

從半導體看世界

文／李雅明 清華大學電機系榮譽教授

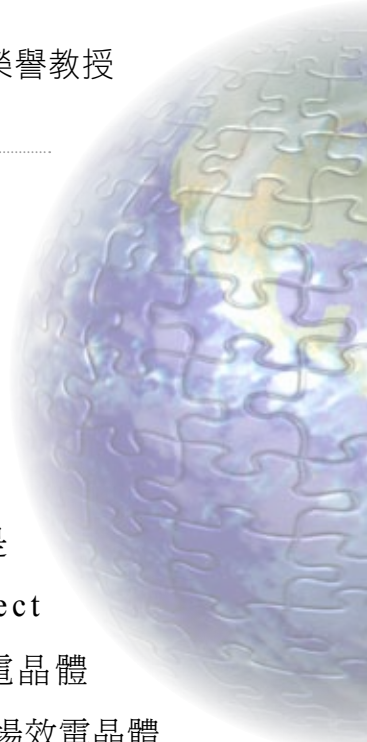
圖／陳玉嵐

在二十一世紀的今天，電子和資訊工業已經成了科技最主要的支柱。而半導體是電子工業最重要也最基本的部分。半導體器件包括積體電路（integrated circuit），光電元件和分離式器件，其中尤其以積體電路為最大宗。電晶體（transistor）是半導體器件的基本組成單元。電晶體有兩種最主要的作用，可以用來當作開關，也可以用來放大信號。

電晶體是用半導體材料作出來的電子器件。半導體就是導電性介於導體和絕緣體之間的材料。一般的金屬，像是金銀銅鐵之類的，導電性非常好。而磚土陶瓷之類的絕緣材料，導電性就很差。所謂半導體就是導電性介於這兩個極端之間的材料。因為半導體的導電性既不是最好，也不是最差，它的導電性可以大幅度的調整，因此我們可以利用這種特性來製

作電晶體。

電晶體是1947年發明的，到了現在，已經發展出許多不同形式的電晶體。最常見的形式有兩種，就是場效電晶體（field effect transistor）和雙極型電晶體（bipolar transistor）。場效電晶體是現在應用最廣的電晶體，而且場效電晶體的原理比較容易了解，所以我們先敘述場效電晶體。場效電晶體是一個有著三個接頭的電子元件。嚴格說起來，場效電晶體還有一個半導體基片（substrate）的接頭，但是對我們介紹的目的來說，只用三個接頭就夠了。這三個接頭的名稱是：源極（source）、漏極（drain）和閘極（gate）。場效電晶體的原理就是利用加在閘極上的電壓，來控制通過



源極和漏極之間的電流。我們可以用一個實際的例子來說明這種元件的原理。假設像圖1一樣有兩個水桶，一個放在比較高的地方，一個放在比較低的地方。中間用一條通道把這兩個水桶連結在一起。通道上面有一個水閘，當水閘打開的時候，水就可以從

上面的水桶流到下面的水桶去。而當水閘關起來的時候，水就流不過去了。這種水流的情形，就跟通過電晶體的電流，道理是一樣的。上面的水桶相當於電晶體的源極，下面的水桶相當於電晶體的漏極。水閘就相當於電晶體的閘極。

MOS場效電晶體開關原理

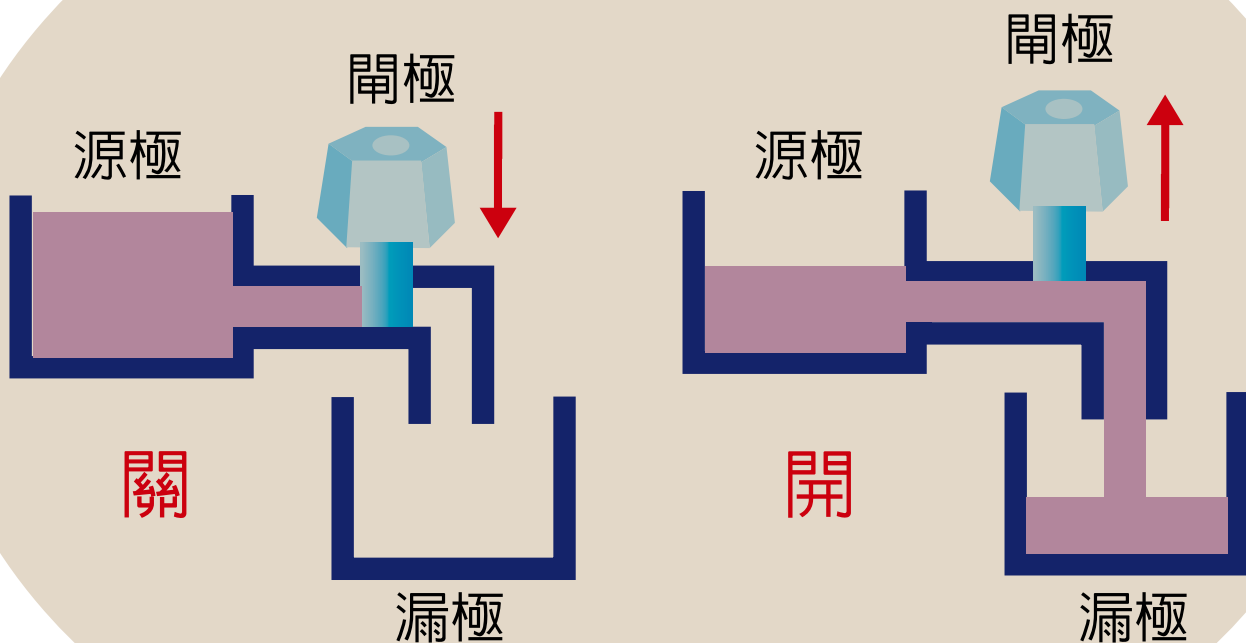


圖1：場效電晶體開關作用的示意圖

現在我們用n溝道場效電晶體（n-channel field effect transistor）來說明這種情形。半導體有所謂n型半導體和p型半導體的分別。n型半導體就是半導體中能夠活動的電子比較多，而p型半導體就是半導體中缺了一些可以活動的電子。從結構上講，如果我們在一片p型半導體的左右兩

端，製作兩個n型半導體的區域，這兩個區域當中，都有許多可以活動的電子，這就是電晶體的源極和漏極。源極相當於上面的水桶，漏極相當於下面的水桶。源極和漏極中間，就是電晶體的溝道區域，相當於兩個水桶之間的通道。用水閘來控制水流是很容易了解的，但是在電晶體當中，要

場效電晶體 (MOSFET)

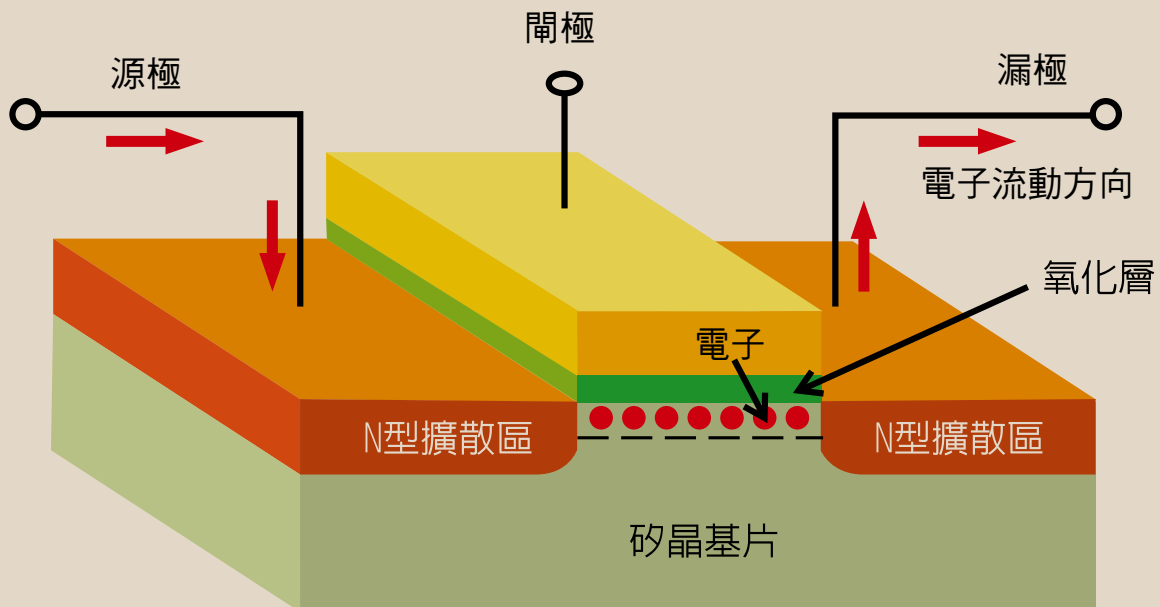


圖2：n溝道場效電晶體的截面圖

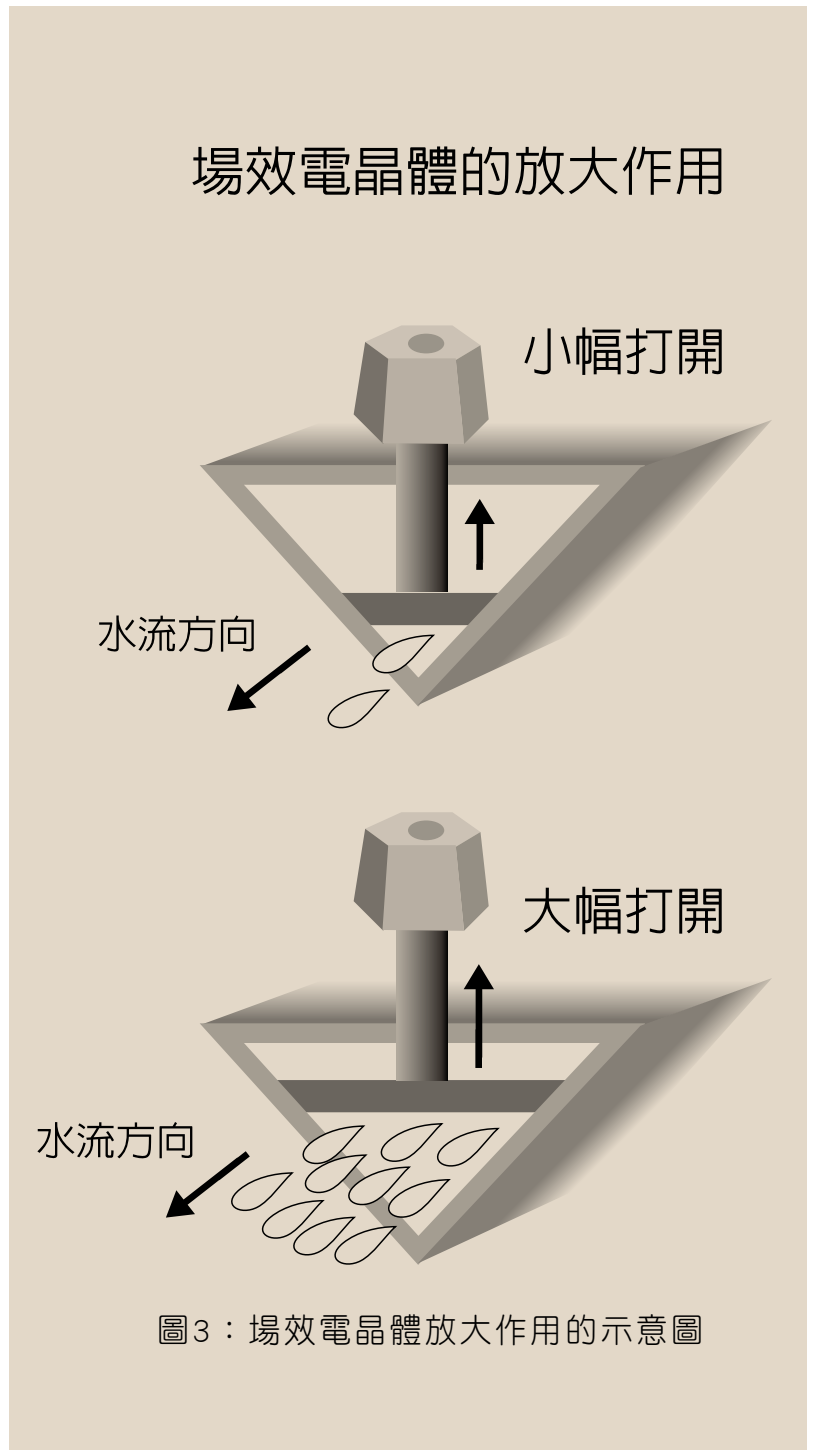
怎麼樣製作一個控制電流的閘極呢？製作電晶體閘極的方法，就是在溝道區域的上面，製作一個電極來當作閘極，用加在閘極上面的電壓來控制通過半導體溝道區域的電流，就像圖2所示。換句話說，就是利用閘極電壓，來改變下面半導體溝道區的導電性，決定溝道區是否可以導通，以及通過電流的大小，因而達到控制電流的效果。閘極的製作方法，是在溝道區的上面，先作一層很薄的絕緣體，再在這個薄絕緣層上面，放置一個金屬電極，這個金屬電極就是電晶體的閘極。絕緣層的功用是把閘極和半導體的溝道區隔開。閘極上的電壓，可以控制下面溝道區電子的濃度。當閘極加了正電壓的時候，就在下面的半導體溝道區，吸引了許多電子，當吸引來的電子數目，多到一個程度的時候，就會在溝道區形成了一個電子的通道，電子因而可以從源極流到漏極，於是這個電晶體就導通了。反過來說，當閘極上所加的電壓不夠大，下面的溝道沒有導通，電子就不能通過，這個時候，電晶體就處於截止的狀態。

因此，我們用改變閘極電壓的辦法，可以控制電晶體中從源極到漏極的電流。閘極上所加的正電壓越大，下面流過的電流就越多，這跟上面所說的，用水閘來控制兩個水桶之間的水流，道理是一樣的。因為這種電晶體，是利用閘極電壓的電場，來控制電子的流通，所以我們把它叫做場效電晶體（field effect transistor）。這種電晶體的結構，如果我們在閘極區域，從上往下看，分別是金屬電極，薄絕緣層，和半導體。這個薄絕緣層，往往都是用氧化物來作成的，因此，我們就把這種結構的電晶體，叫做金屬—氧化物—半導體場效電晶體（metal-oxide-semiconductor field effect transistor），這就是現在使用得最多的電晶體，英文的簡寫是MOSFET，中文簡稱金氧半電晶體。上面所說的這種利用電子通道的場效電晶體，也就叫做n溝道場效電晶體。如果，我們把半導體的導電種類和所加的電壓極性，完全反過來，這樣形成的電晶體，就叫做p溝道場效電晶體。如果我們在一個電路中，同時使用n溝道電晶體和p溝道電晶體，

這樣形成的電路是最省電的，叫做互補式金氧半電晶體電路（complementary MOS，也就是CMOS）。這是現在的積體電路中，使用得最多的電路形式。

電晶體除了有開關的作用之外，還有一種重要的功能，就是放大的作用。我們可以用一個三角形的水龍頭開關，來形象式的描述電晶體的放大作用。圖3顯示一個三角形水龍頭開關的截面圖。剛開始的時候，開關的閘門完全放下，沒有水流，代表電晶體截止，電流不通。當閘門慢慢打開，水開始可以流通。不過，閘門每上升一個固定高度，水流增加的程度不同。由於閘門是三角形的，隨著閘門的上升，水流量增加的速度是越來越快的，這就是放大的作用。這跟場效電晶體電流的放大作用很類似。

另外一種也很常見的電晶體，就是雙極型電晶體。在電晶體發展的早期，雙極型電晶體使用的比較多。雙極型電晶體的結構，是用三層不同導電型態的半



導體所組成的。如果這三層半導體的排列的次序是：n型半導體，p型半導體和n型半導體，也就是npn結構的話，這樣做成的電晶體叫做npn雙極型電晶體。反過來說，如果是pnp形式的結構，就叫做pnp雙極型電晶體。雙極型電晶體的三個區域，分別叫做射極（emitter），基極（base）和集極（collector）。對於npn雙極型電晶體來說，第一個n型區射極可以放出電子，電子通過p型區的基極，來到收集電子的n型區集極。其中這個基極是很薄的。雙極型電晶體的射極，基極和集極，分別相當於場效電晶體的源極，閘極和漏極。雙極型電晶體的原理，是利用通過基極的小電流，來控制和調節從射極到集極比較大的電流。雙極型電晶體的優點是速度比較快，但是缺點是用電量比較大，在現在的積體電路中，使用的已經比較少了。

電晶體是1947年發明的，積體電路和微處理器（microprocessor）則分別在1959年和1971年間世。半個多世紀以來，半導體器件在電子儀器、資訊產業，國防裝備上都扮演著

關鍵性的角色。在日常應用上，無論是在電腦、手機、家電中都是最重要的元件。半導體工業可以分為半導體晶片的設計、製造、封裝、測試等部門。到了二十一世紀的現在，在半導體工業中扮演著主要角色的國家和地區有：美國，日本，歐洲，韓國，台灣，中國大陸等。美國在晶片的設計方面領先，而日本、韓國和台灣則在製造、封裝、測試等方面佔有優勢的地位。中國大陸在改革開放之後，特別是最近的十年間，成為半導體器件應用的最大市場。2008年，大陸已經佔了全世界半導體市場的38.3%，而整個大中華地區更佔了百分之43.7%。如果放眼世界，我們可以注意到，在半導體工業中領先的國家，除了歐美文化圈的國家之外，就是東亞儒家文化圈的國家。半導體工業是一項高科技的工業，在這種工業中領先的條件是要具有高科技的人才和有紀律的工作文化。這兩種文化圈的國家在半導體工業中有著領先地位也不是偶然的。

半導體工業自然是整個經濟大環境中的一環。在表1中，我們列出

了最近的2009年世界上國內生產總值（gross domestic product）排在最前面的15個國家，加上台灣和香港的各種經濟數據。從表上我們可以看出來，中國大陸在2009年已經是世界第三大經濟體，如果加上香港，則更已經超過日本，成為僅次於美國的第二大經濟體。到了2010年的第二、第三季度，大陸本身的國內生產總值已經正式超過日本。根據各國經濟學者的估計，大陸的國內生產總值有可能在2020年之前超過美國。如果以購買力平價（purchasing power parity）來計算國內生產總值，則中國大陸追上美國的日程會更早，很有可能在2016年之前就會超過美國。如果看各國的外貿，大陸已經是全世界排名第一的出口國，也是僅次於美國的第二大進口國。如果加上香港，則整個中國大陸的外貿總額已經與美國相去不遠。這表示大陸除了是「世界工廠」之外，也將成為「世界市場」。台灣的半導體工業應該要把握這個機會，台灣過去的工業往往以代工為多，附加價值不高，這主要是因為本地市場不夠大，以致於無法培養自有品牌的

關係。大陸今後將會有很大的市場，兩岸之間現在也已經簽訂了經濟合作架構協議（ECFA），未來台灣的工業，特別是半導體工業，如果能夠把台灣的經驗與大陸的市場結合起來，將可以創造一個雙贏的局面，為兩岸半導體工業開創一個光明的未來。

表1：2009年世界主要國家和地區的經濟數據

國家或地區	2009 GDP/ 匯率 (10億美元)	2009 GDP/ PPP (10億美元)	匯率人均 GDP (美元)	人均GDP /PPP (美元)	人口 (百萬)	出口額(10 億美元)	進口額 (10億美 元)	發電量 (10億千 瓦小時) (2008年)	鋼產量 (百萬噸) (2009年)
美國	14256	14256	46381	46381	307.2	1056.9	1558.09	4110	58.1
日本	5068	4159.4	39731	32608	127.0	579.3	549.3	1009	87.5
大陸	4909	8765.2	3678	6567	1338.6	1201.7	1005.6	3221	567.8
德國	3352.7	2806.2	40875	34212	82.33	1116.3	927.1	589	32.7
法國	2675.9	2108.2	42747	33679	64.05	474.32	536.15	539	12.8
英國	2183.6	2139.4	35334	34619	61.11	356.27	484.42	363	10.1
義大利	2118.2	1740.1	35435	29109	58.12	369	358.7	292	19.7
巴西	1574	2013.1	8220	10514	198.74	158.9	136	449	26.5
西班牙	1464	1360.6	31946	29689	40.52	215.7	293.2	288	14.3
加拿大	1336.4	1281	39669	38025	33.48	298.5	305.2	614	9.0
印度	1235.9	3526.1	1031	2941	1156.9	155	232.3	787	56.6

續表1：2009年世界主要國家和地區的經濟數據

國家或地區	2009 GDP/ 匯率 (10億美元)	2009 GDP/ PPP (10億美元)	匯率人均 GDP (美元)	人均GDP /PPP (美元)	人口 (百萬)	出口額(10 億美元)	進口額 (10億美 元)	發電量 (10億千 瓦小時) (2008年)	鋼產量 (百萬噸) (2009年)
俄國	1229.2	2109.5	8694	14920	140.04	295.6	196.8	983	59.9
澳洲	997.2	851.1	45587	38911	21.26	161.5	160.9	250	5.2
墨西哥	874.9	1465.7	8135	13628	111.2	223.6	234.6	245	14.2
韓國	832.5	1364.1	17074	27978	48.51	363.5	323.0	416	48.6
台灣	378.9	735.9	16392	31834	22.97	203.7	174.6	225	15.7
香港	210.7	307.0	29826	42748	7.05	318.52	347.32	39	NA
世界	57937.4	69808	8446	10366	6790	12110	12010	19895	1219.7

編按：

99年科教館舉辦『科學新發展到民間』系列講座，各主講人精闢的演說，引起許多家長、老師與民眾熱烈的討論，紛紛透過信件及電話詢問相關的訊息，經過內部討論後，特請10月16日演講者李雅明教授將多年研究的心血分享給科學研習月刊的讀者，藉此能讓更多民眾可了解更多寶貴的科學知識。