

## 第一章 19 世紀電晶體誕生前的電子/電力技術革新



Renesas Electronics Corporation.

生產本部技術開發部門

MCU device 開發部 主管技師

奧山 幸祐

本章節是參考城坂俊吉所寫的『以電子學為中心的年代科學史—第 2 版—』、大衛·博達尼斯著並由吉田三知夫所翻譯之『電氣科學革命』等著作後，以電氣/電子科學的發展為中心，針對半導體被大量運用前的歷史作描寫。

人類在這 1800 年來第一次獲得穩定的電力，從那時算起至今也只有 200 年左右的時間。那之後，1895 年在美國尼亞加拉完成了第一座水力發電廠，而真正開始使用電力的時間大約從 100 年前開始，電子裝置的核心—電子的發現也是在 1897 年，和第一座水力發電廠完成的時間差不多。100 年前的日本已經進入了明治時期，而現在則是來到了 NHK 上放映的大河時代劇(江戶末期至明治時期)—「篤姬」的下一代，也就是甲午戰爭結束日俄戰爭期將開始的時候，約莫 30 年前，日本人因為明治維新而放棄了「丁髻」的造型。自半導體於 1947 年被發現到發展至今約莫 60 年(至 2018 年已 70 餘年)。若是以人類文明 5000 年的歷史來看，100 年、200 年或 60 年都只是一瞬間的事情而已。人的 60 歲被稱作「還曆」，對長壽的日本國來說還是屬於戰鬥力十足的年紀，科學發展能在這樣短短的一世代左右內突飛猛進，著實令人驚艷。

在我現在執筆的同時，電視上正播報著日本人飛向外太空，並在太空中建造國際太空站的實驗室「KIBO」的影像。在畫面中登場的是各式各樣的電子機器，像是太空站、太空梭以及機械手臂。接著出現的是以黑色太空為背景，由藍色及白色渲染而成的美麗地球。這雖然是科學進步上極具象徵意義的畫面，但這 200 年

間又有誰想得到人類能進步到如此境界呢？



(圖)太空梭的機械手臂與地球

另一方面，在別台的電視節目中正在報導因二氧化碳氣體排放量過高而產生的全球暖化問題。不可否認的是，這 200 年間優異的科技發展導致人口的快速增加，對地球環境也造成了一定的影響。但要是沒有電子技術的進步，社會只單靠重工業運作的話，將會浪費更多的消耗型能源，隨之也將加速全球暖化的現象。前面介紹過的汽車發動機控制器及電腦等以半導體為中心的電子技術便是為了促進低能源消耗的技術。而這樣的技術發展不止讓電子機器的便利性提高，也同時讓這些電子設備的價格降低，如此一來便大大增加了全球電子機器的使用量，反而加速了地球能源的消耗。因此「環境問題」也成了人類在未來揮灑創意和智慧時不得不去思考的課題。雖說不管是任何的發展都有好有壞，但就如歷史所示，在思考解決困難的方法時，人類的智慧常會激發出下一個意想不到的發展。

獲得電力

電力的發展是從 1800 年義大利的亞歷山卓·伏特發明的電池開始。到這時候大家雖然對「電力」已經有了初步的概念，但還未發現摩擦琥珀等的靜電起電相對來說安定且實用的。順道一提，大家都知道電力在英文是叫 electricity，但其實這個詞是源自於古希臘的波斯語 *electrum*，意思是指當時大家廣為使用的「琥珀」。在 1790 年代，伏特發現在舌頭的上方放置硬幣大小的銅片，在相對位置放鋅片，隨後讓這兩枚圓盤邊緣接觸時舌頭會有相當大的刺激。伏特在他自己的口中製造出了世界上第一個「安定的電池」。在這之後，他發現只要隔著腐蝕性溶液，像是鹽水、唾液等等，不管是哪兩種金屬皆會產生一樣的作用，電化學電池便在 1800 年問世。為紀念伏特的貢獻，電力的其中一個電壓單位便命名為「伏特」，現在也仍然被使用著。在這邊提起可能有點多餘，但電流單位的安培及電阻單位的歐姆，也都是由發明家的名字命名而來的唷！可能是因為大部分的研究學者都希望自己的名字能名流千世吧。

雖然電池的發明讓電力能夠安定的被使用，但因為產量很小所以還不到真正使用電力的地步。為了能真正使用電力，發電機的發明及電力和磁力關係的理解是必須的。20 年後的 1820 年，丹麥的奧爾斯特發現電流流過導線會使羅盤的指針旋轉，此一跨世代的發表讓電力與磁力的關係趨於明朗。「電流會產生磁場」基於奧爾斯特的這個發現，同一年根據法國的安培(上述電流的發明者)等人的研究指出，電流的強度及方向和磁針的反抗力的強度與方向息息相關。在這之後，高斯和歐姆(電阻的發明者)等人依據安培提出的電力磁力的理論，將數學方法導入其中，並建立其基本的單位制度。

要達到機械用電的電力供給量，還需要等到另一個物理現象的明朗化，那就是「磁生電原理」。1831 年英國的法拉第發現了磁生電原理。將纏有導線的線圈固定於木頭上使其通電，並將另一個一樣纏有導線但未通電的線圈靠近通電的線圈再遠離，反覆幾次後發現未通電的線圈上也會有電流通過。有通電的線圈因有電流流過而產生磁場，未通電的線圈和有通電的線圈因距離改變，使未通電的線圈的電場產生變

化進而產生電流。透過這兩個線圈間的距離變化，也就是磁石及通電導體間距離的變化，法拉第發現了通過磁力可產生電力的法則。這也是



法拉第

現今使用到的各種電力的原則。若是持續進行距離變化的這個動作便可使電流持續通過，運動速度變快電流也會跟著變大。直到現在，即便動能有人力、風力、水力、火力、原子力等各式各樣的種類，但能將這些能源產生的動能轉變成電力的便是法拉第發現的磁生電原理。

這個發電系統的原理美國的約翰亨利於 1830 年(比發拉第早一年)也發現了，但因為遲遲未發表的緣故，最後被發拉第搶先一步。這兩個人人在英國及美國分別留下了一定的成就，但以貧窮家庭長大，透過自學而留下偉大成就的這一方面來說，兩者的境遇是一樣的吧！兩人在晚年於學會認識並且成為摯友。在磁生電的原理發表後，發電機的實用便指日可待，但距法拉第的發現之後又再過了 64 年，直到 1895 年時尼加拉瓜水力發電廠才成功地被啟用。與當時最為主流的蒸汽機相比，因效率方面表現不優異而遲遲無法成功。但在水力發電成功地被使用後，電信/電話及之後的電網建立、電燈照明、發電機、變壓器及電動機等的技術陸續被發明並實用，也進一步的為 20 世紀的發展築基。

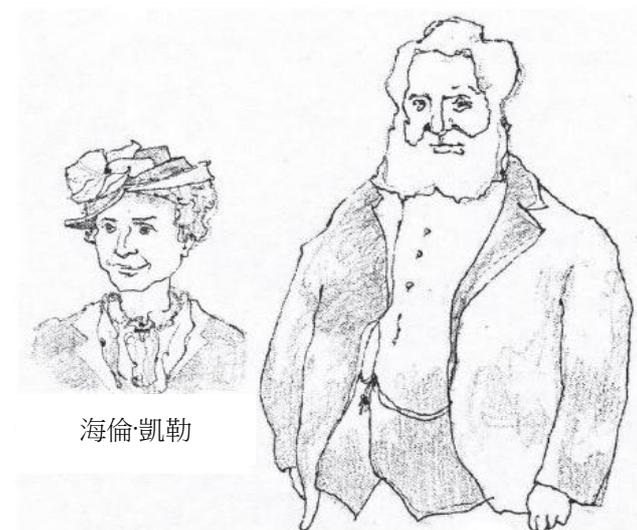
## 電力與通訊

因為 19 世紀的電力技術而誕生的革命還有一個，那就是通訊技術。前一篇提到的手機雖然是無線通訊，但電信、電話及無線電等的通訊技術早在這個世紀就被發明並且被活用的。19 世紀時，因鐵路開始普及，列車到站前需接獲情報，所以也促進了電信技術(透過電線傳送信號的技術)的蓬勃發展。雖然最初構思出電信技術的是德國的賽默靈，但之後是靠著很多人的力量將此技術實用化的。1836 年至 1837 年間英

國、美國及德國皆發明出此技術並將其改善。最早實際運用電纜的首例在英國，英國在倫敦至卡姆登鎮站之間架設了歷史上第一條的電纜線。美國的話是在 1837 年至 1844 年間，由薩繆爾·摩斯開始將其實際運用於生活中。摩斯將有線通訊技術的概念，與約翰亨利和歐洲學者們發明且改良後的技術，結合成在紙上打點的通訊方式，即為「摩斯密碼」。也將此技術申請專利並運用在日常生活上。而在 19 世紀中期，國內線也開始蓬勃發展了起來，其範圍上至英倫海峽下至跨大西洋電纜線。

1875 年，亞歷山大·格拉漢姆·貝爾發明了電話。這位貝爾就是之後使電晶體問世的貝爾研究所的創辦人。在貝爾去世後，貝爾研究所所發明的電晶體最初是被運用在助聽器上。其實貝爾會發明電話的契機，是源自於對聽障者的愛。貝爾的父親是位聾啞人士，受到其影響，貝爾開始研究唇語，並成為了一位唇語教師，也因此與他後來的妻子梅布爾結識。因梅布爾是聾啞人士的關係，貝爾常常會思考該透過怎樣的方式才能將聲音傳達給聽障人士，並開始研究用人造鼓膜及一條導線傳遞多個信號的方法。

貝爾在研究中發想出用鐵的薄片當成人造鼓膜的想法，並在這個過程中發明出了電話。在雙方的發送/接收端的電磁鐵前放置震動板，將發送端震動板的震動轉換為電磁鐵的信號，再



海倫·凱勒

貝爾

將這個信號轉換為接受端的音響信號。這就是貝爾發明電話的原理，且至今仍然被廣泛使用著。貝爾在發明電話的前兩年時，與當時的電力科學權威約翰·亨利見面，提及電話的發想時受到了很大的鼓勵，也因此更用心著手於電話的研究。後來，在實驗室的貝爾對人在隔壁房間的助手華生說的：「華生快過來！」成為了第一句透過電話傳遞的人聲。

這或許是題外話，但克服聾啞失明等多重苦難，一生致力於幫助殘疾人士的海倫·凱勒也得到過貝爾的幫助。因為貝爾，海倫·凱勒才因此有緣結識後來成為他啟蒙導師的蘇利文老師。因為安妮·蘇利文老師的教導及一生的熱誠奉獻，海倫·凱勒才得以脫離苦難。雖然自己本身也是殘疾人士，但凱勒依舊能敞開寬大的羽翼，拯救無數同受殘疾之苦的人們，這樣的美談至今也廣為流傳。

在這之後，電話透過湯瑪斯·愛迪生的改良，變得更加實用。愛迪生和貝爾同年，兩人皆是在俄亥俄州的米蘭出生的。愛迪生在少年時獨樹一格，學校老師曾向愛迪生的母親說他認為愛迪生的智商有問題，導致愛迪生的母親一氣之下便讓愛迪生休學了。從那時開始，愛迪生便自己透過讀書和作實驗來學習，12 歲時開始了在火車上賣報紙的工作。在一次機會



愛迪生

下，愛迪生開始學習通訊技術，15 歲時一邊當電報員一邊沉迷於發明之中。22 歲時在華爾街的辦公室上班，後來成為股票中會使用到的電信指示器的維護專員。在這個工作期間，愛迪生為了想改良指示器，花了 4 萬美元買下機器，並以此為基礎成立了技術顧問公司。而公司成立的這 6 年間發明活動從不間斷，也因此產出了大量的發明。在這之後，愛迪生於 1876 年在新澤西州的門洛帕克成立了應用科學研究所，並在這個實驗所裡發明出了超過 1,000 件的产品。而他也是在這個實驗所裡與貝爾發明的電話相遇的。貝爾的電話系統是單純的接收與

發送的類型，不過愛迪生認為可使發送端產生碳的壓阻效應，並在震動板上放置碳粉，將震動板的壓力變化轉換成電阻變化，使電流通過感應線圈。如此一來，電池的電流便可直接通過電話線，使電話的通訊範圍擴大。這些成功除了歸功於愛迪生的好腦袋，還要感謝他那份對於技術的執念呀！而愛迪生也是世界第一座研究所功不可沒的推手。也因為如此，開啟了組織性研究的大門，讓電話機的實用及留聲機等具代表性的專利成為了可能，同時也成為現在研究所的先驅。

## 空氣中流動的電波/電磁波與通訊的利用

因電信及電話被發明且實用化之後，地球上情報傳遞所需的時間大幅縮短。不過演變至現在的通訊技術還需一個革命性的進步，那就是一無線通訊。這個無線技術不只不需要透過導線來傳遞訊息，更讓廣播和電視等同時發送訊息給多數不特定的視聽者的這件事成為可能。此外，在這之後無線通訊也被運用在雷達方面的技術上。

剛才介紹的法拉第所提出電力與磁場的關係，是指透過改變磁場，讓空氣中產生電波與電磁波的意思。電力並不只有存在於導體之中，我們也發現藉由移動磁鐵可使電力的力場與電波(電磁波)的範圍擴大。這個發現是無線通訊技術的關鍵。在這之後，根據蘇格蘭的物理學家詹姆斯·克拉克·馬克士威在 1864 年所作的發表，電磁力學完成了。這個馬克士威理論證實了電磁波和光是用一樣的速度(約每秒 30 萬公里)在前進。之後，在 1887 年德國的海因里希·赫茲透過實驗證實了電磁波會在空中流動，且電流會流向遠端的收信器。

將赫茲的實驗結果實用化的是當時才 19 歲的義大利人馬可尼。在赫茲逝世的 1894 年的 1 月，馬可尼詳讀赫茲的解說本，並在自家著手進行實驗。用 1.8M、4.3M 的天線的話可通訊距離大約為 90M、270M；在 1896 年，馬可尼將發信器與裝置在高樹上的天線連接，並將另一端連結到地面下的金屬(類似現在的接地天線)，同時搭配接收器的設備，並成功通訊 3km。馬可尼在 1897 年於義大利取得專利並成立公司，

開始了船舶與燈塔間的通訊業務。除此之外，搭配通訊器的設備，馬可尼於 1899 年成功的發出橫跨英倫海峽的無線訊號，於同一年的 12 月也成功地橫跨了大西洋。然後在跨英倫海峽通信實行了數週後，透過此通信設備，成功救助了遇難的 *Mashiusu* 號，這件事也讓無線通訊的有效性瞬間增加。如果馬可尼是一位專門研究電磁波的學者，並相信電磁波和光具有相同的特質，會直線前進的話，說不定就不會想挑戰在圓形的地球上使無線通訊橫跨大西洋了。正因馬可尼年輕，使他一股腦地去嘗試，慢慢一點一點的延長通訊的距離，最後才使遠距離的無線通訊成為可能。或許這也是歸功於義大利人獨有的開朗與樂天的性格吧！

## 電流的來源是？

### 《從導體跳出並被捕抓到的電子》

就連發明王愛迪生也不曾發現，加熱燈泡中的燈絲會讓電子從燈絲跳出，而跳出的電子會撞擊燈泡內側玻璃並使玻璃起霧。雖然愛迪生曾一邊進行研究一邊對玻璃起霧一事抱持著疑問，但卻未曾發想出「電子」這個存在的觀點。不過愛迪生偉大的地方在於，雖未發想出電子會從燈絲跳出來的這個觀點，但卻將這個現象透過實驗證實並於隔年申請了專利。也因此，加熱燈絲會使電子跳出的這件事情被稱為「愛迪生效應」。此效應是指，愛迪生在燈泡內放入薄薄的金屬板，並在燈絲與金屬板之間放入電流計，以此證實只有在使燈絲通過高電壓時才会有電流流過的這件事。此現象證實了被加熱的燈絲與金屬板之間的空氣中有電流通過。這只是發明王愛迪生的其中一項發明而已。愛迪生在乎的並不是研究科學現象的由來，而是在於如何將這個現象實際運用在生活中，所以當時的愛迪生並不覺得「愛迪生效應」這個現象有其實用性，也就不認為它是個重要的發現。

這個現象不只發生在燈絲側，相反的，若是在金屬側施加高電壓時電流就不會流動，因此發現了「整流特性」。以這個現象為出發點，二極體檢波器、真空管三極體也相繼問世。當

時，曾任職於愛迪生公司的弗萊明，在方才提到的馬可尼的公司從事顧問一職。在任職期間(1904年)，弗萊明試圖將這個現象(愛迪生效應)應用在檢波器上，因此發明出了二極體檢波器(並非真空管)；而一般被概括稱作真空管的真空管三極體則是由美國的李·德富雷斯特所發明。德富雷斯特為求檢波器的安定性，著手進行改良，但不管是哪一個都與馬可尼他們的專利相牴觸，後來改以開發新式檢波器為目標轉而著手改良二極體檢波器。德富雷斯特的想法是放棄用二極體的陰極溫度控制電流，取而代之的是插入第三個電極，並利用這個電極控制電流。在1906年德富雷斯特成功的實踐了這個想法，並發明出了真空管三極體。這個真空管不只可以當作敏感度良好的檢波器，也可運用於放大器、發射器、調製器等用途上，成為了無線技術發展不可或缺的原動力。這之後所誕生的電晶體，也是為了實現這個真空管三極體在半導體固體中的機能所誕生的發名。

在另一方面，最開始發現電子的是1897年(發表愛迪生效應後的第14年)義大利的J. J.湯姆森。發現電子的過程是和愛迪生效應截然不同的。這個發現的起源是來自於1857年由德國的布魯克所構想並由蓋斯勒所製成的真空放電管。這個放電管被布魯克命名為蓋斯勒管。放電管是指使試管大小的玻璃管內呈現10分之幾托至幾托的真空狀態，並施加1~3kV的電壓。現在也用在檢查真空度上，這也是之後發現電子及X射線的重要里程碑。布魯克利用蓋斯勒管作了真空放電及真空中的電流實驗。利用這個實驗證實了，靠近陰極的玻璃管壁會發出綠色螢光，但若將玻璃管放進磁場內螢光的位置便會改變，如果將電磁鐵的極性對調的話螢光的位置也會跟著對對調等現象，並透過這些實驗推測出陰極側會放射出帶電性粒子(電子)。

到了1874年英國的克魯克斯製作出了在0.1托的真空度下比蓋斯勒管更能觀察出放射線(電子)的克魯克斯管。在0.01托的真空度下使用這個放電管，可使電子在陰極附近的玻璃壁加速碰撞，產生螢光。而電子在陽極電極與玻璃壁碰撞後產生X射線，這也就是物理學家倫琴在1895年所發現的X射線。克魯克斯在製作放電

管的後兩年進行實驗，並透過實驗證實從陰極放射出來的東西並不是電磁波，而是帶電粒子。

接著在23年後的1897年，先前提到的湯木生利用這種克魯克斯管進行實驗，證實在陰極側的放射物質是帶電粒子，並測量其比電荷( $1.17 \times 10^8$  庫侖/g)和質量(約為氫的1/1000)。雖然這個值在之後會更加精確，但湯木生是第一位將此量化的人。湯木生一開始稱這個粒子為「微小體」(corpuscle, 微粒子)，後來大家意識到這是電荷的最小單位後，便開始稱此粒子為「電子」。雖然克魯克斯和其他幾個人先證實了帶電粒子的存在，但湯木生是證實出最小單位的人，因此湯木生便成為了歷史上第一位發現電子的人。到了19世紀末，藉由湯木生的發現，人們開始理解到電流的來源即是電子。

另一方面，在1897年以克魯克斯的實驗結果為基礎，德國的布朗也發明出了「布朗管(映像管)」。近期電視已漸漸被液晶或電漿螢幕的薄型電視所取代，但在這之前布朗管(映像管)一直是電視界的主流。概念與蓋斯勒管及克魯克斯管的原理相同，是藉由在陰極和陽極間施加高電壓，並利用電磁鐵讓陰極跳出來的電子產生磁偏轉的方式。這個方式曾是電視界裡稱霸一方的主流顯影技術。

## 半導體的崛起

在19世紀初，本專欄的主題半導體開始萌芽。談到半導體也必須從法拉第開始說起。法拉第除了發現磁生電的方法及無線電通訊的原理(電磁場的發生)之外，也是他發現了具有半導體特性的物質。在化學的領域也十分活躍的他，是一位研究範圍廣大的科學家。

法拉第在1839年時發現了物質的半導體特性。這個發現被認為是半導體的起源，並證實了用燈光加熱會使硫化銀  $\text{Ag}_2\text{S}$  的電極間的傳導性增加，冷卻之後則會有相反的效果。 $\text{Ag}_2\text{S}$  在高溫的狀態下與金屬有著相同的導電性，低溫時則電阻變高。通常一般金屬的電阻與溫度成正比，而相較之下便可發現  $\text{Ag}_2\text{S}$  具有一般金屬所沒有的特性。這就是第一次發現今日所使用

的半導體性質的關鍵時刻。法拉第說道：「據我所知，這樣的物質尚未被開發，繼續搜索的話一定還能發現更多！」。

接著在進入 1870 年代之後，半導體相關的諸多現象也被確認出來。1873 年英國的史密斯發現了光電效應。並發現若對半導體-硒 Se 進行光照將使其電阻降低。

接著隔一年的 1874 年，英國的舒斯特最早提出接觸氧化亞銅的面會產生整流作用。舒斯特發現若在生鏽的銅與未生鏽的銅的接觸面上通電的話，一邊會通電而另一邊不會，這也是首次發現在金屬接觸面上的整流特性。

而在同一年，德國的布朗，布朗管(又稱映像管)的發明者，提出了接觸點整流概念的原型，並發現在金屬與半導體接觸面的整流特性。這即是晶體整流器的起源。讓金屬針(晶須)接觸方鉛礦，從而確認了整流作用。從早期的 1920 年代以來，舒斯特所發明的面接觸型整流器原理被使用在硒整流器及氧化亞銅整流器上，且被大量使用於工業用途上；而布朗所發現的點接觸型整流器則是用在晶體整流器上，並在無線電通信上被廣為使用。晶體整流器因使用細針所以接觸面積小，使其對於小容量的微弱電波具有高敏感度，它的優勢是可以接收無線電及廣播的電波，並盡可能地將各種聲音的震動擷取出來。不過在二極體檢波器及三極體真空管出現後，晶體整流器就暫時消失了。真空管比較安定所以有量產的可能，而且也可大幅增加信號的接收，基於以上優點，真空管在廣播的收發信號上使用起來較為簡單。而晶體整流器再次受到注目時是第二次世界大戰的前夕。在這個時期雷達剛問世，為了讓雷達接收信號的敏感度增加，晶體整流器又再次浮出檯面。然後在為了使晶體整流器的性能提升等的過程中，並在偶然之下發明出了電晶體。針對這個過程，會在後續的文章中介紹。

以上所提到關於半導體的傳導性中特有的溫度依存性、光(生)伏(打)光電效應及整流特性等半導體特有的現象都是在 19 世紀被發現的，而整流特性等等的在還未了解發生的原理之前便已被使用在工業上。半導體在 19 世紀萌芽，而這些發現都要歸功於 19 世紀時誕生並發展成熟

的電力技術。下一個世紀—20 世紀，半導體的技術將不只停留在學術討論，而是朝著實用方面邁開步伐。

---