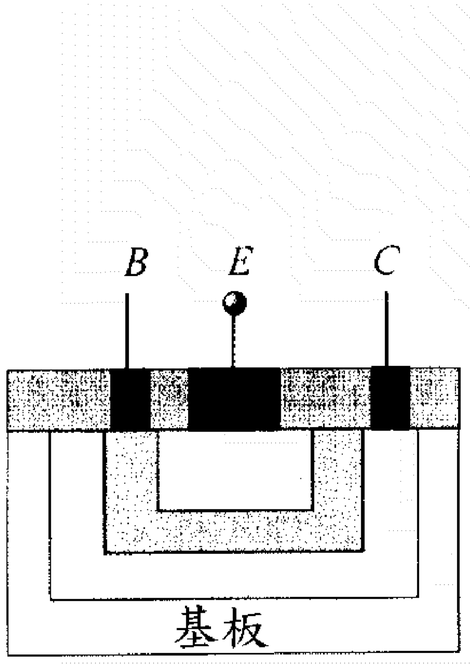
※**1948** 年蕭克利設計兩個 **p-n** 接面組合的結構，製作出劃時代的電子元件～～接面電晶體，其特性穩定並且容易以製程來控制元件的特性，旋即成為當時電子元件的主流。由於接面電晶體工作時，電子和電洞對電晶體的電流導通都有所貢獻，因此，接面電晶體亦稱為雙極性接面電晶體**(Bipolar Junction Transistor**，**BJT)**，以下簡稱為雙極性電晶體。

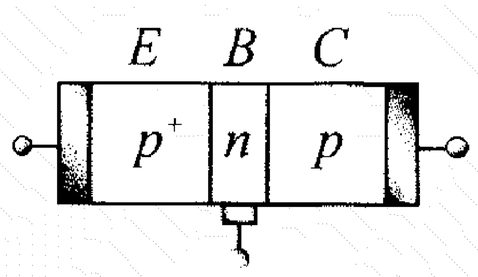
註：電晶體**(transistor＝transfer resistor)**，其本意是電阻轉變器，意即是一種能改變電阻的元件。

二、雙極性接面電晶體(BJT)

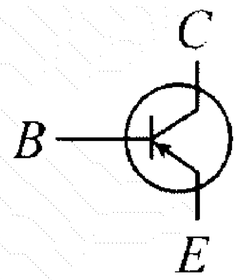
1.構造：雙極性接面電晶體由三個半導體組成**(2** 個 **n** 型半導體夾著寬度極窄的 **p** 型半導體**(npn)** 或 **2** 個 **p** 型半導體夾著寬度極窄的 **n** 型半導體**(pnp))**，下圖為電晶體外觀、結構、電晶體種類與電路符號。**(**圖中 $\mathbf{p^+}$ 與 $\mathbf{n^+}$ 代表更高濃度雜質，注意電路符號中射極 **E** 與基極 **B** 間的箭頭，恆由 **p** 指向 **n)**。



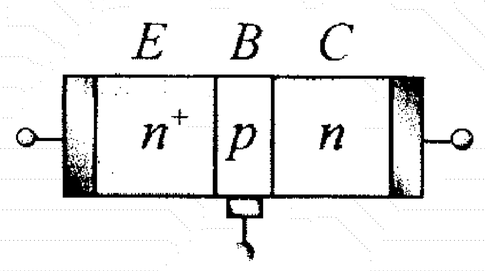




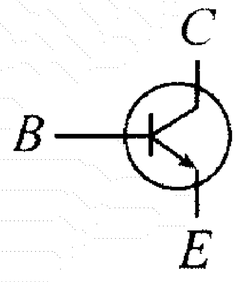
pnpBJT



pnpBJT



npnBJT



npnBJT

(1)雙極性電晶體結構雙極性電晶體內部的主要結構為三個中性的半導體區及兩個 **pn** 接面所形成的空乏區。其中，最關鍵之處在於中間的中性基極區寬度要足夠的小，才有明顯的電晶體特性。

(2)就電晶體的製程來看，乃利用摻入濃度更高且不同極性**(n** 型或 **p** 型**)**雜質的方法，以改變原有半導體的 **n** 型或 **p** 型極性，來製作 **npn** 及 **pnp** 電晶體等。因此，各區域的雜質濃度皆不相同。

2.射極 **E**、基極 **B** 與集極 **C**：

(1)射極**(emitte)E**：發射載子**(**摻雜濃度很高**)**

(2)基極**(base)B**：載子擴散與復合的地方**(**摻雜濃度低，且厚度很薄**)**。

(3)集極**(collector)C**：收集載子**(**摻雜濃度低，但散熱能力要良好**)**。

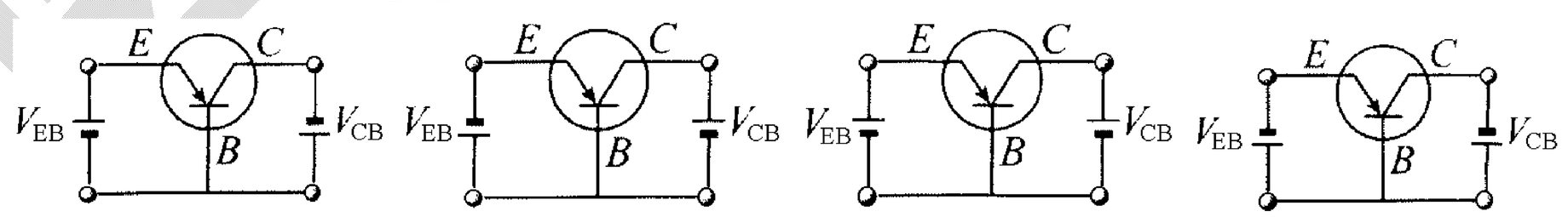
3.雙極性接面電晶體的工作模式：

由於雙極性接面電晶體有兩個 **p-n** 接面，因此按照所加偏壓的不同，可區分為四種工作模式：順作用、逆作用、飽和與截止。

	順作用	逆作用	飽和	截止
射極-基極(E-B)	順偏	逆偏	順偏	逆偏
集極-基極(C-B)	逆偏	順偏	順偏	逆偏
特性	放大	不適於放大	閉合的開關	切斷的開關

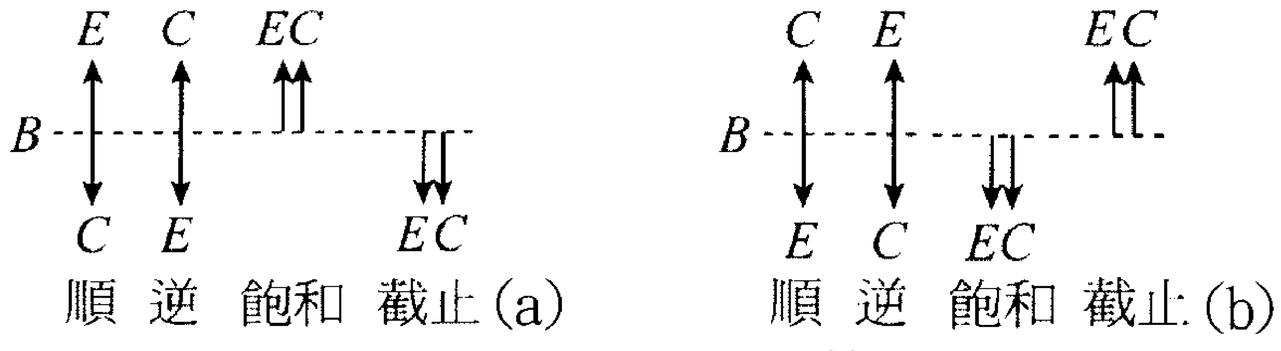
註：順作用區，也簡稱為作用區、主動區或活動區。

(1)下面 **4** 個圖形，是以 **pnp BJT** 為例，表示出 **4** 種不同工作模式時的偏壓接法。



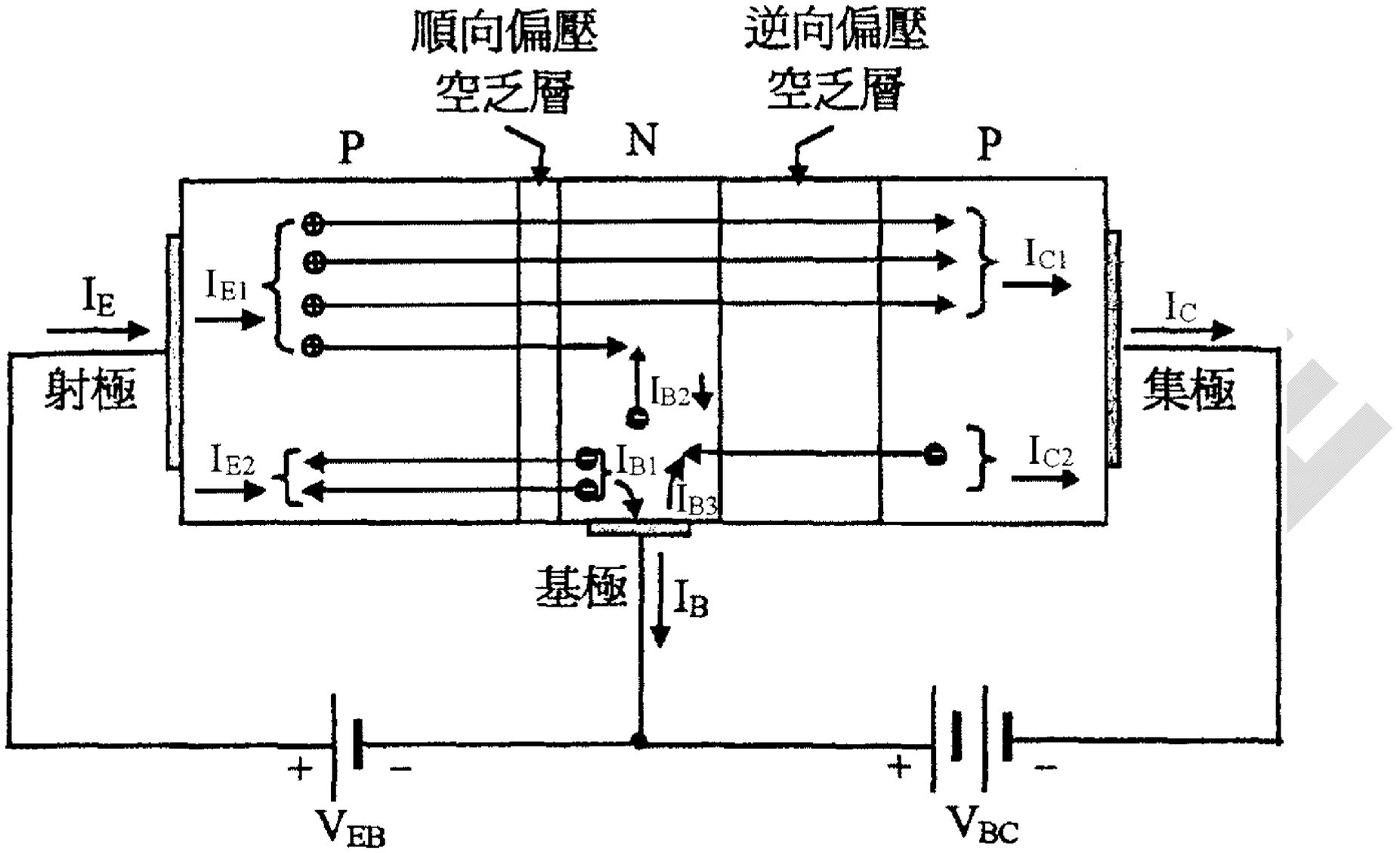
順作用　　逆作用　　飽和　　截止

(2)pnp 電晶體在各工作模式時，各極電位相對高低的示意圖如下圖**(a)**所示；而 **npn** 電晶體於各工作模式的各極電位相對高低，則如下圖**(b)**所示。



三、雙極性接面電晶體(BJT)的工作原理：

電晶體作為放大器使用時，電晶體必須處於順作用。底下以 **pnp** 電晶體，說明電晶體在順作用下的工作原理(如下圖)



1.電壓對各接面的作用：

射**(E)-**基**(B)**接面為順向偏壓 **E**、**B** 接面的空乏層縮小；

基**(B)-**集**(C)**接面為逆向偏壓 **C**、**B** 接面的空乏層則擴大。

2.因偏壓作用而產生的各種電流：

(1)在高摻雜濃度的射極區內的多數載子(電洞)，很容易經由擴散穿過 **E**、**B** 接面，因此形成電流 $\mathbf{I_{E1}}$。

(2)進入基極區的電洞，在 **n** 型半導體內屬於少數載子，但由於基極區的厚度非常薄，絕大多數的電洞得以繼續向前，進入 **C-B** 接面的空乏層，受到該層內建電場的吸引，被掃入集極區形成電流 $\mathbf{I_{C1}}$。

(3)由於電洞在 **n** 型的基極區會有許多機會與電子復合而消失。因此電洞不必然可以全部從基極區的左端順利移動至基極區右端(也因此而造成上述電洞在基極區內的的濃度變化的情形)。這些與電子復合而消失的電洞所造成的電流，成為基極的部分電流 $\mathbf{I_{B2}}$。

(4)射**-**基間的順向偏壓，除了造成上述電洞射入電流外，亦可使不少的電子自基極區通過空乏區到達射極區，形成不可忽略的電子射入電流，而成為電晶體基極的部分電流 $\mathbf{I_{B1}}$，同時也成為電晶體射極的部分電流 $\mathbf{I_{E2}}$(即 $\mathbf{I_{E2}=I_{B1}}$)。

$\Rightarrow \quad \mathbf{I_E=I_{E1}+I_{E2}=I_{E1}+I_{B1}}$

※但由於射極區的摻雜濃度遠大於基極區，所以 $\mathbf{I_{E1}>>I_{E2}}$，故電洞為 **pnp** 電晶體中傳送電流的多數載子。

(5)在集極區靠近 **C-B** 接面的少數載子，即自由電子，一旦漂移進入空乏層，便立即受到內建電場的吸引而被掃入基極區，形成電流 $\mathbf{I_{B3}}$(圖中 $\mathbf{I_{C2}=I_{B3}}$)。

(6)I_{E1}為電洞在其極區左端的電流，**I_{C1}**為電洞在基極區右端的電流，**I_{B2}**為電洞在基極區兩端間所流失的電流，

故可得 **$I_{E1}=I_{B2}+I_{C1}$**。

※由於雙極性電晶體的基極寬度極小，僅有很少量的電洞與電子復合，因此，**$I_{B2}<<I_{E1}$**。

(7)綜合以上的敘述，由圖中可得

$I_E=I_{E1}+I_{E2}$　　$I_B=I_{B1}+I_{B2}-I_{B3}$　　$I_C=I_{C1}+I_{C2}$

$\Rightarrow I_E=I_B+I_C$

(由於電晶體為電中性的元件，流入和流出的電流應相等。**)**

※上式中 **I_E**為流入射極的總電流，**I_B**為流出基極的總電流，**I_C**為流出集極的總電流。

※當 **pnp** 電晶體的射-基接面為順向偏壓，基-集接面為逆向偏壓時，**$I_{B1}<<I_{E1}\fallingdotseq I_C$**。

若射極區的電洞濃度遠高於基極的電子濃度，**$I_{E1}>>I_{B1}=I_{E2}$**。

因此，**$I_E\fallingdotseq I_C>>I_B$**。

四、電流增益：

雙極性電晶體特性表現的評估，乃比較具輸出電流對輸入電流大小的比值關係，此一比值亦稱為電流增益。

1.共基極電流增益**(**常以符號α表示**)**：

集極電流相對射極電流的比值$\Rightarrow \alpha=\dfrac{I_C}{I_E}$

※代表由射極區出發的多數載子有多大的比例可直接穿越基極區，進入集極區，而不至於被基極區內的自由電子俘獲復合。

2.共射極電流增益**(**常以符號β表示**)**：

集極電流相對基極電流的比值$\Rightarrow \beta=\dfrac{I_C}{I_B}$

3.由於 $I_C=I_E-I_B=\dfrac{I_C}{\alpha}-I_B$ $\Rightarrow$ 整理得 $I_C=\dfrac{1}{\frac{1}{\alpha}-1}I_B=\dfrac{\alpha}{1-\alpha}I_B$

$\Rightarrow$可得$\beta=\dfrac{\alpha}{1-\alpha}$　　**(**若$\alpha=0.99$，則$\beta=99$**)**

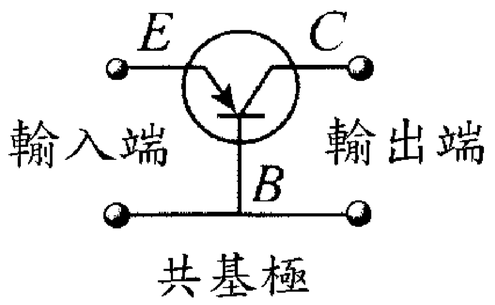
※常見的雙極性電晶體，共基極電流增益α值約在 **0.95** 至 **0.99** 之間，相對的，其共射極的電流增益β就大得多了。普通電晶體的β值約在 **80～200** 之間。

註：在電晶體規格表中，直流β常以 **h_{FE}** 表之。

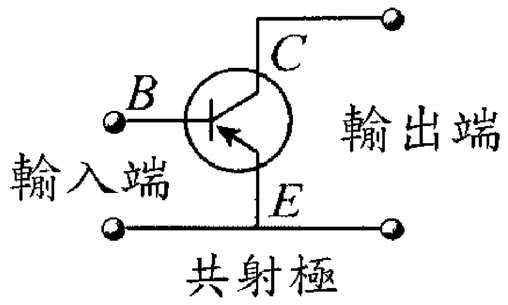
五、電晶體的組態

1.在電路的應用上，雙極性電晶體可視為一個具有兩端輸入及兩端輸出的元件，如圖所示。

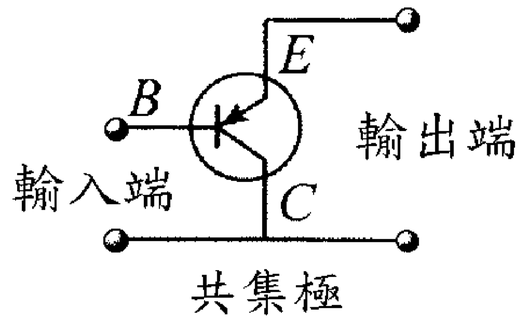
2.電晶體是一種三端電子元件，而輸入埠、輸出埠**(Port**；兩端點簡稱為一個埠**)**共需有四個端點。因此，三極中必須有一極作為輸入及輸出埠的共同端點，故電晶體在電路的連接，有所謂的共基極**(common base**，**CB)**、共射極**(common emitter**，**CE)**及共集極**(common collector**，**CC)**等三種組態。**(**如下圖**)**



共基極



共射極



共集極

3.選好某一接點為參考點後，剩下的兩接點，則分別作為輸入端與輸出端之用。一般而言，不是每一個接點都可以作為輸入端或輸出端的，右列出各接點所能存在的選擇性。

六、雙極性電晶體的特性曲線

1.特性曲線：

(1)輸入特性曲線：描述輸入端對參考點的電壓和輸入電流的關係。

(此時固定輸出端電壓)

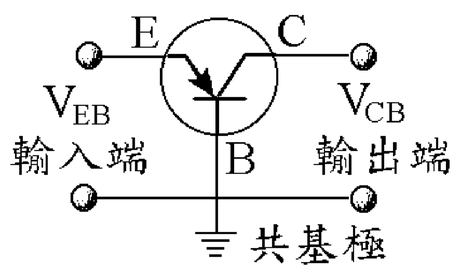
(2)輸出特性曲線：描述輸出端對參考點的電壓和輸出電流的關係。

(此時固定輸入端電流)

※注意：由於輸入端與輸出端的情況不是獨立的，因此研究輸入特性曲線時，要將輸出端電壓固定；而研究輸出特性曲線時，則要將輸入電流固定。

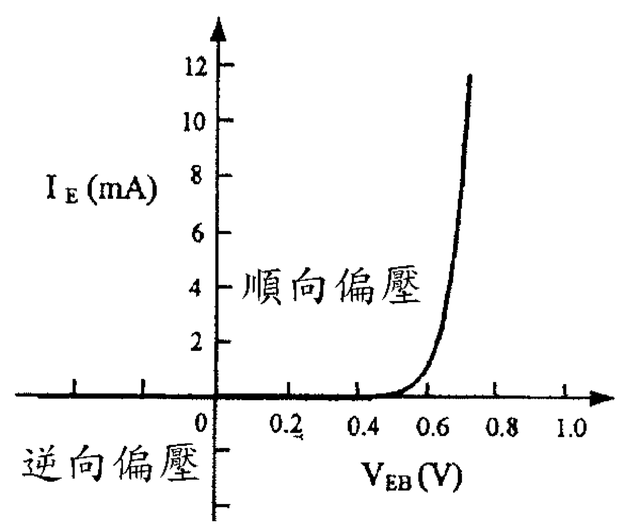
2.pnp 電晶體於共基極組態的靜態特性曲線

(1)共基極組態時，以基極 **B** 為參考點，令該點的電位為零**($V_B=0$)**，則輸入端 **E** 對基極 **B** 的電位差 **$V_{EB}(=V_E-V_B)$**，稱為射極電壓；輸出端 **C** 對基極 **B** 的電位差 **$V_{CB}(=V_C-V_B)$**，稱集極電壓。



(2)pnp 電晶體的輸入特性曲線：

在電路中，如果保持 V_{BC} 的電壓不變，調整 V_{EB} 並量取 I_E，可得 **pnp** 電晶體的 I_E-V_{EB} 特性曲線，如右圖所示。該曲線的形狀和二極體的電流-電壓曲線相似。



註：實際應用上，若將 **B** 極和 **C** 極以導線連通，則電晶體可當作二極體使用。

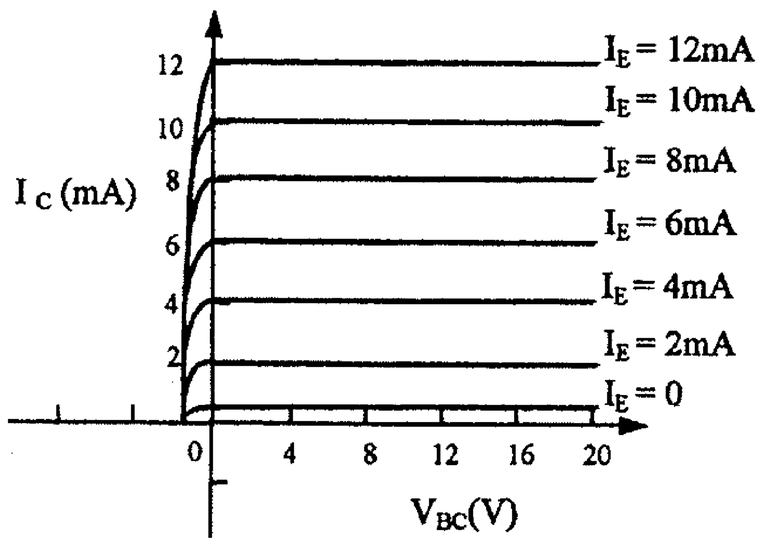
a.在圖中 **$V_{EB}<0$** 的區域，即 **E-B** 接面為逆向偏壓，I_E 為零，這時電路呈斷路狀態。

b.若 **E-B** 接面為順向偏壓**($V_{EB}>0$)**，但 V_{EB} 小於導通電壓(約 **0.6～0.7V**)，則由於 I_E 過小，電路在實際上也是處於斷路狀態。

⇒因此若欲操作電晶體，**E-B** 接面的順向偏壓必須提高至導通電壓以上。

(3)pnp 電晶體的輸出特性曲線：

如果維持 V_{EB} 不變，相當於維持 I_E 不變，調整 V_{BC} 並量取 I_C，可得 **pnp** 電晶體的 I_C-V_{BC} 特性曲線，如右圖所示。



a.在圖中 **$V_{BC}>0$** 的區域，即 **C-B** 接面為逆向偏壓，I_C 幾乎等於 I_E，這顯示從射極區出發的電流，絕大多數都能穿越薄層的基極區而到達集極區。圖中這一部分的區域稱為主動區**(active region)**。

b.在 **$V_{BC}<0$** 的區域，即 **C-B** 接面轉變為順向偏壓，當順向偏壓增加時，雖然 I_E 保持不

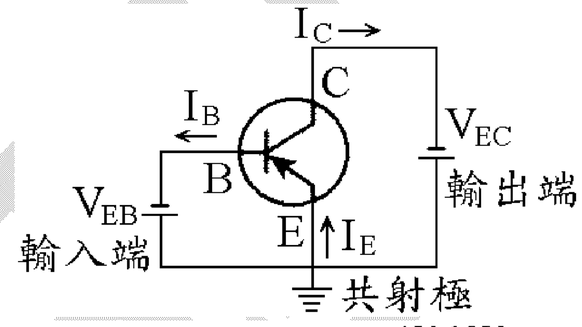
變，但 I_C 隨之快速減小。這是因為 **C-B** 接面轉為順向偏壓時，集極區的多數載子(電洞)會流向基極區，抵銷了一部分從射極區流入的電流，因而使集極電流減少。這時兩個 **p-n** 接面皆為順向偏壓，放在圖中 $V_{BC}<0$ 的區域，稱為飽和區**(saturation region)**。

c.由此圖可看出集極電流 I_C 與射極電流 I_E 大致相等，這表示共基極組態不具備電流放大作用。

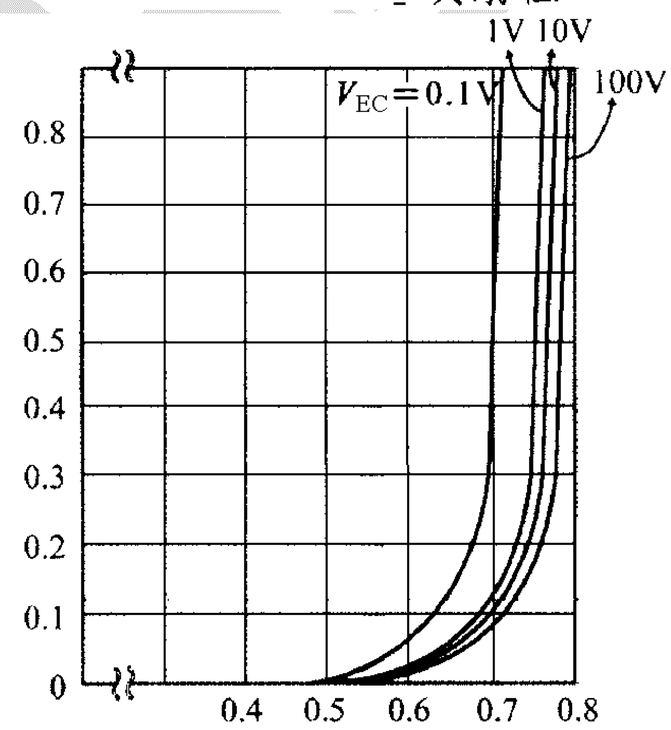
註：由於自由電子對電場的反應較電洞靈敏得多(電洞的移動在實際上是指晶體原子之間共價鍵上的價電子轉移，因涉及價電子的群體運動，故電洞的有效質量較自由電子大得多)，放在電路設計時，大多採用 **npn** 電晶體。

3.pnp 電晶體於共射極**(CE)**組態的靜態特性曲線

(1)共射極組態時，以射極 **E** 為參考點，令該點的電位為零($V_B=0$)，則輸入端 **B** 對射極 **E** 的電位差 $V_{BE}(=V_B-V_E)$，稱為基極電壓；輸出端 **C** 對射極 **E** 的電位差 $V_{CE}(=V_C-V_E)$，稱為集極電壓。

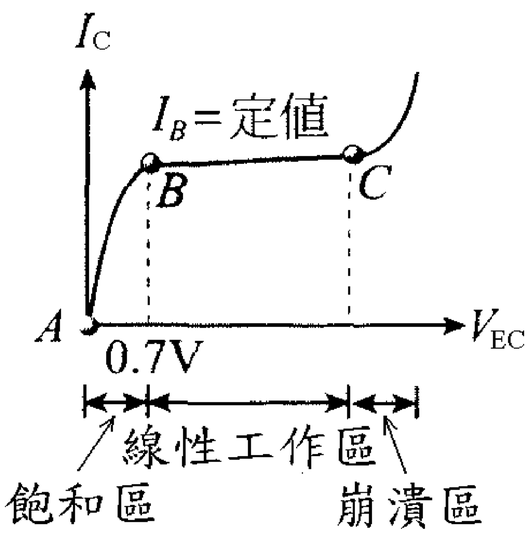


(2)右圖為其射極組態下，**pnp** 電晶體典型的輸入特性曲線。由於輸入埠所包含的射-基兩極間恰含一個 **pn** 接面，故其特性類似二極體的特性，其輸入電流 I_B 與輸入電壓 V_{BE} 的關係，如同二極體的特性曲線一般。惟其實際的特性關係，還是些微的受到輸出埠的電壓影響，而有一點變化。



※$V_{BE}<0$ $(V_{EB}>0)\Rightarrow$ **E-B** 接面為順向偏壓。

(3)右圖為 **pnp** 電晶體的輸出特性曲線。此圖說明當基極電流 I_B 為某定值時，集極電流 I_C 與集極電壓 V_{EC} 間的關係圖。



a.飽和區：

電晶體位於此區時(圖中 **A～B** 間)I_C 隨集極電壓 V_{EC} 的增加而變大。

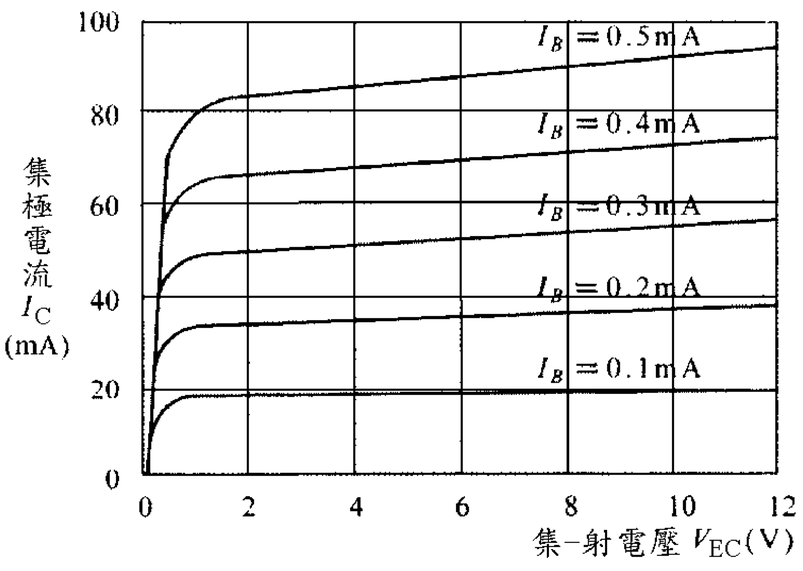
b.工作區(或線性工作區)：

電晶體位於此區時(圖中 **B～C** 間)I_C 不隨集極電壓 V_{EC} 明顯變化，近乎為定值。電晶體多在此區工作。

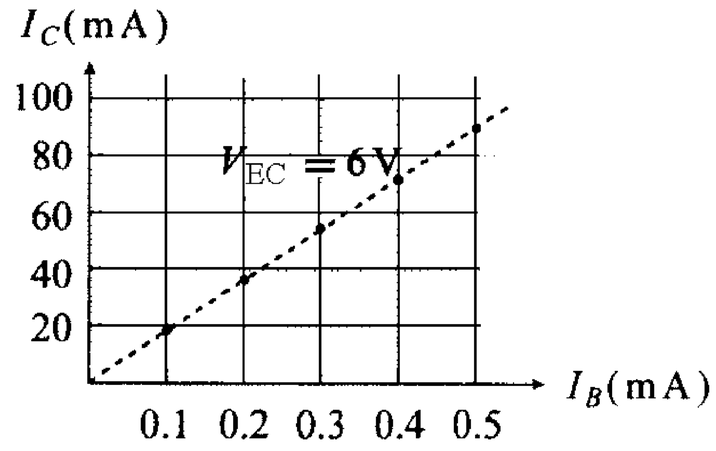
c.崩潰區：

集極電壓 V_{EC} 太大時，發生崩潰現象(圖中 **C** 右側的區域)。電晶體位於崩潰區時，其集極電流 I_C 快速增加，會造成電晶體損壞，一般電晶體不能在崩潰區工作。

(4)典型的共射極組態的 **pnp** 電晶體輸出特性曲線如右圖所示，表示在一些可能的輸入電流 I_B 下(通常取等間距的 I_B)，輸出埠的集極電流 I_C 與輸出埠的集射電壓 V_{EC} 的關係。由前述之電晶體電流關係可知：在射-基接面順偏及基-集接面逆偏的條件下，射極電流 I_E 遠大於基極電流



$\mathbf{I_B}$，集極電流 $\mathbf{I_C}$ 略小於射極電流 $\mathbf{I_E}$，故集極電流 $\mathbf{I_C}$ 亦遠大於基極電流 $\mathbf{I_B}$。可見，在共射極組態下，雙極性電晶體可具有電流放大的作用。



(5)電晶體的電阻轉變性質：

a.以上圖電晶體的特性曲線為例，考慮射-集兩極為固定電壓($\mathbf{V_{EC}=6V}$)下，集極電流 $\mathbf{I_C}$ 與基極電流 $\mathbf{I_B}$ 的關係，並將其結果繪於右圖中。

b.由於射-集兩極間電壓固定，從其端點流出的電流($\mathbf{I_C}$ 或 $\mathbf{I_E}$)愈大，表示射-集兩端間的電阻值愈小。從圖中，可見此集極電流和基極電流間維持幾乎固定的正比關係。如此，可以利用基極電流 $\mathbf{I_B}$ 來控制集極電流 $\mathbf{I_C}$ 的大小，進而改變射-集兩端間的等效電阻，此正是電阻轉變器工作的原意了。

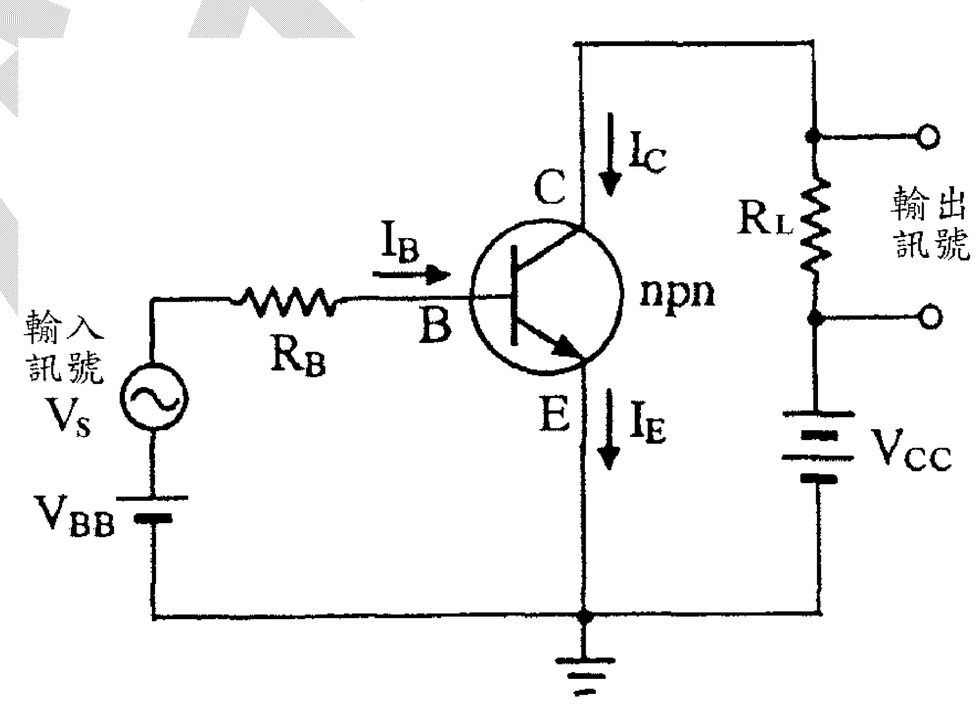
註：雙極性電晶體也可說是(輸入)電流控制(輸出電流或電壓)的電子元件。

七、電晶體的放大作用

1.電晶體在使用時，必須加上適當的直流偏壓，才能當作放大器使用，否則信號很容易發生失真的現象。當欲處理的交流電小信號加在直流偏壓的電壓或電流上時，輸出的交流電信號，其輸出的電流(或電壓)等於總電流(或總電壓)扣除直流電的電流(電壓)值。

⇒不論是哪一種信號放大器，直流偏壓的消耗恆大於交流電放大所得到的部分。

2.右圖為某種電晶體(npn)的放大電路，其中 $\mathbf{V_S}$ 為輸入的訊號電壓，$\mathbf{R_L}$ 為輸出端的電阻(稱為負載)。



(1)在這個放大電路中，射極-基極接面為順向偏壓($\mathbf{V_{BE}}$)，此接面的電阻很小。

(2)集極-基極接面為逆向偏壓(由電源 $\mathbf{V_{CC}}$ 提供)，該接面的電阻很大。

(3)當電壓 $\mathbf{V_{BE}}$ 增大時，射極電流 $\mathbf{I_E}$ 隨之增加，使得通過負載的極基電流 $\mathbf{I_C}$ 也增大，這表示在輸入端上加上小的變化電壓 $\mathbf{V_S}$ 時，可在負載上得到大的電壓變化 $\Delta\mathbf{I_CR_L}$。

a.若電晶體處於導通狀態，則由前述得知集極和基極電流之間保持一定的正比關係，即 $\mathbf{I_C}=\beta\mathbf{I_B}$。

b.現將一小的輸入訊號串聯於連接 **B** 極的導線，則此小訊號電壓將會改變 $\mathbf{I_B}$ 的大小。雖然 $\mathbf{I_B}$ 的變化量($\Delta\mathbf{I_B}$)很小，但是它所引起的 $\mathbf{I_C}$ 的變化量($\Delta\mathbf{I_C}$)等於 $\Delta\mathbf{I_B}$ 的 β 倍，即 $\Delta\mathbf{I_C}=\beta\,\Delta\mathbf{I_B}$。此電流變化量流經連接於 **C** 極的電阻 $\mathbf{R_L}$，可在該電阻兩端得到放大的輸出電壓 $\Delta\mathbf{I_CR_L}$。

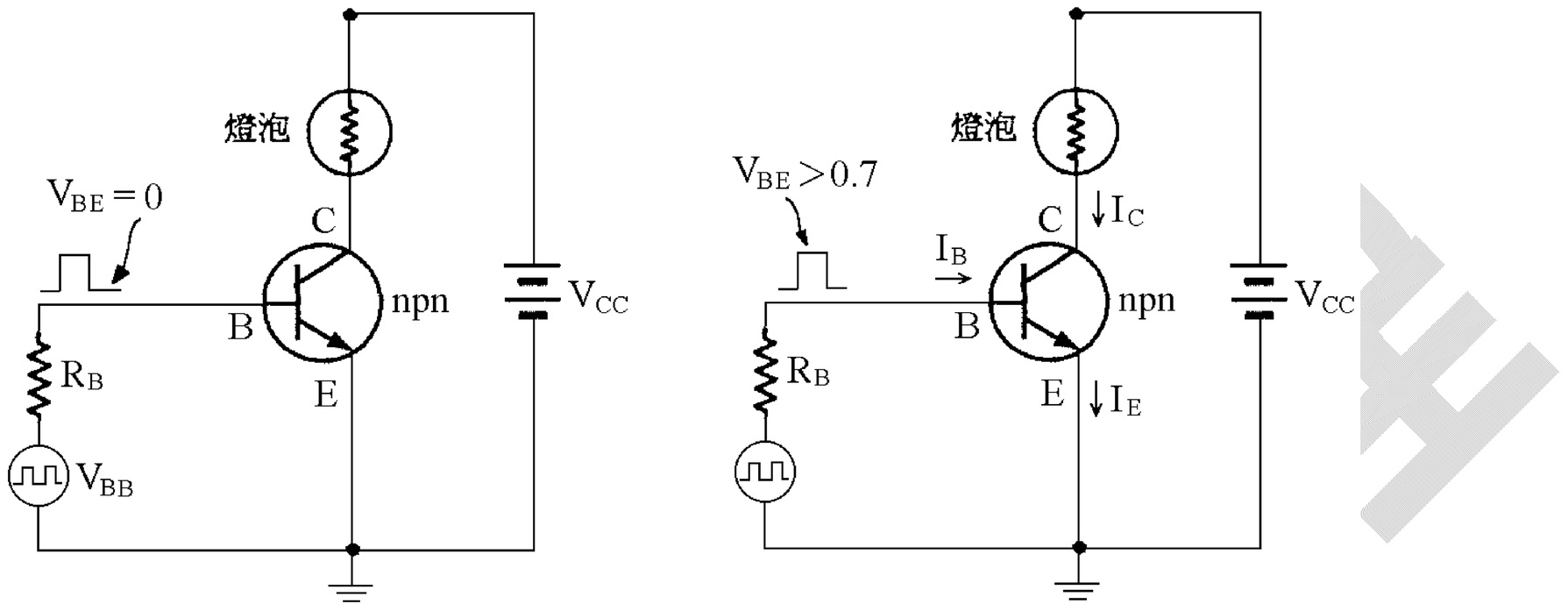
(4)像這樣可將小電壓放大的裝置，稱為電壓放大器。除了電壓放大器外，改變電晶體與電路的連接方式，也可作為電流放大器(放大電流)或功率放大器(放大電功率)使用。

註：電晶體的電壓放大效果，則尚需考慮電晶體外部的其他電子元件(如電阻器及電源)連接的情況而定(會影響電晶體偏壓的條件)故其分析較為複雜，此處不再討論，僅提出概念性的結果：若適當設計，共射極組態的雙極性電晶體可具有交流電壓的放

大作用；通常，此交流電壓放大的倍率約為 **10～100**，視電晶體本身的特性及外部電子元件的連接狀況而定。

八、電晶體也具有開關的功能(或用於數位電路)

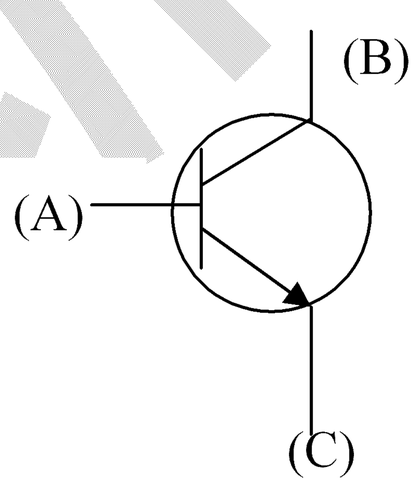
在下圖所示的電路中，在電源 V_{CC} 和 **C** 極之間串聯一燈泡，另有一輸入電壓 V_{BB} 經電阻 R_B 連接 **B** 極。

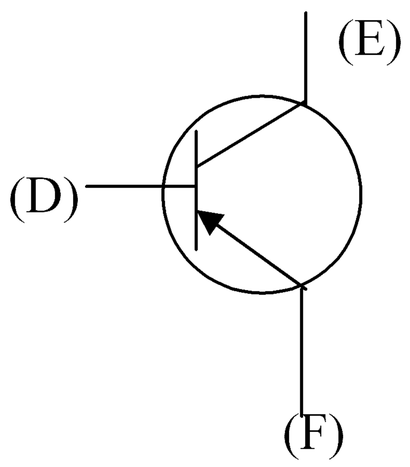


1. 若輸入電壓 $V_{BB}=0$，如圖**(a)**所示，則 $V_{BE}=0$。因此電路處於斷路狀態，沒有電流通過燈泡，故不會發光。

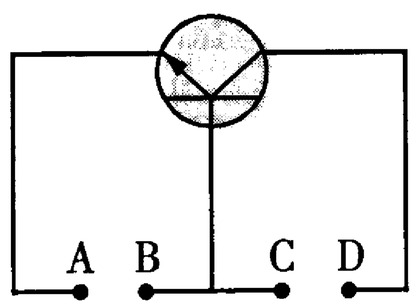
2. 若輸入電壓 $V_{BB}>0$，且使 $V_{BE}>0.7$，此時 $I_E \fallingdotseq I_c$。因此電路處於通路狀態。電流 I_C 流經燈泡使其發光。

《例 18》如圖的電晶體符號中，哪些電極為集極？答：BE





《例 19》若已知電晶體於正常模式下操作，請下圖中於 AB、CD 處畫電池的正確接法。



《例 20》下列敘述何者正確？

(A)在 n 通道金氧半場效電晶體中，流經通道的電流載子僅有自由電子。

(B)在 n 型半導體中，由於自由電子的濃度遠大於電洞的濃度，所以帶負電。

(C)在 p-n 接面二極體中，為保持電中性，故在 n 邊內的自由電子濃度必須等於 p 邊內的電洞濃度。

(D)當 npn 雙極接面電晶體導通時，從射極出發的自由電子可以全部穿過基極，到達集極，

構成環路。

(E)在純矽的晶體中，當其溫度上升時，晶體內的自由電子和電洞的數目會等量地增加，因此會增加晶體的導電能力。【94.指考研究】

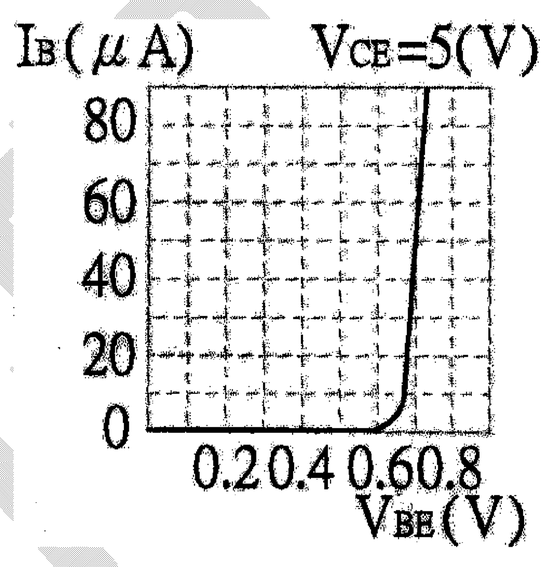
《例 21》有一個具有如圖所示的 I_B-V_{BE} 特性曲線的電晶體。

(1)若加上 V_{BE}=0.7V 的電壓，則通過的基極電流 I_B=_____ μA。

(2)為了產生 I_B=40 μA 的電流，需要 V_{BE}≒_____V 的電壓。

(3)當 V_{BE} 約為_____V 以下時，幾乎沒有 I_B 流動。

答：(1)60(2)0.68(3)0.6



《例 22》用具有圖(b)、圖(c)所示特性的電晶體做成如圖(a)所示的電路，請回答以下的問題：

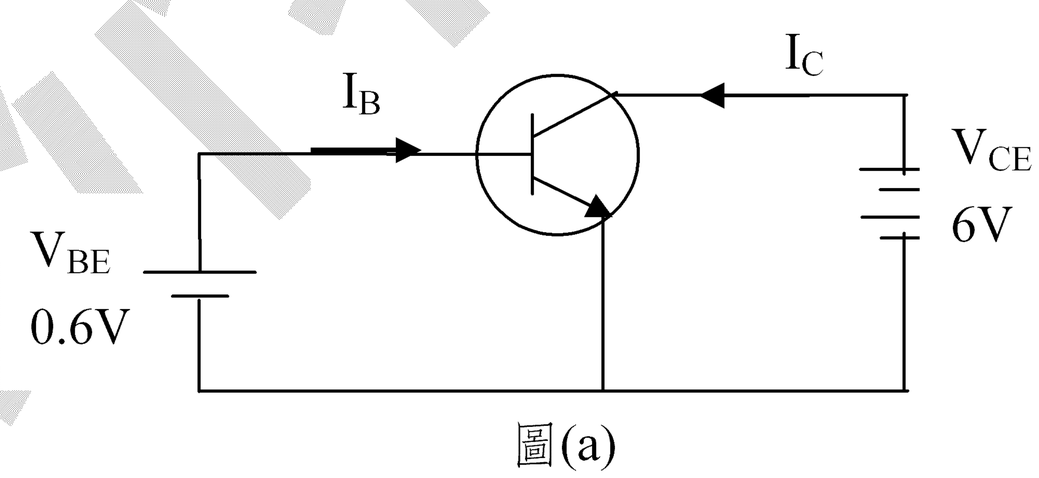
(1)基極電流 I_B 是多少？

(2)集極電流 I_C 是多少？

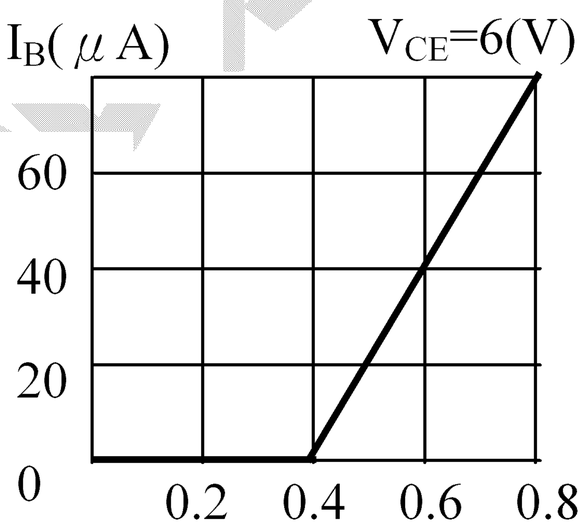
(3)射極電流 I_E 是多少？

(4)電流增益為何？

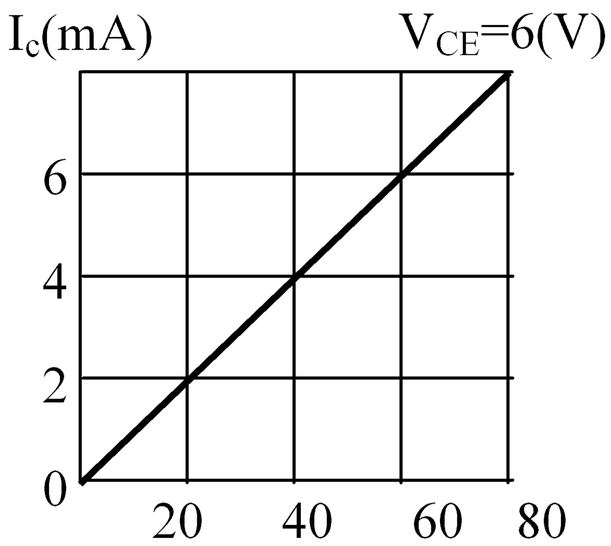
答：(1)40 μA(2)4mA(3)4.04mA(4)100



圖(a)



圖(b)



圖(c)

《例 23》有一電晶體，其射極電流為 8.2mA，集極電流為 8mA，則其

(1)基極電流為何？

(2)電流增益值 α、β 各為何？答：(1)0.2mA(2) α=0.976、 β=40

《例 24》在下圖所示的電路中，已知輸入電壓 V_{in} 很小。為一振幅等於 25mV 的正弦波形，電源 V_{BB}=0.7V 使電晶體的基極和射極之間受到順向偏壓，並有足夠的電位差使電晶體處於導通狀態。電源 V_{CC}=10V 確保集極和基極之間為逆向偏壓。接到集極的電阻 R_C=1.0kΩ。則由右圖所示的 I_E-V_{BE} 特性曲線，可看出疊加在 V_{BE} 的輸入訊號 V_{in} 雖然甚小，但卻能造成射極電流 I_E 相當幅度的變化。已知電晶體的電流增益 β=100，試回答下列問題：

(1)請由圖中讀出當 ΔV_{in}=25mV 時，射極電流的變化量 ΔI_E 為何？

(2)電晶體集極電流的變化量 ΔI_C 為何？

(3)電阻 R_C 兩端的電壓變化量，即輸出訊號的振幅 ΔV_{OUT} 為何？

(4)設電壓增益 $A=\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{in}}$，則此電路的 A 為何？答：(1)2.0mA (2)1.98mA (3)2.0V (4)80

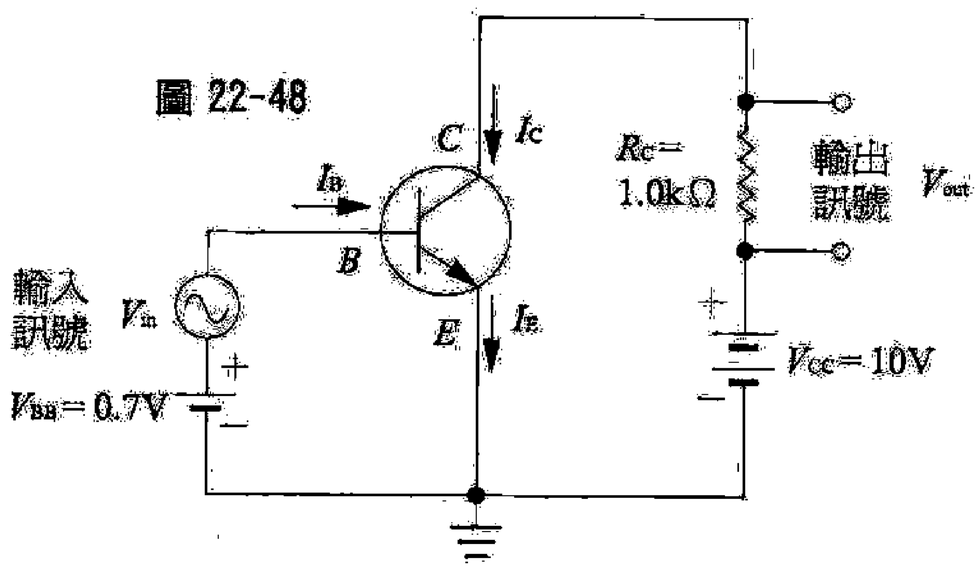


圖 22-48

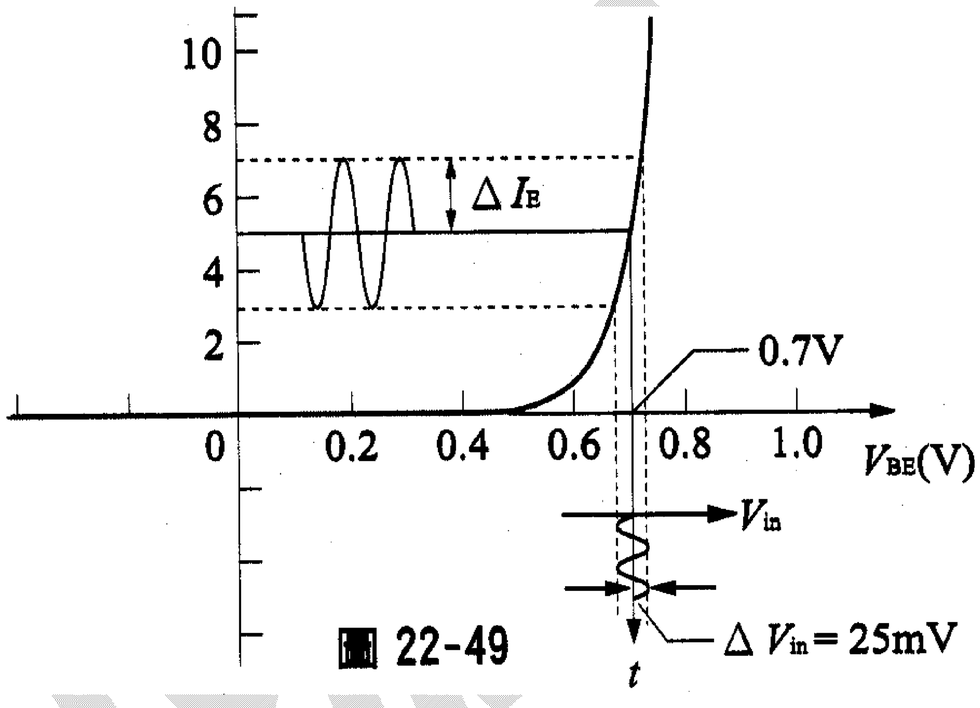
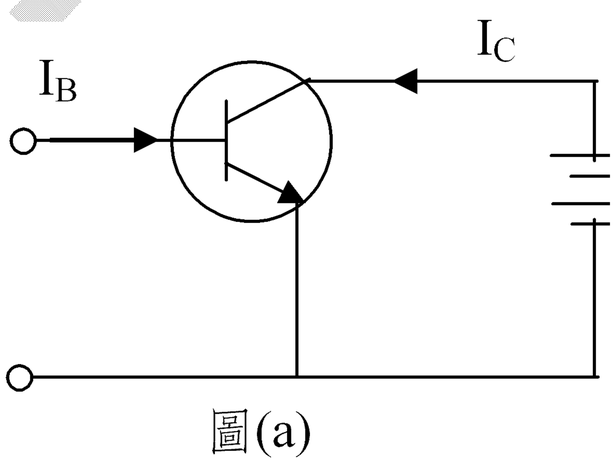


圖 22-49

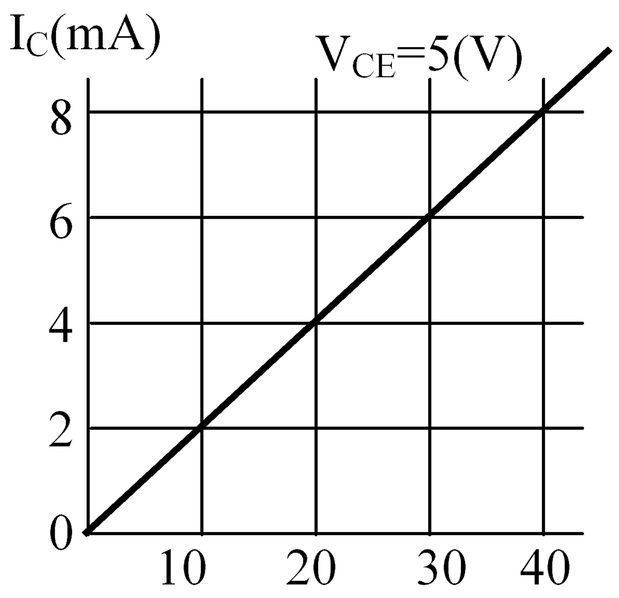
練習題3：

1. 電流增益 β=100 的電晶體，當 I_C=2mA 時，I_B 是多少？
(A)2mA (B)200mA (C)20 μA (D)202mA (E)202 μA。答：C

2. 用一個具有如圖所示 I_C-I_B 特性曲線的電晶體，若 I_B=20 μA 時，則
(1)I_C 為何？(A)2mA (B)4mA (C)6mA (D)8mA (E)100mA。
(2)其電流增益值 β 為多少？(A)5 (B)0.2 (C)40 (D)500(E)200。
答：(1)B(2)E



圖(a)



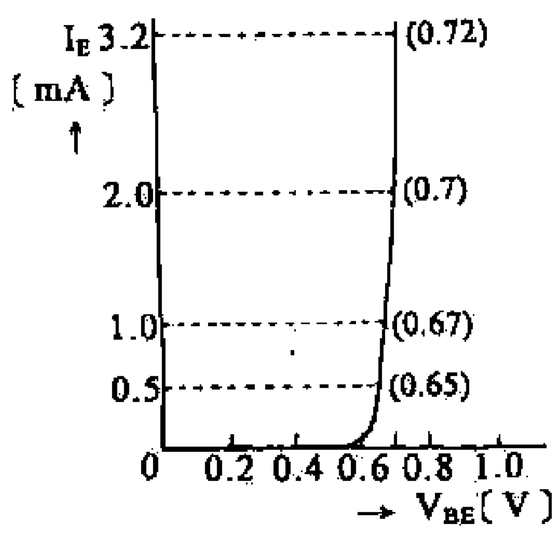
圖(b)

3. 電晶體具有如圖(a)所示的特性，$\beta=100$，加入如圖(b)所示的電壓時，請回答下列問題：

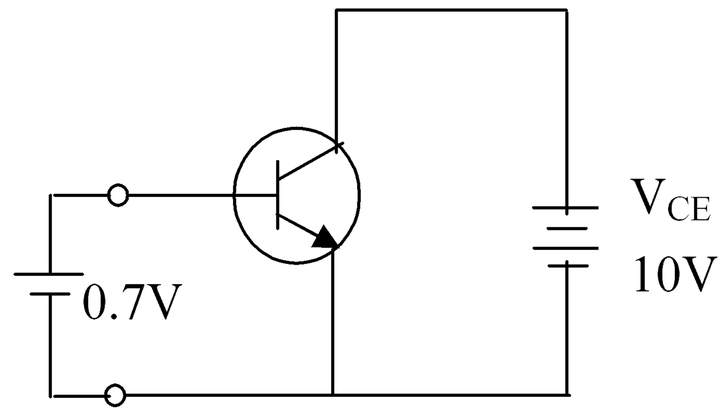
(1)I_E 為多少？

(2)I_B 多少？

(3)I_C 為多少？答：(1)2mA (2) $1.98\times10^{-5}\,A$ (3) $1.98\times10^{-3}\,A$



圖(a)



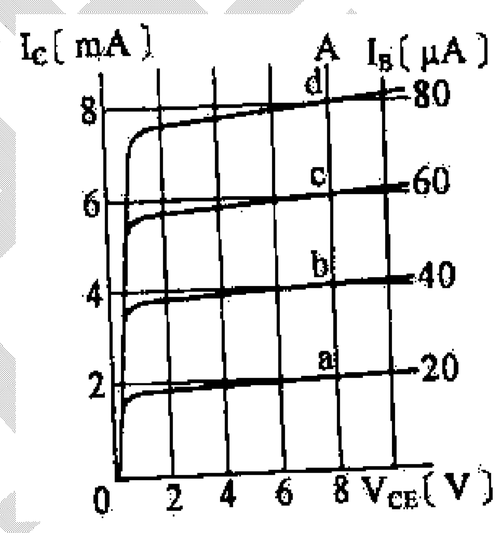
圖(b)

4. 如圖所示為某電晶體的 I_C-V_{CE} 特性曲線，在 V_{CE}=8V 時，

(1)當 I_B=40 μA，則 I_C 為何？

(2)其電流增益值 β 為何？

答：(1)4mA(2)100



5.下列有關雙極性接面電晶體的描述，哪些是正確的？

(A)其構造並非對稱的，因此射極與極集不可對調使用。

(B)若基極與射極之接面為逆向偏壓，基極與集極之接面為順向偏壓，則該電晶體工作在飽和模式(即相當於開關中的 ON)

(C)為使其具最佳的線性放大作用，需將電晶體在基極與射極之接面順向偏壓，基極與集極接面為逆向偏壓。

(D)三極電流中，以基極的電流最小。答：ACD

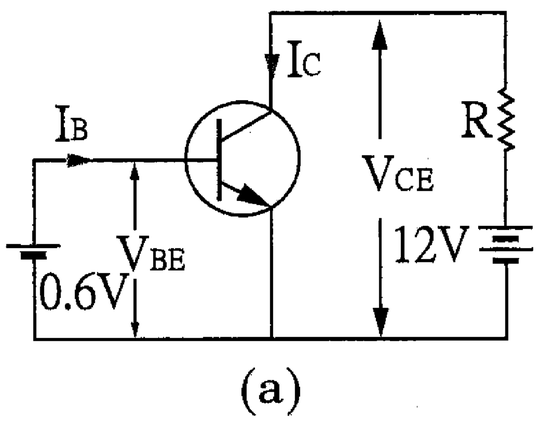
6.若入射電晶體各極的電流取正值，且已知基極的電流是－0.1mA，則：

(1)射極電流值為：(A)1.8 (B)2 (C)－1.8 (D)－2 mA。

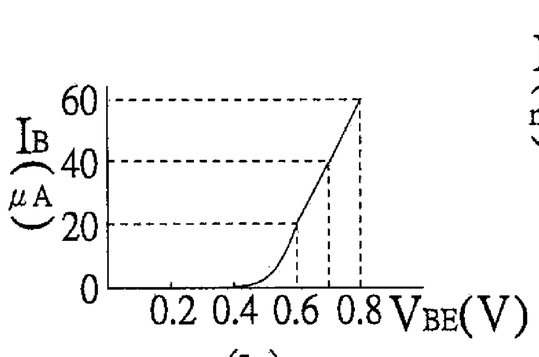
(2)請判斷此電晶體屬於何類電晶體？

答：(1)B(2)PNP

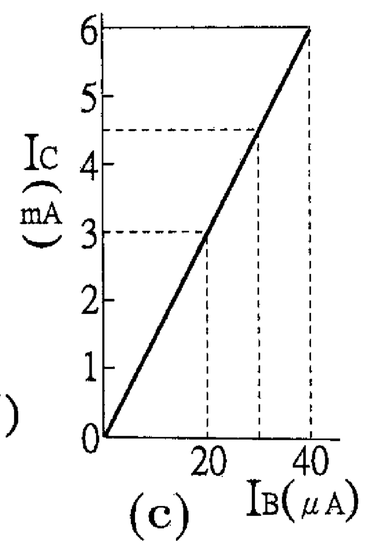
7.由下列電路圖及其特性曲線，回答下列問題：



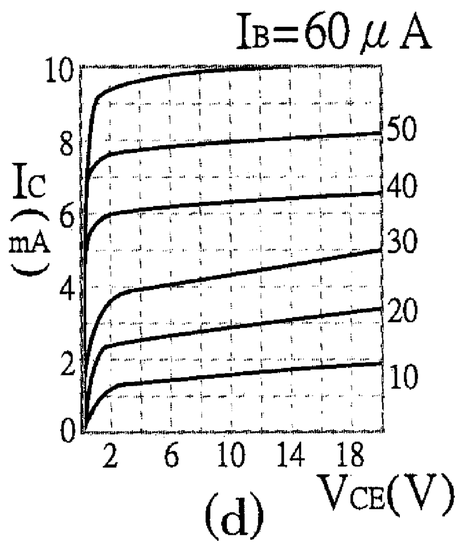
(a)



(b)



(c)



(d)

(1)求 I_B=？

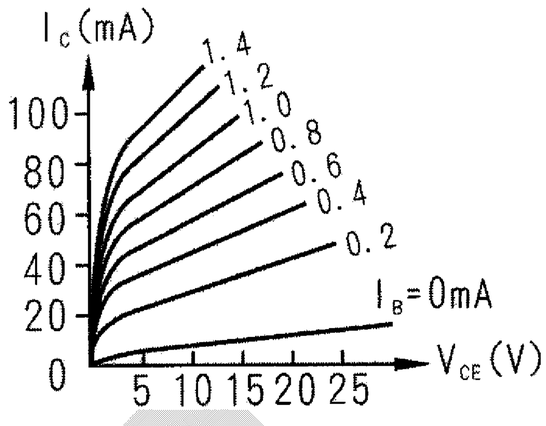
(2)求電晶體之電流放大率(電流增益) β 值？求電路之電阻 R＝？

答：(1)20 μA(2)150(3)2000Ω

8.雙極性接面電晶體中，雜質濃度最大的是哪一極？

答：射極

9.在右圖所示的特性曲線中，你判斷此是屬於何類電晶體？

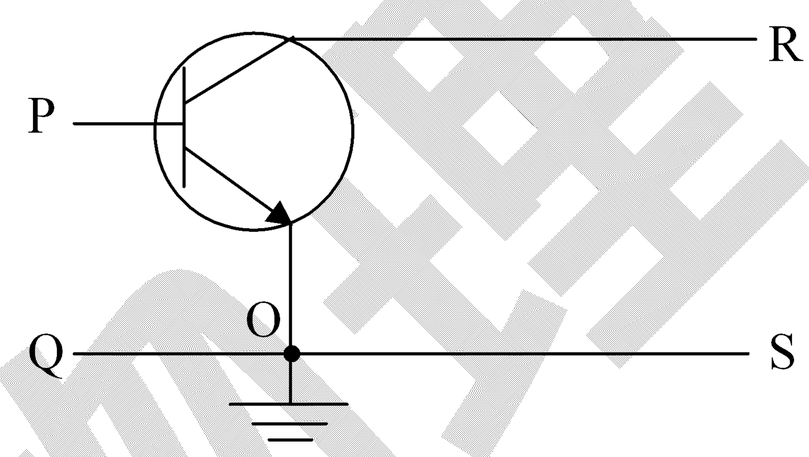


答：npn 電晶體

10.電流增益 β=100 的電晶體，當 I_C=2mA 時，I_B 是多少？

答：202mA

11.右圖為三極電晶體之電路，則



(1)此為 pnp 或 npn 型電晶體？

(2)P、O、R 各為何極？

(3)若是放大器使用，則訊號由何處輸入？

何處輸出？

(4)P、Q、R、S 四點的之電位依高低排列之。

答：(1)npn(2)P 基極、Q 射極、R 集極(3)由 QP 輸入、由 RS 輸出(4)$V_R>V_P>V_Q=V_S$

12.pnp 電晶體在飽和工作區(開關中的 ON)時，則基極－射極和基極－集極之間電壓關係為：

(A)$V_{BE}>0$、$V_{BC}<0$ (B)$V_{BE}<0$、$V_{BC}>0$ (C)$V_{BE}>0$、$V_{BC}>0$ (D)$V_{BE}<0$、$V_{BC}<0$。

答：C

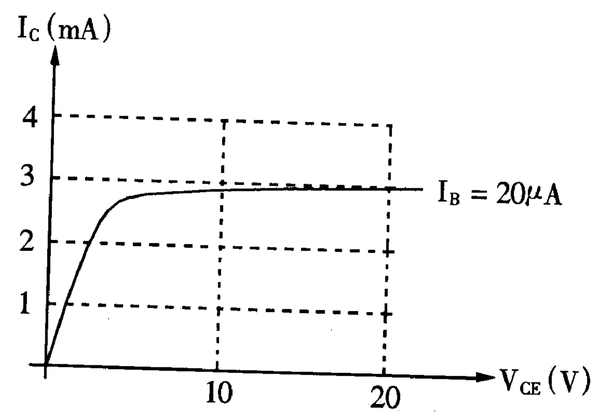
13.三極體之共射極電路具有電流放大功能時，(A)訊號由基極輸入 (B)訊號由射極輸入(C)訊號由集極輸出(D)訊號由基極輸出(E)此時電晶體在順向活性工作區。

答：ACE

14.電晶體的 α 參數由 0.98 變化到 0.99，則 β 參數的變化為

(A)49 到 99(B)98 到 99(C)99 到 199(D)49 到 88(E)88 到 99。答：A

15.如圖為一共射極線路之 I_B=20 μA 時之集極－射極間電壓 V_{CE} 與集極電流 I_C 之靜態輸出曲線，則當 V_{CE}=10V 時，



(A)I_C=？

(B)I_E=？

(C)α、β 各為何？

答：(A)2.8mA (B)2.82mA (C)α=0.993、β=140

16.若雙極性接面電晶體的射極電流為 I_E，基極電流為 I_B，集極電流為 I_C，則其共射極組態時的電流增益值 β=_____；共基極組態時的電流增益值 α=_____；I_E、I_B 和 I_C 間的關係為_____，α 與 β 的關係為_____。

答：$\frac{I_C}{I_B}$、$\frac{I_C}{I_E}$、$I_E=I_C+I_B$、$\beta=\frac{\alpha}{1-\alpha}$

17.某電晶體的直流 β 為 180，則當基極電流 I_B 為 400 μA 時，

(1)集極電流 I_C=？(2)射極電流 I_E=？

答：(1)72mA(2)72.4mA

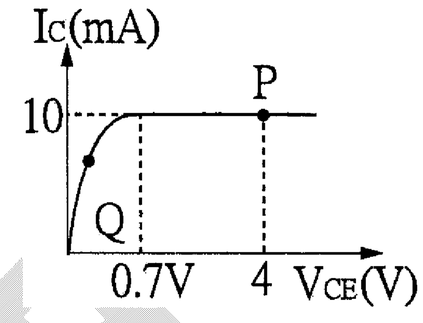
18.右圖為某個 pnp 電晶體的輸出特性曲線，已知該電晶體的電流增益 β 為 200，則

(1)此圖是何種組態時的輸出曲線？

(2)當電晶體位於 P 點時，基極電流為若干？

(3)調整電壓使電晶體位於 Q 點，當時的基極電流為何？

答：(1)共射極組態(2)50 μA(3)50 μA



19.雙極性接面電晶體之三極中，最薄的一層是(A)基極(B)射極(C)集極(D)不一定。

答：A

21.雙極性接面電晶體中，可控制集極電流大小的是(A)基極(B)射極(C)集極(D)閘極。

答：C

22.雙極性接面電晶體用於放大電路時，最常使用的組態為(A)共基極(B)共射極(C)共集極(D)共閘極(E)共源極。答：B

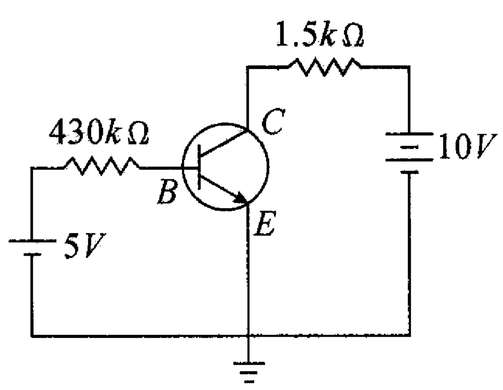
23.如右圖所示的電路，已知電晶體為共射極的電流增益 β=100，試求：

(1)基極電流 I_B=？電位 V_B 為何？

(2)射極電流 I_E=？電位 V_E 為何？

(3)集極電流 I_C=？電位 V_C 為何？

答：(1)10 μA、0.7V(2)1.01mA、0V(3)1mA、8.5V



24.電晶體於正常模式下操作，基極－集極必須於何種情況下操作？

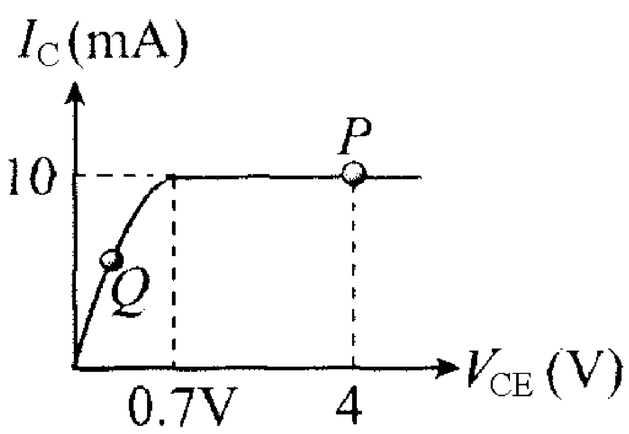
(A)順向偏壓(B)逆向偏壓(C)不導通(D)在崩潰區。答：B

25.NPN 電晶體中，基極的多數載子為下列何者？(A)電子(B)電洞(C)都是(D)都不是。

答：B

26.有一個 pnp 電晶體，若射極-基極間的電壓 V_{EB}＝0.9 伏特，而集極-射極間的電壓 V_{CE}＝－5 伏特，則 (1)射極-基極間為何種偏壓？(2)集極-基極間為何種偏壓？(3)該電晶體位於哪一個工作模式？

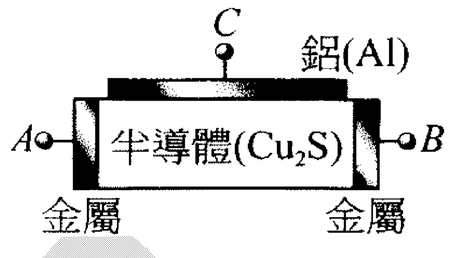
27.右圖表某個 pnp 電晶體的輸出特性曲線。已知該電晶體的直流 β 為 200，則 (1)此圖為共基極或是共射極組態時的輸出曲線？(2)當電晶體位於 P 點，當時基極電流為若干？(3)調整電壓使電晶體位於 Q 點時，當時的基極電流為何？



22-4　場效電晶體
※接面場效電晶體的結構極其基本特性

一、場效電晶體(field effect transistor，FET)

1.1920 年左右，李連菲德**(J.E.Lilienfeld**，美國人，**1882-1963)**，設計出最早的場效電晶體，右圖為該電晶體結構的示意圖。由實驗知：當 **AC** 間的電壓改變時，會改變 **AB** 間的電阻，這樣的特性表示此結構具有電晶體的功能。



2.李連菲德的原始設計，受制於當時半導體品質不佳的影響，其電晶體的效果並不理想。到了 **1950** 年代，半導體材料的製程精進，而電晶體的結構，也重新設計過，使電場對半導體導電的影響更為顯著，場效電晶體才真正受到產業界的重視與青睞，而成為市場上的主流。場效電晶體，按照產生場效機制的不同，分為接面場效電晶體**(The Junction Field-Effect Transistor**，簡稱 **JFET)**與金氧半場效電晶體**(Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor**，簡稱 **MOSFET**，一種由金屬**-**氧化層**-**半導體所製造的電晶體**)**

3.雙極性接面電晶體與場效電晶體的差別

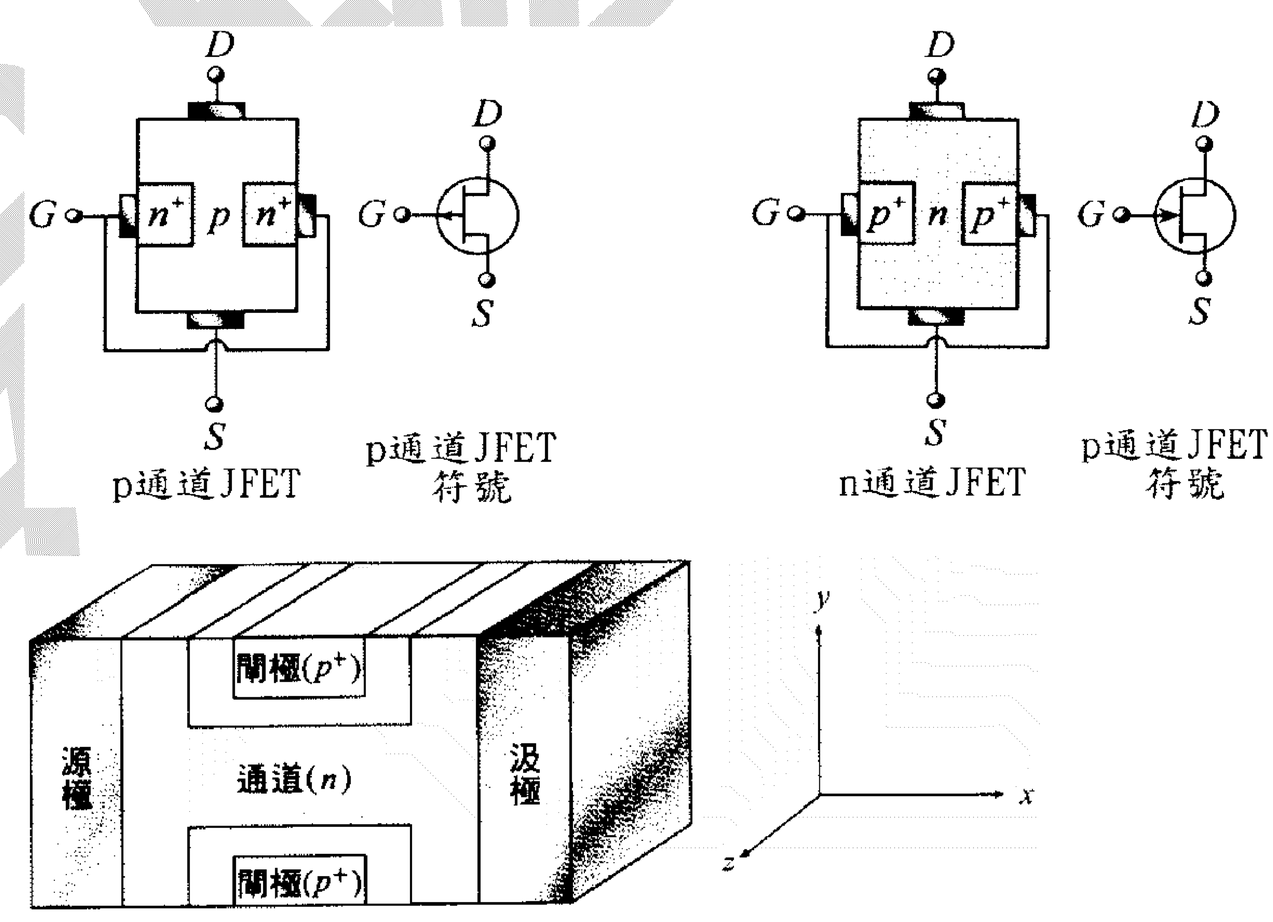
※雙極性接面電晶體**(BJT)**的導電機制，同時與電子、電洞兩種載子有關**(**故稱為雙載子電晶體**)**

※場效電晶體的導電機制，只與單一載子**(**電子或電洞**)**擔綱**(**故稱單載子電晶體**)**。

二、接面場效電晶體(JFET)

1.接面場效電晶體的結構與種類：

科學家蕭克利於 **1952** 年提出接面場效電晶體的設計。按照導電載子的種類來區別時，接面場效電晶體可分為 **n** 通道**(**電子導電**)**與 **p** 通道**(**電洞導電**)**兩型，其結構示意圖與電路符號如下圖所示。圖中 $\mathbf{n^+}$、$\mathbf{P^+}$ 分別表示高摻雜濃度的 **n** 型半導體與 **p** 型半導體**(**源極與汲極之間的區域，其雜質濃度遠小於閘極區的雜質濃度**)**。



※電子或電洞可在其中流動的區域稱為通道**(channel)**

2.接面場效電晶體有三個接點，分別稱為源極 **S(source)**、閘極 **G(gate)**與汲極 **D(drain)**。這三個接點的主要功能是：

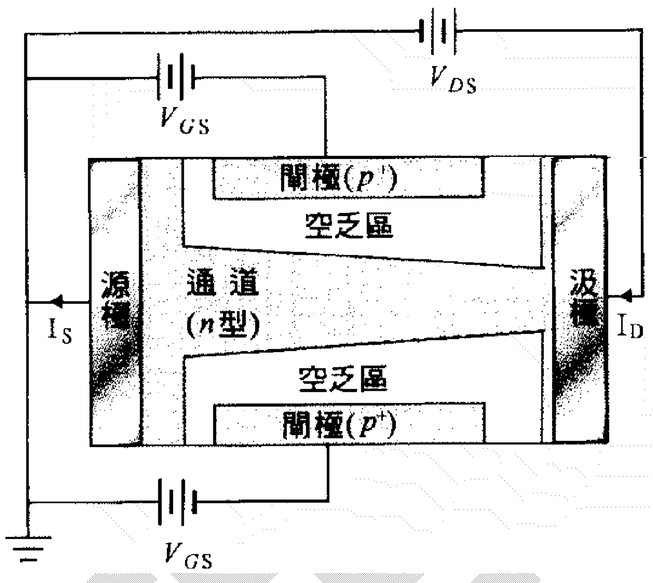
(1)源極 **S**：提供導電所需的載子。

(2)閘極 **G**：利用電壓改變電晶體的導電能力(或電阻)

(3)汲極 **D**：汲取導電的載子(電子或電洞)。在正確的偏壓之下，導電載子會由源極射向汲極。

3.接面場效電晶體的工作原理：

考慮 **n** 通道接面場效電晶體(導電載子為電子)，如右圖所示，在高摻雜濃度的閘極(**p** 型半導體)與通道(**n** 型半導體區)的接面處，形成空乏區。在閘極與源極間加上逆向偏壓 $\mathbf{V_{GS}}$ 時，會改變 **p-n** 接面處的空乏區寬度，當逆向偏壓負值愈多時，空乏區變寬，而使電子通道變窄，進而改變電晶體的電阻。



註：雙極性接面電晶體**(BJT)**，是利用輸入電流來控制輸出電流，此種元件稱為流控元件；場效應電晶體**(JFET** 或 **MOSFET)**，則是利用電壓來控制輸出電流，此種元件稱為壓控元件。

註：接面場效電晶體在正常工作時，閘極和通道間的 **p-n** 接面為逆向偏壓，此時閘極電流 $\mathbf{I_G}$ 為逆向飽和電流，其值甚小，故源極電流 $\mathbf{I_S}$ 與汲極電流 $\mathbf{I_D}$ 大致相等，意即 $\mathbf{I_S \fallingdotseq I_D}$

三、接面場效電晶體特性曲線

1.接面場效電晶體的組態有三種：

共源極**(CS)**、共閘極**(CG)**與共汲極**(CD)**，其中以共源極組態最常見，因此我們僅針對共源極組態，以 **n** 通道接面場效電晶體為例，來說明其輸入、輸出特性。

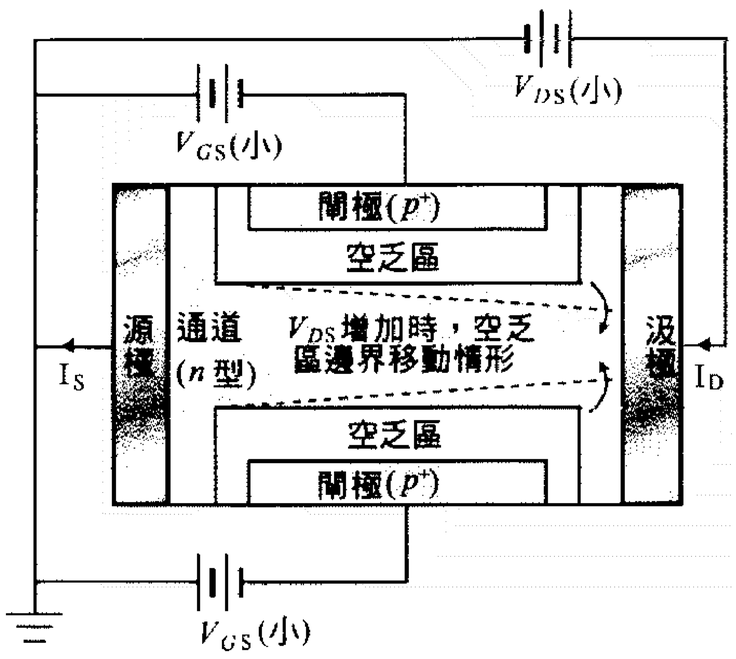
(1)輸入特性：

閘極-源極電壓 $\mathbf{V_{GS}}$**(**簡稱閘極電壓**)**為逆向偏壓，因此閘極電流 $\mathbf{I_G}$ 與閘極電壓 $\mathbf{V_{GS}}$ 的關係，與二極體很類似，此時閘極電流 $\mathbf{I_G}$ 為逆向飽和電流，其值甚小。

(2)輸出特性：

一般而言，我們可將場效電晶體的輸出特性曲線約略分為三個工作區域：

a.歐姆**(**線性**)**區　**b.**飽和區　**c.**截止區。



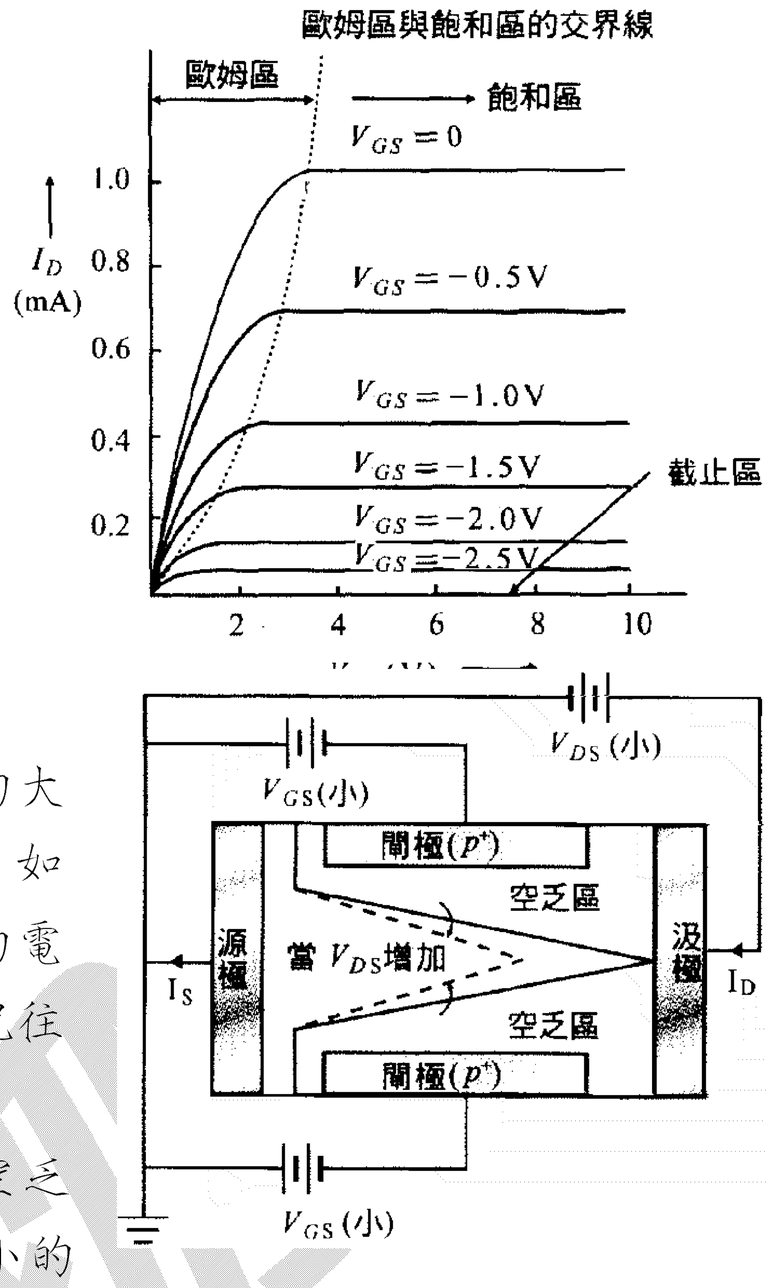
a.歐姆**(**線性**)**區：

若閘極-源極間逆向偏壓 $\mathbf{V_{GS}}$ 的量值，尚不致於使源極附近的通道夾止，則當 $\mathbf{V_{DS}}$ 甚小時，通道的截面積自源極到汲極間皆大致相同，場效電晶體的通道因此類似一個長方形的電阻器，如右圖所示，可知在這個工作條件下，電晶體的電流-電壓特性曲線近似一條直線。

※當 $\mathbf{V_{DS}}$ 繼續增加時，汲極附近的空乏區寬度將增加，使得通道在此處附近的截面積減少，因此通道變成一個近似梯形的電阻器，造成通道的等效電阻值增加。

※在固定的閘極電壓 V_{GS} 情況下，汲極輸出電流 I_D 對汲-源輸出電壓 V_{DS} 的關係特性為：

甚小的 V_{DS} 處，I_D 與 V_{DS} 幾乎成直線的正比關係；當 V_{DS} 漸增時，I_D 並未等比例的遞增，而漸漸的趨近飽和(但仍未達真實的飽和條件)，見右圖所示。在這些偏壓條件下，輸出的特性曲線，略具有正比的線性關係，故這個操作區域，又稱為線性區。



b.飽和區：

當閘極-源極間逆向偏壓 V_{GS} 的量值尚不致於使源極附近的通道夾止時，若汲極對源極的電壓 V_{DS} 夠大的話，仍可使得汲極附近的通道產生夾止的效果，如右圖所示，此時電中性通道類似一個三角形結構的電阻。若再增加 V_{DS} 的大小，將使得通道夾止的情況往源極方向延伸，而沿通道方向產生更多的空乏區。

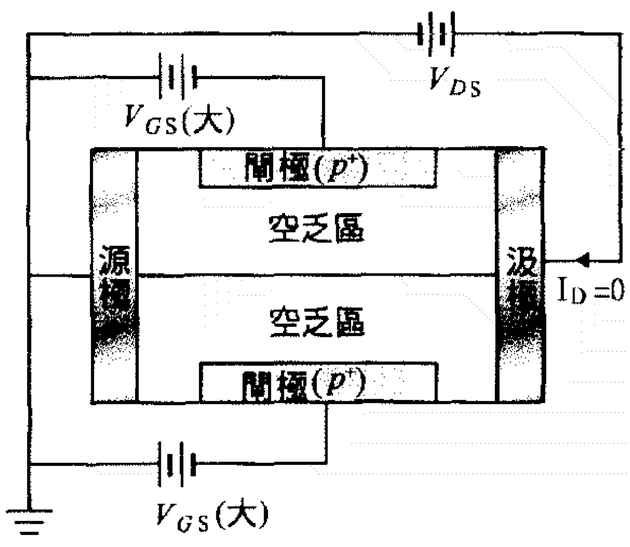
※汲極新增加的電壓 ΔV_{DS} 大部分落於沿通道方向的空乏區上，因此，電中性通道的兩端受到大約固定大小的電壓。由於通道甚長，即使繼續增加 V_{DS} 的量值，電中性通道的形狀與尺寸幾乎不變。因此，通過通道的電流可維特一固定的飽和值。此條件下輸出特性曲線的區域，稱為飽和區，見上頁 I_D-V_{DS} 的關係圖。

※此時的 V_{DS} 稱為夾止電壓。

註：飽和區，也稱為定流區(因電流不變)或夾止區，此時的電流 I_D 稱為最大汲極電流(或飽和汲極電流)，常記為 I_{DSS}。

c.截止區：

若閘極對源極的逆向偏壓 V_{GS} 的量值夠大，可使得源極附近的空乏區占滿了整個通道，通道將被夾止，如右圖所示。(使汲極電流為零的閘極電壓稱為截止電壓(簡記為 $V_{GS(off)}$))

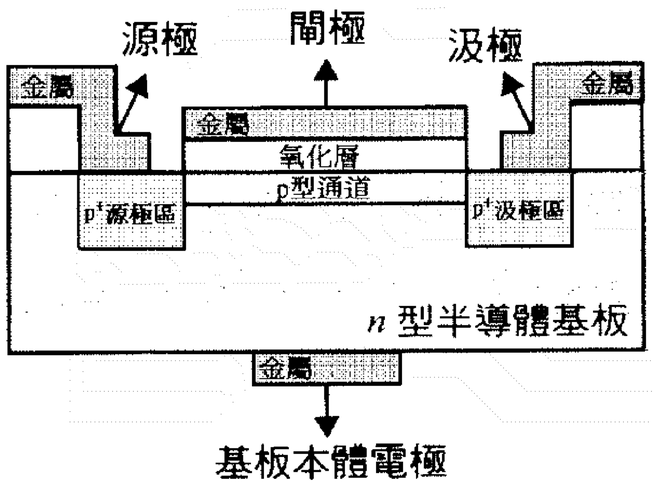


※由於汲極對閘極的逆偏程度高於源極對閘極的逆偏程度，故汲極的通道也夾止了。可知整個通道全部夾上而沒有電中性的通道，因此對任何的汲-源電壓 V_{DS}，輸出的汲極電流皆為零。此條件下輸出特性曲線的區域，稱為截止區(其特性曲線為一條沿著 V_{DS} 軸的直線，見上頁 I_D-V_{DS} 的關係圖)。

※金氧半場效電晶體的結構及其基本特性

一、金氧半場效電晶體(MOSFET 或 MOS)

1.1960 年，柯恩(**D.Kahng**，美國人)及阿塔拉(**M.Atala**，美國人)，利用金屬-氧化物-半導體的結構，設計出效能更高的場效電晶體，稱為金氧半場效電晶體(**MOSFET**)。金氧



半場效電晶體分為空乏型**(D-MOSFET)**與增強型**(E-MOSFET)**兩類，每一類又區分為 **n** 通道與 **p** 通道兩種。

2.典型的金氧半場效電晶體的結構如右圖所示，具有四個端點，分別為源極、汲極、閘極及基板本體**(substrate body)**的端點，通常基片本體與源極在內部並聯而外接出來，故從外觀來看，僅為三端的元件。

3.金氧半場效電晶體**(MOSFET)**的種類：

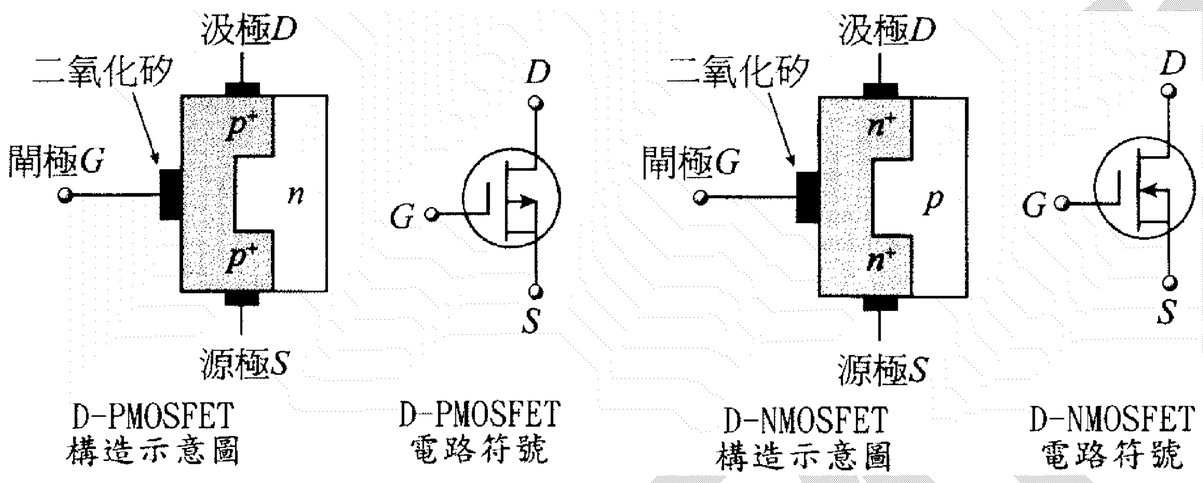
空乏型**(D-MOSFET)**：**p** 通道**(D-PMOSFET)**；**n** 通道**(D-NMOSFET)**

增強型**(E-MOSFET)**：**p** 通道**(E-PMOSFET)**；**n** 通道**(E-NMOSFET)**

二、空乏型金氧半場效電晶體(D-MOSFET)

1.空乏型金氧半場效電晶體**(D-MOSFET)**的結構與電路符號：

空乏型金氧半場效應電晶體與接面場效應電晶體一樣，也有源極**(S)**、閘極**(G)**與汲極**(D)**等三端，且各端用途相同。在正常偏壓的作用下，導電載子(電子或電洞)由源極流向汲極。



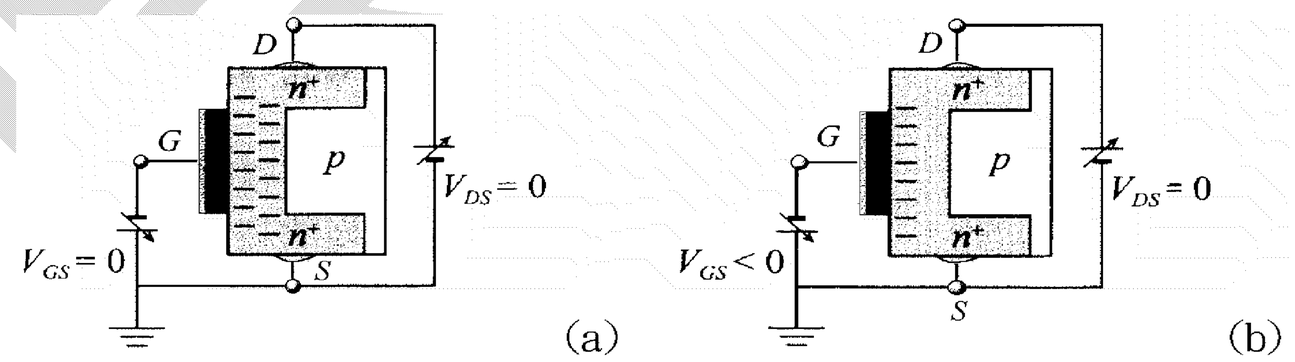
2.空乏型金氧半場效電晶體**(D-MOSFET)**的工作原理：

此處以空乏型 **n** 通道**(D-NMOSFET)**為例，說明此型電晶體的工作原理。空乏型有兩種操作模式：空乏模式與增強模式。對 **n** 通道而言，閘極電壓 $V_{GS}<0$ 時，為空乏模式；閘極電壓 $V_{GS}>0$ 時，為增強模式。

(1)空乏模式：

※下圖**(a)**中，當閘極電壓 $V_{GS}=0$ 時，源極與汲極間已有一個 **n** 型通道(由製程產生 **n** 型區)，通道中原本就有一些自由電子。

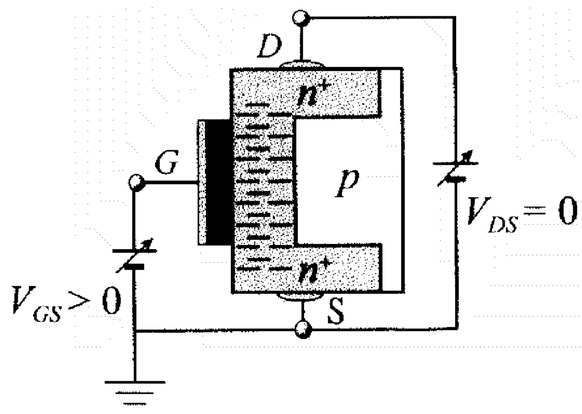
※下圖**(b)**中，當閘極電壓 $V_{GS}<0$，會排斥通道上的電子，因此在效果上等於通道變窄，電阻變大了。



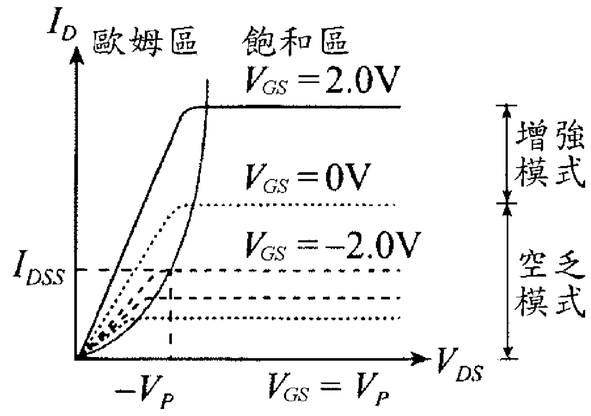
註：空乏型金氧半場效電晶體，最常以空乏模式操作。

(2)增強模式：

右圖中，當閘極電壓 $V_{GS}>0$ 時，會吸引更多電子到通道上，因此導電的效果增加，在效果上也等於通道變寬了一般，而電阻變小了。這種操作模式稱為增強模式。



3.空乏模式的輸出曲線(考慮 **n** 通道的情況時)：



(1)歐姆區：

當閘極電壓 $\mathbf{V_{GS}(<0)}$ 負值不是很多時，且汲極電壓 $\mathbf{V_{DS}(>0)}$ 增加時，汲極電流 $\mathbf{I_D}$ 也隨之增加，兩者間大致成正比，此時電晶體位於歐姆區。**(**電晶體在歐姆區的作用類似電阻器**)**

(2)飽和區：

當汲極電壓 $\mathbf{V_{DS}=-V_p(V_p<0)}$ 時，汲極電流 $\mathbf{I_D}$ 不再增加，此時稱電晶體位於飽和區，此時的電壓為 $-\mathbf{V_p}$ 夾止電壓，而電流為汲極飽和電流 $\mathbf{I_{DSS}}$。

註：電晶體位於飽和區時，接近汲極的通道發生夾止。

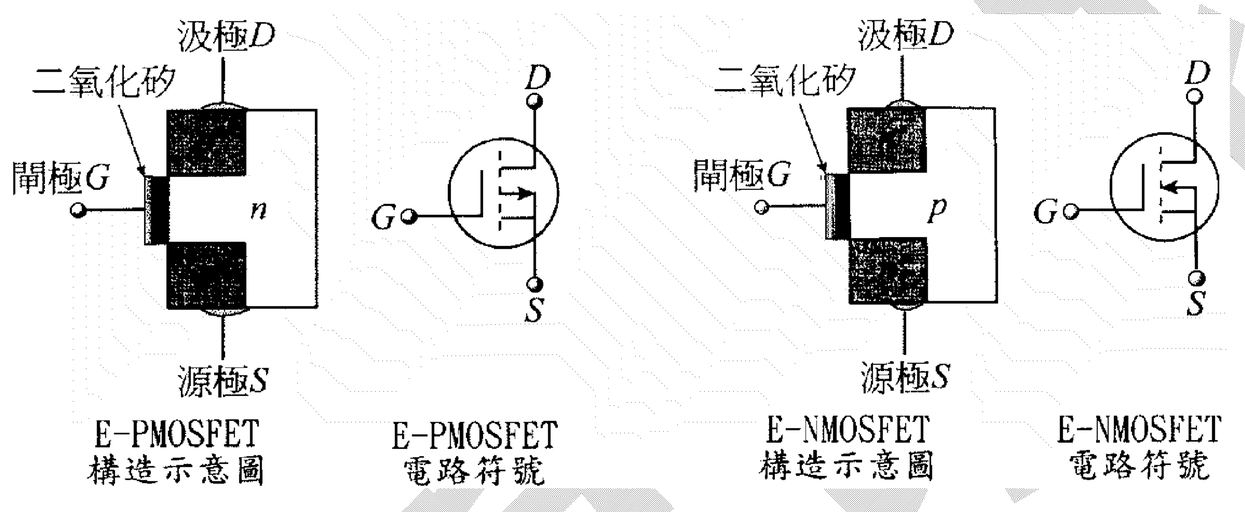
(3)截止區：

當閘極電壓 $\mathbf{V_{GS}=V_p(<0)}$，使汲極電流 $\mathbf{I_D=0}$ 時，此電壓稱為截止電壓。電晶體的截止區，如上圖中所示的 $\mathbf{V_{GS}=V_p}$ 的水平線。

註：發生截止時，通道已經中斷。

三、增強型金氧半場效電晶體(E-MOSFET)

1.增強型金氧半場效電晶體**(E-MOSFET)**的結構與電路符號：



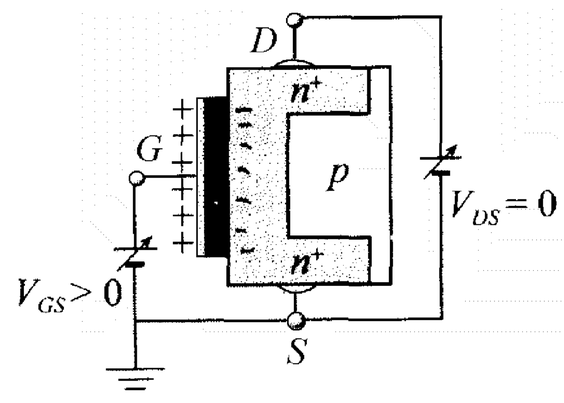
E-PMOSFET 構造示意圖　E-PMOSFET 電路符號　E-NMOSFET 構造示意圖　E-NMOSFET 電路符號

2.增強型金氧半場效電晶體**(E-MOSFET)**的工作原理：

增強型與空乏型結構上的主要差別，在於增強型在工作前，不存在載子的移動通道，但空乏型原本已有通道存在。

※此處以增強型 **n** 通道**(E-NMOSFET)**為例，說明這類型電晶體工作原理。

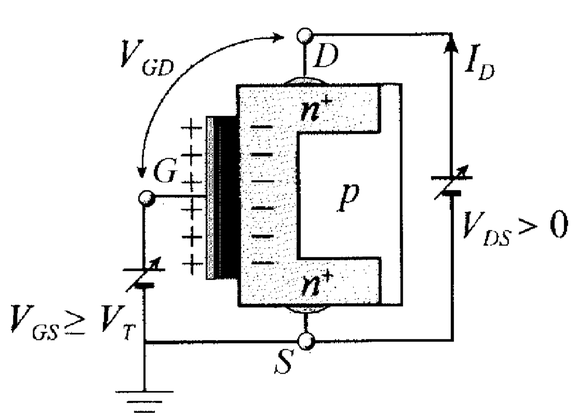
(1)右圖中，在汲極電壓 $\mathbf{V_{DS}=0}$ 時，使閘極電壓 $\mathbf{V_{GS}>0}$，可在 **p** 型半導體基板在靠近二氧化矽的地方，因靜電感應作用而有大量的電子堆積，由於此處的電性與他處不同，故此區域也稱為反轉層**(inversion layer)**。這個反轉層就是電子通道**(n** 通道**)**。



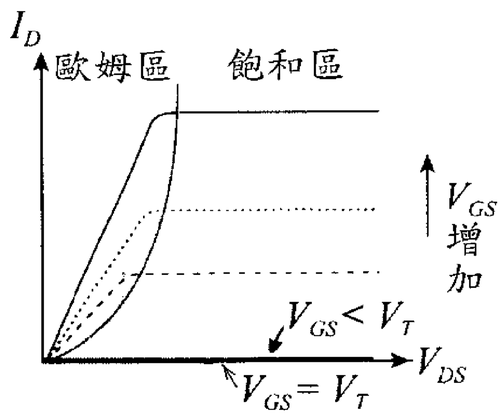
(2)能造成反轉層的閘極最小電壓，稱為底限電壓 $\mathbf{V_T}$**(threshold voltage)**或臨界電壓。若 $\mathbf{V_{GS}<V_T}$ 無法形成反轉層，此時汲極電流 $\mathbf{I_D=0}$，電晶體位於截止區。

註：對 **E-PMOSFET** 而言，$\mathbf{V_T<0}$；對 **E-NMOSFET** 而言，$\mathbf{V_T>0}$。

(3)右圖中，當閘極電壓 $\mathbf{V_{GS}\geqq V_T}$，且 $\mathbf{V_{DS}}$ 很小時$\mathbf{(V_{DS}>0)}$。$\mathbf{V_{DS}}$ 增加時，汲極電流 $\mathbf{I_D}$ 也隨之增加，此時電晶體像是一個電阻器，故稱此電晶體位於歐姆區中，如右圖所示。



當 V_{DS} 愈來愈大時，V_{GD} 開始減小，通道會從源極向汲極開始減縮，當 V_{DS} 增加到使 $V_{GD}<V_T$ 時，通道在靠近汲極端處發生夾止的現象，此時汲極電流 I_D 將不隨 V_{DS} 而變，此時電晶體位於飽和區，如右圖。



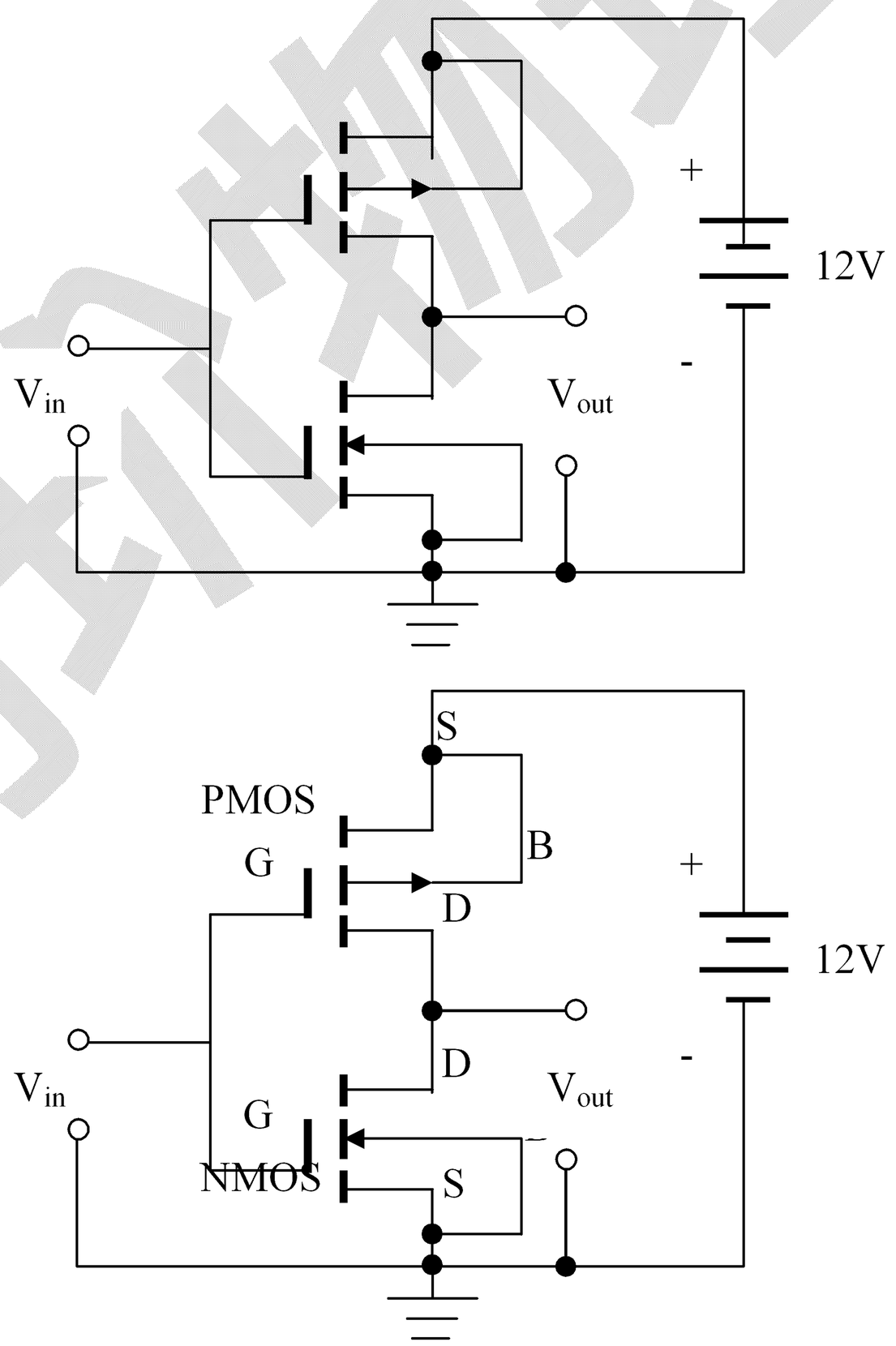
四、場效電晶體的應用

1.場效電晶體具有以閘極電壓控制輸出電流與電壓的作用，用以放大類比信號(工作於飽和區)或處理數位信號、開關操作(工作於歐姆區、截止區)。

2.場效電晶體與其他類型的電晶體比較，具有最高的直流輸入阻抗、最少的製造程序與最小的體積，故廣泛用於電子電路中，尤其是在數位電路中。

3.常見場效電晶體的應用，如電腦的中央處理器**(CPU)**、記憶體、顯示卡和音效卡中的信號處理裝置，以及廣泛的消費性家用電子產品，如電子遊樂器、**DVD**、**TV**、隨身聽、音響……等等。

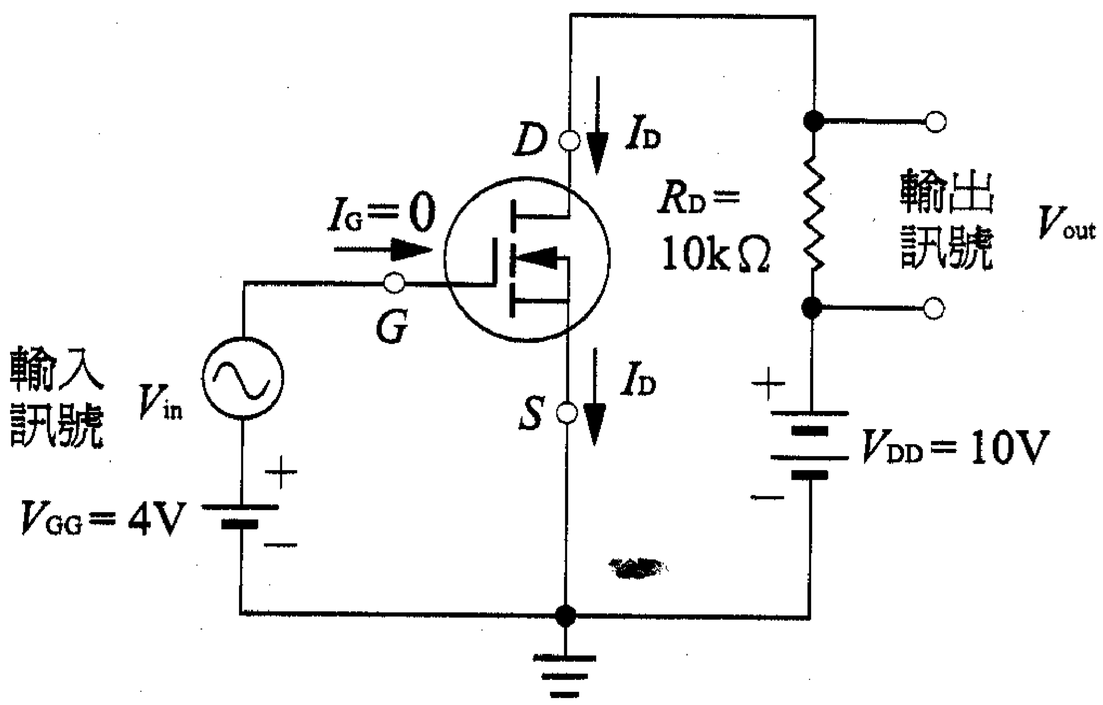
《例題一》在圖所示的電路中，辨識何者為 PMOS？何者為 NMOS？在圖上各標出源極 S、汲極 D、閘極 G、和基底 B 的位置。如果輸入電壓 V_{in}=+12V，則輸出電壓 V_{out} 約為多少伏特？又若輸入電壓 V_{in}=0，則輸出電壓 V_{out} 為何？



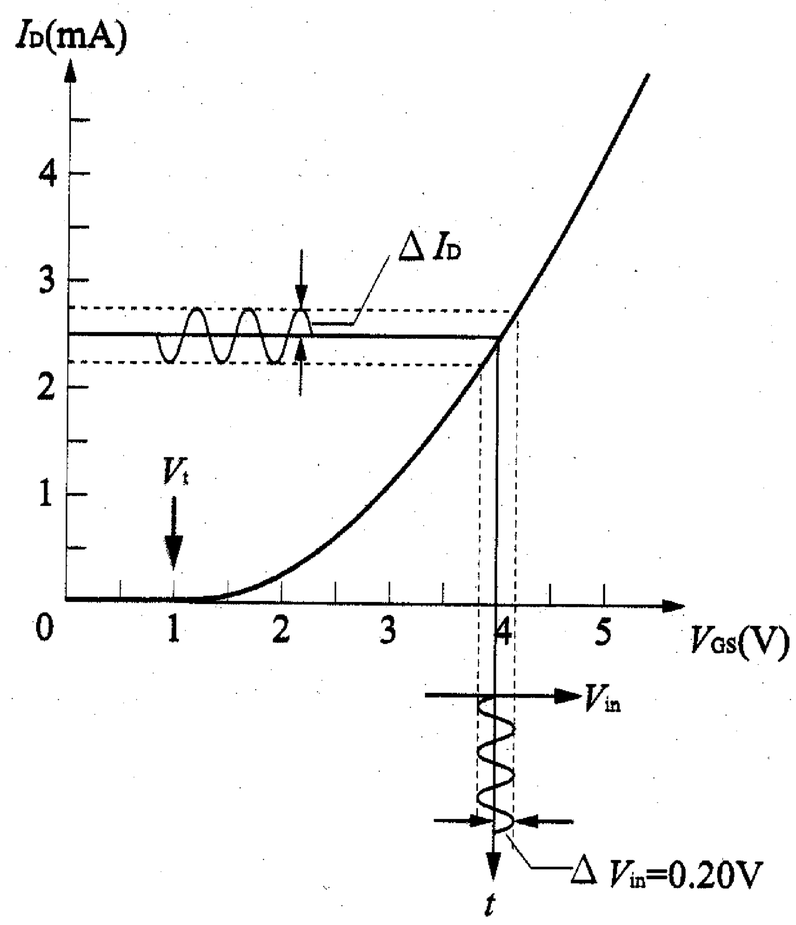
答：當輸入電壓 V_{in}=+12V 時，PMOS 的 V_{SG}=0，未達到門檻電壓，故處於斷路狀態；但 NMOS 的 V_{GS}=12V，超過了門檻電壓，則處於通路狀態，因此 $V_{out}\approx 0$。

當輸入電壓 V_{in}=0 時，PMOS 的 V_{SG}=+12V，超過了門檻電壓，處於通路狀態；但 NMOS 的 V_{GS}=0，未達到門檻電壓，故處於斷路狀態，因此 $V_{out}\approx +12V$。

《例題二》在下圖(a)所示的電路中，NMOS 的門檻電



圖〈a〉



圖〈b〉

壓 V_t=1.0V，電源 V_{GG}=4V，使 NMOS 的內部形成通道而處於導通狀態。電源 V_{DD}=10V 提供通道兩端(即汲極和源極)的驅動電壓而產生電流。接到汲極的電阻 R_D=10kΩ。圖(b)所示為該電晶體的 I_D-V_{GS} 特性曲線，疊加在 V_{GS} 的輸入電壓 V_{in} 為振幅等於 0.20V 的正弦波形。回答下列問題：

(1)由圖(b)讀出當△V_{in}=0.20V 時，汲極電流變化量△I_D 為何？

(2)電阻 R_D 兩端的電壓變化量，即輸出訊號的振幅△V_{out} 為何？

(3)設電壓增益 $A=\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}$，則此電路的 A 值為何？

答：(1)△I_D=0.25mA；(2)△V_{OUT}=(△I_D)R=$(0.25\times10^{-3})\times(10\times10^{3})=2.5V$；

(3) $A=\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}=\frac{2.5}{0.2}=12.5$

練習題4：

1. 在 NMOS 和 PMOS 電晶體中傳送電流的載子各為何？

答：NMOS 為自由電子，PMOS 為電洞。

2. 當 NMOS 處於導通狀態時，其流經三個電極的電流 I_D、I_S 和 I_G 之間有何關係？流經導電通道的電流方向為何？

答：I_b=I_s，I_G=0；流經導電通道的電流由汲極流向源極。

3.若 n 通道接面場效電晶體在歐姆區正常工作，則閘極與源極間的電壓 V_{GS} 負值愈大時 (A)空乏區愈大，且源極與波極間的有效電阻也較大 (B)空乏區愈小，且源極與波極間的有效電阻也較大 (C)空乏區愈大，且源極與汲極間的有效電阻也較小 (D)空乏區愈小，且源極與汲極間的有效電阻也較小 (E)對空乏區沒有影響。答：A

4.下列有關 p 通道接面場效電晶體的敘述何者正確？(A)p 通道 JFET 正常工作時，源極電壓爲正，而汲極電壓爲負 (B)p 通道中導電載子爲電子 (C)閘極電壓 V_{GS} 負值愈大時，夾止電壓也愈大 (D)通道愈窄時，表示發生夾止的電壓也愈大 (E)若夾止發生於汲極附近，表示汲極電流開始爲飽和電流。答：E

5.某個 n 通道 JFET 其截止電壓爲－4 伏特，則：

(1)閘極電壓 $V_{GS}=0$ 伏特時的夾止電壓爲若干？

(2)若閘極電壓改爲 $V_{GS}=-1$ 伏特時，當時的夾止電壓與 $V_{GS}=0$ 伏特比較，何者較大？

答：(1)+4(2)$V_{GS}=0$ 較大

6.接面場效電晶體在閘極電壓 $V_{GS}=0$ 時，若汲極電壓 V_{DS} 逐漸增加時，超過其夾止電壓後，下列敘述何者正確？(A)電流迅速增加 (B)電晶體進入崩潰區 (C)電晶體在歐姆區 (D)電晶體在飽和區 (E)電流降爲零。答：D

7.目前的積體電路中，最主要的電子元件爲下列何者？

(A)BJT (B)JFET (C)MOSFET (D)LED 。答：C

8.雙極性接面電晶體(BJT)與接面場效應電晶體(JFET)的敘述中，正確的有：

(A)均爲三端點的元件。(B)BJT 的射極與集極可以交換使用。(C)JFET 的源極與汲極可以交換使用。(D)BJT 是藉由輸入端的微弱電流變化來改變輸出端電壓的強弱。(E)JFET 是藉由閘極與源極電壓所形成的電場變化來改變輸出端電壓的強弱。答：ACDE

9.下列有關接面場效應電晶體(JFET)的敘述，哪些正確？

(A)固定閘-源極電壓 V_{GS}，當汲-源極電壓 V_{DS} 較小時，電晶體像一個電阻。(B)閘-源極電壓 V_{GS} 受到限制，否則通道會被擊穿。(C)閘-源極電壓 V_{GS} 恆大於零。(D)可利用汲-源極電壓 V_{DS} 控制汲極電流 I_D 的大小。答：AB

10.下列有關場效應電晶體(FET)的敘述，哪些正確？

(A)主要利用閘極電流控制源極電流。(B)形成汲極電流的載子爲多數載子。(C)接面場效應電晶體的構造是對稱的，因此源極與汲極可以對調使用。(D)場效應電晶體可分爲 JFET 與 MOSFET 兩種。(E)場效應電晶體爲藉由電壓來控制集極電流的單極性電子元件。

答：BCDE

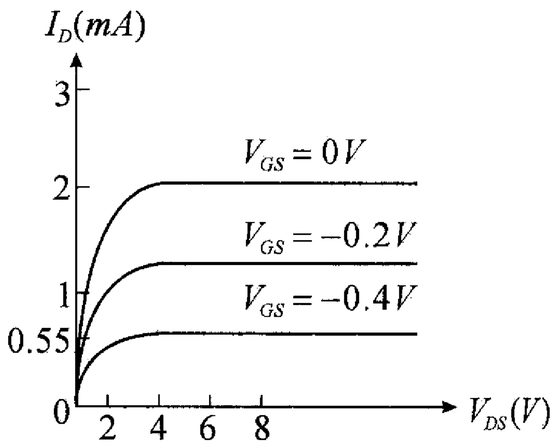
12.場效應電晶體的特性曲線如右圖所示，V_{DS} 爲 3V 以上時，I_D 值會隨 V_{GS} 而變化。若 V_{DS}=4V，則：

(1)當 V_{GS}=－0.4V 時，I_D 爲：

(A)0.55(B)0.8(C)1.2(D)1.6(E)2.1　mA。

(2)當 V_{GS}=0V 時，I_D 爲：

(A)0.55(B)0.8(C)1.2(D)1.6(E)2.1　mA。答：(1)A(2)D



11.下列有關場效應電晶體(FET)的敘述，哪些正確？

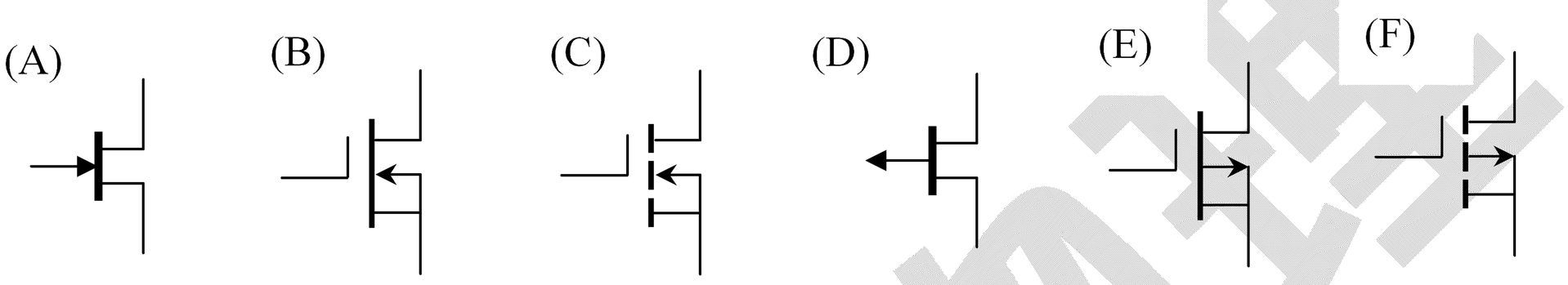
(A)運用電流來控制的單極性元件。(B)運用電流來控制的雙極性元件。(C)運用電壓來控制的單極性元件。(D)運用電壓來控制的雙極性元件。答：C

13.場效應電晶體的導電載子是：(A)只有電子(B)只有電洞(C)p 通道爲電洞，n 通道爲電子(D)p 通道爲電子，n 通道爲電洞。

答：C

14.下列有關場效應電晶體的電路符號，請寫出其名稱：

(A)　(B)　(C)　(D)　(E)　(F)



答：(A)Njfet(B)n 通道空乏型 MOSFET(C) n 通道增強型 MOSFET (D)pJFET(E) p 通道空乏型 MOSFET (F)p 通道增強型 MOSFET

15.p 通道的 MOSFET 工作時，閘極須加：(A)正電壓(B)負電壓(C)正電壓與負電壓皆可。

答：B

16.下列有關 MOSFET 的敘述正確的是：

(A)由 p 型材料作基底，再擴散出 2 個 n 型材料作汲極與源極，這種場效應電晶體稱爲 p 通道場效應電晶體 (B)閘極與基極、汲極或源極絕緣 (C)當 V_{GS} =0 時，I_D=0 (D)輸入阻抗比接合型場效應電晶體高。(E)MOSFET 是雙載子元件。答：BCD

17.積體電路的特性是：(A)體積小(B)單價低(C)重量輕(D)訊號切換速度快(E)容量大。

答：ABCDE

18.有關 p 通道 JFET 的敘述，下列敘述錯誤的是：

(A)其閘極爲 n 型半導體(B)其通道爲 p 型半導體(C)正常工作下，V_{GS} 爲負值(D)正常工作下，V_{DS} 爲負值。答：C

19.有關電晶體 BJT 和場效應電晶體 FET 的比較，下列何者爲非？

(A)BJT 是雙載子元件，而 FET 是單載子元件。(B)在積體電路製作上，BJT 比 FET 佔較大的面積。(C)BJT 和 FET 都是電壓控制的電流源。(D)一般而言，FET 作爲放大器產生的雜訊較低。答：C

20.p 通道 MOSFET 閘極加上正電壓時，通道寬度(A)減少(B)增加(C)沒有影響(D)不一定。

答：A

21.有關 MOSFET 的敘述，正確的是：(A)輸入阻抗極低(B)積體電路所佔體積極小(C)「O」是指二氧化矽層(D)可作雙向對稱開關。答：BCD

22.下列敘述何者正確？

(A)二極體具有整流及放大的效果(B)NPN 雙極性電晶體可作爲放大器(C)PNP 雙極性電晶體則不可作爲放大器使用(D)接面場效應電晶體可用來作開關(E)MOSFET 也可用來作開關使用。答：BDE

22—5　微電子技術(microelectronic technology)

體積小、功能穩定可靠、成本低是任何電子儀器和設備的設計準則。但一個複雜的線路，所需配備的電晶體、二極體、電阻、電容等電子元件，和數量眾多的焊接線，數量相當可觀。**1960** 年代積體電路技術的成功解決了這些問題，使電子工業走向「輕、薄、短、小」。

微電子技術的核心為半導體製程。半導體製程結合了物理、化學、電子及電腦輔助設計等先進科技，用以製造生產各式的電子元件。

一、一、積體電路(integrated circuit，簡稱 IC)

1.1958 年基爾比**(Jack St Clair Kilby**，美國人，**1924-)**在美國德州儀器公司製造出第一個積體電路。

2.積體電路**(integrated circuit**，簡稱 **IC)**就是將電路所需的電子零件，連同金屬接線，全部整合製作在一個很小的矽晶片**(chip)**內。

⇒此 **chip** 即是一個具有某種特定功能的完整電路，我們稱之為積體電路**(integrated circuit)**，簡稱 **IC**。

3.由於所涉及的尺度非常微小，常以微米**(μm)**為單位，所以又稱之為微電子技術**(microelectronic technology)**。

二、二、積體電路的製程：

1.製造出高品質的矽經棒，長度約為 **1~2m**，直徑約為 **15cm~30cm** 不等**(8** 吋晶圓及 **12** 吋晶圓**)**。

2.將晶棒切割成厚度約 **0.7mm** 的薄片，並將其表面研磨拋光，就成為晶圓**(wafer)**。

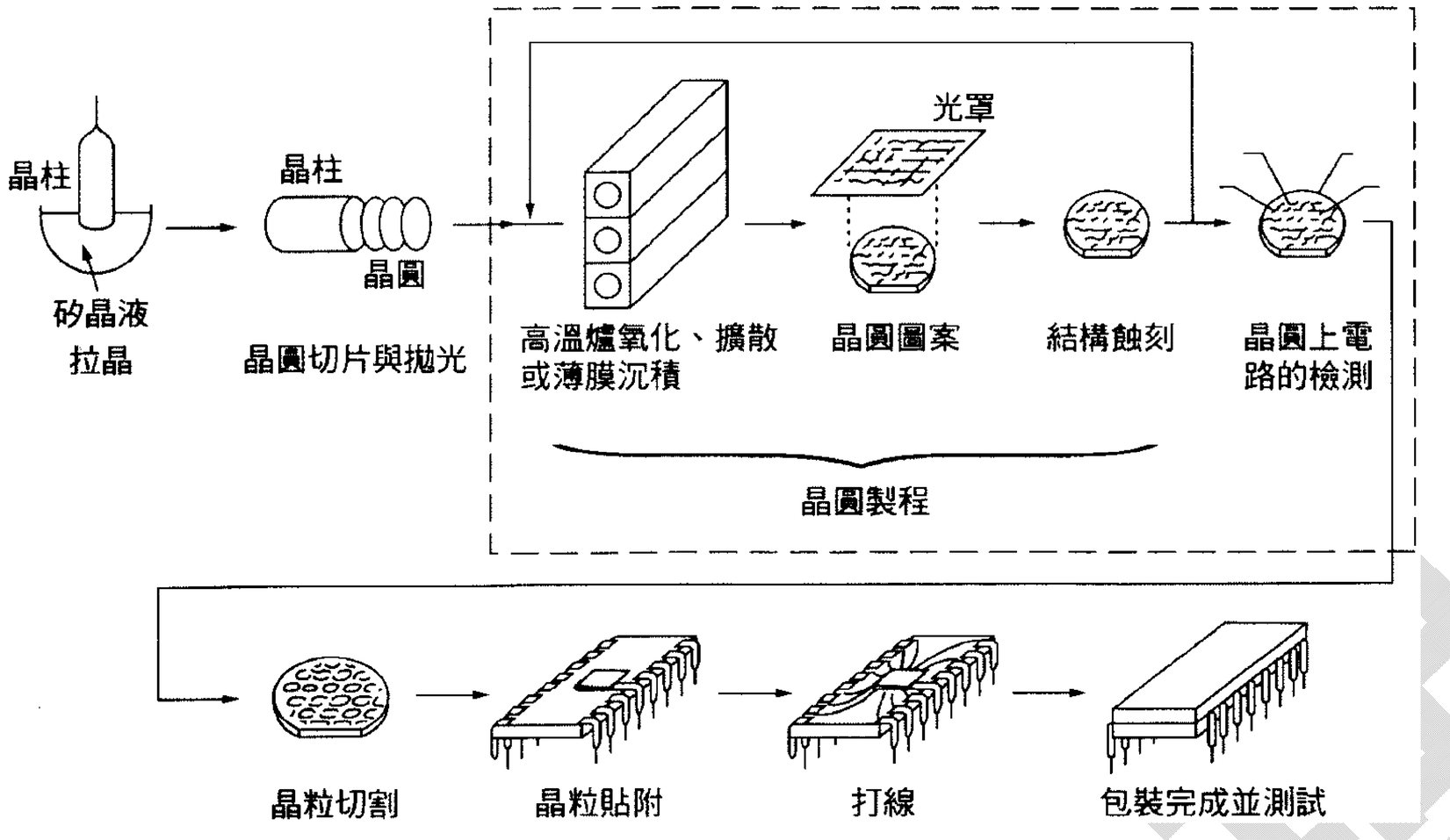
3.IC.的製程：

其製程包含有氧化、擴散、離子布植、微影照像、蝕刻、及薄膜沉積等技術，並將製成的半導體元件檢測。

4.將晶圓切割成晶片**(chip)**或晶粒**(die)**，此為一完整的電路，再將這些晶片個別的連接導線、封裝即完成一實用的積體電路。

在 **IC** 製作中所使用的晶圓面積越大，則一次製作出來的晶片數目就越多，成本就可以降低。目前商業化生產的的最大晶圓為 **30cm(12** 吋**)**。

晶片上蝕刻的線條尺寸非常微小，目前已發展出 **0.13μm** 的製程，並朝更小尺寸進行研發。**(**目前台積電已研發出 **90nm**，並預計在 **5** 年內降至 **9nm)**



三、三、電子技術對現代生活的影響

1.積體電路由於具有尺寸小、功能多、價格低廉、可靠性高及方便等特點，自發明以來，以為人類生活帶來巨大的改變。

2.積體電路在生活中的應用，處處可見：如電腦、電子計算機、隨身聽、行動電話等。

3.微電子技術是電子工業的一次大革命，使人類的生活面貌完全改觀，迥異以往；且隨著為電子技術的日益精進，一個嶄新的世紀正逐漸浮現在我們眼前。

4.但是在我們分享高科技發展所帶來的便利時，也必須留意它所帶來的環境污染問題，畢竟地球只有一個，一味地追求高度經濟發展，而忽略環境的保護，受害的將是後代的子子孫孫。

吳錫珩物理

台灣歷屆試題

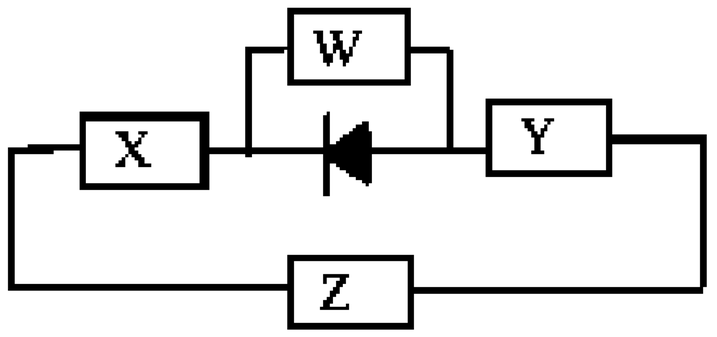
※半導體的特性

1. 下列關於半導體性質的敘述中，哪些是正確的？
(A)純矽晶中，自由電子爲電流載子，但電洞不是。
(B)純矽晶中若摻入磷的雜質，則成爲 p 型半導體。
(C)p 型矽晶中，電洞爲主要的(或多數的)電流載子，自由電子爲次要的(或少數的)電流載子。
(D)p 型矽晶中有電流流通時，電洞和自由電子流動所形成的電流，兩者異向。
(E)二極體有整流的功能，乃因晶體內有一內建電場之故。【93.指考】[1]

2. 下列有關半導體的敘述，哪些正確？
(A)不含雜質的純半導體材料，其電子、電洞的密度相同
(B)純的半導體材料溫度越高時，電子、電洞的密度越大
(C)矽半導體加入 5 價雜質，會形成 P 型半導體
(D)二極體的 P、N 接觸面形成一空乏區，空乏區的 P 型部分帶正電
(E) PNP 三極體的基極爲 N 型半導體【92.指考】[2]

※二極體

3. 若下圖所示爲測量二極體特性曲線的電路圖，則 W，X，Y，Z 分別代表何種儀器或元件？



(A)W：伏特計，X：電阻，Y：安培計，Z：60Hz 交流電源供應器
(B)W： 60 Hz 交流電源供應器，X：電阻，Y：伏特計，Z：安培計
(C)W：安培計，X：輸出電壓可調變的直流電源供應器，Y：電阻，Z：伏特計
(D)W：伏特計，X：安培計，Y：電阻，Z：輸出電壓可調變的直流電源供應器
(E)W：電阻，X：伏特計，Y：安培計，Z：輸出電壓可調變的直流電源供應器【95.指考】[3]

4. 關於二極體的工作特性， 下列哪些敘述是正確的？
(A)二極體導通時， 其電阻值完全消失
(B)只要加直流電壓訊號就可導通二極體
(C)加適當的交流電壓訊號可導通二極體
(D)當加順向偏壓時， 二極體間的空乏區會增大
(E)當加逆向偏壓時， 二極體間的空乏區會增大【95.指考研究】[4]

5. 如圖 12 所示的電路中，交流電源的最大電壓爲 12.0 V，理想變壓器的原線圈與副線圈的匝數比爲 2：1，二極體可視爲理想的整流器：順向偏壓時，二極體形同短路；逆向偏壓時，二極體形同斷路，電阻 R = 5.0 Ω。電阻 R 兩端的電位差(或稱電壓) VAB 定義爲 VAB= VA -VB，VA 和 VB 分別爲 A 點和 B 點的電位。試問下列敘述中，哪些正確？

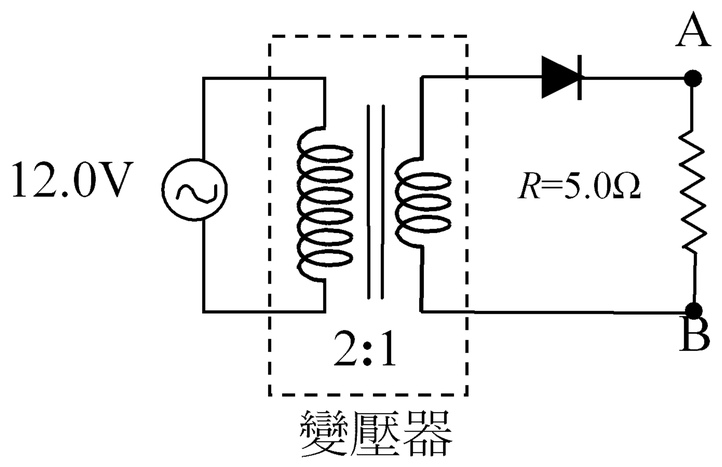


圖 12

(A)VAB 的最大值爲 4.0V
(B)VAB 的最小值爲 0 V
(C)流經電阻 R 的電流爲直流
(D)流經電阻 R 的平均電流爲零
(E)流經電阻 R 的最大電流值爲 0.8A【94 指考】[5]

6. 一個標示爲 6V、5W 的白熾燈泡， 原接通 6V、60Hz 的交流電源，其電路如圖 10(a)所示。若在電路上串接一個二極體，如圖 10(b)所示，則下列有關此二電路的敘述，何者正確？

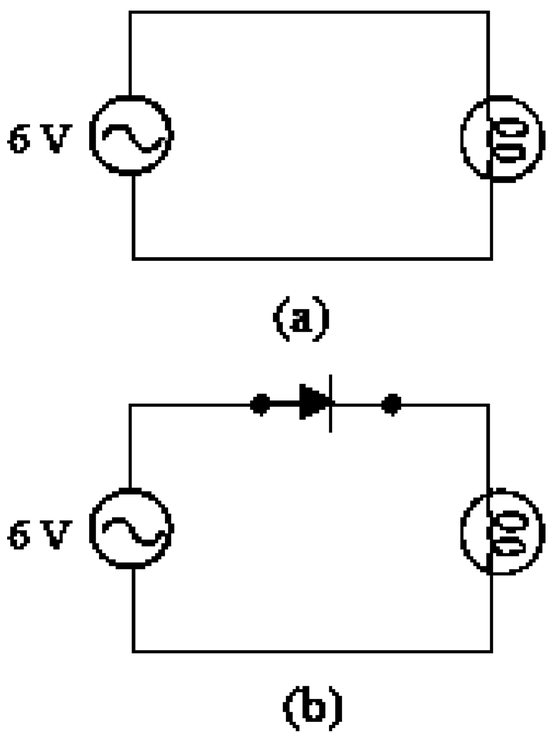


圖 10

(A)若將二極體反接， 則燈泡不會亮
(B)串接二極體後， 燈光顏色較偏向紅色
(C)串接二極體後， 燈泡消耗的電功率減少
(D)串接二極體後， 會明顯看到燈泡時亮時滅
(E)若將二極體改用一個 n 型半導體， 則電流斷路， 燈泡不會亮【94.指考研究】6

7. 在二極體內，*p* 型與 *n* 型半導體的接合面附近存在一個所謂的空乏區，如圖 10 所示。下列有關半導體及二極體的敘述，哪些正確？

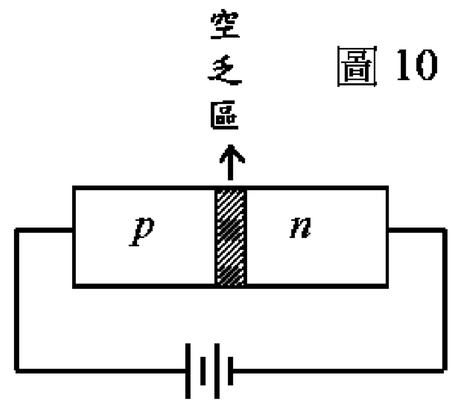


圖 10

(A)在空乏區內，靠近 *p* 型半導體處帶有正電
(B)純矽晶中若摻入磷的雜質便形成 *n* 型半導體
(C)*n* 型矽晶半導體中，自由電子及電洞均會傳導電流
(D)偏壓相等時，二極體在順向偏壓時的電流小於逆向偏壓時的電流
(E)在空乏區內，存在有一方向從 *p* 型半導體邊指向 *n* 型半導體邊的內建電場【93.指考補考】[7]

8. 二極體 D、小燈泡 L 和電動勢爲 1.5V 的電池(內電組可以不計)組成如圖 1 所示的電路。此二極體的電流-電壓特性關係如附表所示。已知通過小燈泡的電流爲 2.0mA，則此燈泡的耗電功率約爲何？

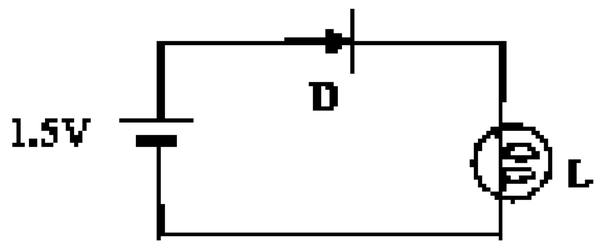


圖 1

(A)0.8mW

電壓 (V)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
電流	0	0.02 μA	0.90μA	41 μA	2.0 mA	96 mA

(B)1.6mW

(C)2.2mW

(D)2.5mW

(E)3.0mW【91.指考】[8]

※電晶體

9. 下列敘述何者正確？

(A)在 n 通道金氧半場效電晶體中， 流經通道的電流載子僅有自由電子。

(B)在 n 型半導體中， 由於自由電子的濃度遠大於電洞的濃度， 所以帶負電。

(C)在 p-n 接面二極體中， 爲保持電中性， 故在 n 邊內的自由電子濃度必須等於 p 邊內的電洞濃度。

(D)當 npn 雙極接面電晶體導通時，從射極出發的自由電子可以全部穿過基極，到達集極， 構成環路。

(E)在純矽的晶體中， 當其溫度上升時， 晶體內的自由電子和電洞的數目會等量地增加， 因此會增加晶體的導電能力。【94.指考研究】[9]

---

1 【答】(C)(E)

2 【答】(A)(B)(E)

3 【答】(D)

4 【答】(C)(E)

5 【答】(B)(C)

6 【答】(B)(C)

7 【答】(B)(C)

8 【答】(C)

9 【答】(A)(E)