

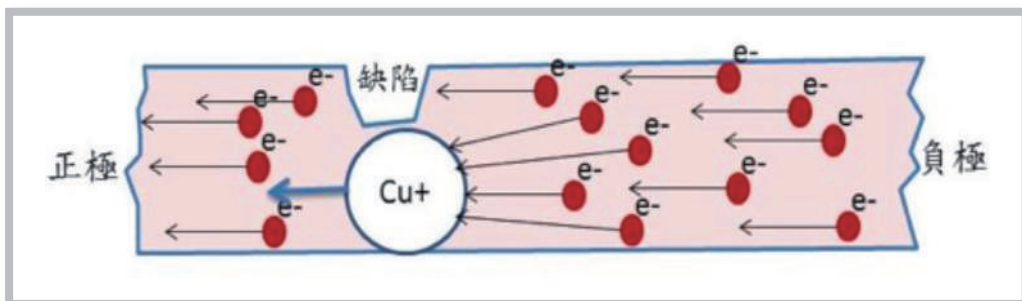
電遷移

文・圖／吳誠文

「你這是什麼怪題目？」

我想你睡覺前躺在床上隨便翻翻這本雙月刊應該料準了我不會無聊到要談積體電路（IC）設計的理論這種生硬無趣的東西，是吧？但是，如果真是這樣的話，我倒覺得我非得談談與這30年來我賴以糊口的IC設計有關的東西不可，原因之一是你既然是一個有閑情逸致閱讀本刊的讀者，你年紀多半也不小了，常有失眠的毛病也是正常的（根據地下電台賣藥節目長年提供的訊息以及本人的人生歷練）；我想我號稱有樂於排難解紛的個性，多少要幫忙解決一點你的困擾，也就是要讓你睡。原因之二是當你覺得我不會這樣白目時，奇怪我就是很想這樣。聽我一個主修寵物心理學副修人生哲理資訊學的「半句多」朋友義正辭嚴的說過，我這是典型的攻擊性叛逆心理修正後的急公好義的個性（請不要隨便讀過去，是急公好義，不是幸災樂禍），所以你現在不得不看這篇助眠的文章，想阻擋我也來不及了（但是千萬不要寫信來抱怨，我也是因為睡不着才會這樣的啊！）。

看你眼睛睜得大大的，那我不客氣，就開始了。我們從事積體電路（IC）設計的人都知道在設計IC線路的時候要注意一種現象叫作「電遷移」（Electromigration），簡單地說，當一條金屬導線（就是電線啦）某部分的電流密度過大時，速度快而數量龐大的電子群敲打導線中結構不實的金屬原子，力量遠大於電場的作用力時，會使它們沿著電子流動的方向遷移，金屬原子流失的地方導線因此會變得更細，於是電流密度更大，遷移效應加劇，形成惡性循環，時間一久缺陷處就變成斷線（就是電流不通），而遷走的金屬原子在其他地方聚集後又可能造成短路（秀逗，就是阿達阿達），整個線路就壞掉了。電流密度指的是導線中的電流量（就是每秒通過的電量）除以導線的截面積，在下圖中導線的電流是固定的，所以缺陷處的電流密度比其他地方大（就像河流狹窄處水流速度比較快一樣）。電



速度快而數量龐大的電子群敲打導線中的銅原子（帶正電的Cu⁺，故意畫很大一顆），會使它們沿著電子流動的方向遷移。

流密度過大有可能是因為設計不良，也有可能是製程問題、光罩問題、材料問題，或其他原因（像是你對老闆不滿而懷恨在心或你的乾同學吵著要跟你一起唸EMBA而思緒紛亂等人為因素）造成的缺陷或錯誤。不過即使是設計、製程、光罩、材料等都正常，只要有電流（是啊！連你也知道關掉電流的話，線路就不能工作啦，那叫因噎廢食），電子群敲打的力量就會存在，只是它小於電場的作用力與其他反向力量的總和而已，所以足以讓電路在預期壽命內正常工作。

「噠！你還能再撐下去嗎？」我看你眼睛有一點眯了。

「少廢話，我還在看，這很有趣。」你開始言不由衷了，雖然還沒語無倫次。

「所以你確實還不想睡，這樣實在讓我顏面無光。」雖然我這樣說，其實正中我下懷，我也還不想睡呢。

當然上面講的固態金屬遷移理論是一個物理現象的簡單模型，這樣一個模型也可以套用到其他的系統上。譬如說，我們可以把一個公司想像成一條導線，我們每個員工都是裡面的金屬原子，而工作像電流。老闆希望我們公司有最大的工作效率（就是每個人每天完成的工作量），所以導線不能太粗（人不能太多是也），但是工作做越多越好，也就是電流密度越大越好，只是不要大到造成過度的遷移（員工跑掉或掛掉）而斷路（公司停擺）或短路（員工投奔或私通敵營）。前面提到的避免設計、製程、光罩、材料等問題發生的手段現在可能變成公司要有好的管理制度、好的工作環境、有意義的工作規劃、適當的人才培育機制等。

「饒了我吧！我要睡著了。」你終於求饒了。

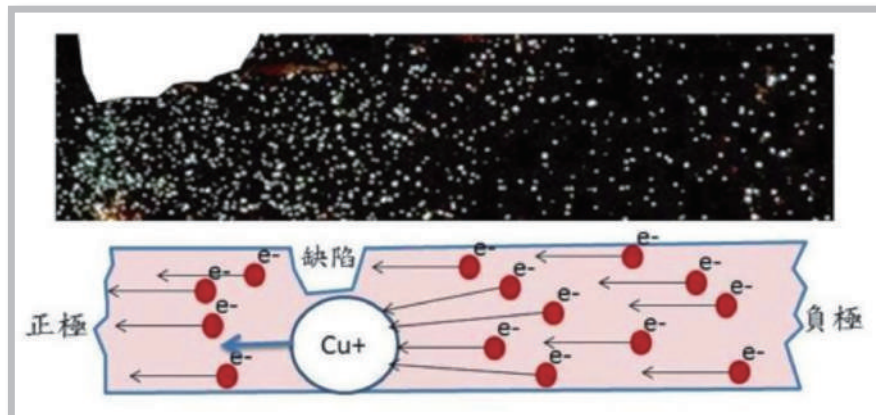
「你不是想睡又睡不著嗎？」

「我還想要看。」你語無倫次了。

既然語無倫次的粉絲這樣要求，那我就繼續談這嚴肅的遷移的問題。

下圖是一個想像的對照。不管它是2014年4月10日晚上臺北市濟南路上的手機海形成的光點，還是浩瀚銀河裡的星海形成的光點，加上時間軸以後它們就像是導線裡的電子，永遠向著電場的反方向移

動（這莫非是人生哲理資訊學的定律）。當它們以極大的動能敲打導線中的銅原子時，是可能會使它們沿著電子流動的方向遷移，它們的集體力量因此可以造成系統的改變，當然條件是電流密度要夠



不管是4月10日晚上的濟南路的手機海形成的光點還是浩瀚銀河中的星海，加上時間軸以後它們就像是導線裡的電子，它們的集體力量可以造成原子的遷移與系統的改變。

大。只是，電流密度是誰決定或控制的呢？在這裡的話，避免設計、製程、光罩、材料等問題發生的手段又是什麼呢？水能載舟，也能覆舟，電子們亦復如是。

「欸，你竟然真的睡著了，我數學式子都還沒有講呢。」希望你明天會把剩下的這一段看完。

我最後想要講的數學式子是鼎鼎大名的歐姆定律，也就是 $V = I \times R$ （電壓=電流 $\times$ 電阻）。根據這個定律，如果同一條導線電阻是固定的，那電壓跟電流就成正比，亦即電壓越大電流（或電流密度）就越大。也就是說，要避免產生遷移的狀況，除了設法防止系統本身的設計與製作可能發生的問題外，最重要的是電壓的操作不能反其道而行。如果歷史是一條金屬導線，由無數過去已消逝的、目前進行中的、以及未來會出現的事件所組成，而人就像是金屬導線裡的電子，不斷的出現與消逝，並且在導線裡快速的移動，那事件的遷移是不是也會因為電流密度的增加而發生呢？事件遷移所引發的連鎖反應是不是會改變系統呢？

因為電流密度對電遷移的決定性影響力，掌握適當控制電流密度的關鍵因素對於成功設計、製造、與使用IC（或其他可類比的系統）是非常重要的。[圖]



雖然我們總認定美麗的花海是不會移動的，而是人可以移動而穿過花海。但是運動是相對的，人動或花動都一樣，穿過如此高密度的美麗花海，人的心難免會駐足花叢之間，回頭看時也就是隨花遷移而去。



吳誠文小檔案

吳誠文，1971年巨人隊少棒國手，為國家捧回世界少棒冠軍盃。臺南一中畢業後，考進臺大電機系，1981年從臺大電機系畢業，1984年負笈美國深造，1987年取得美國加州大學聖塔芭芭拉校區電機與電腦工程學博士。學成返國任教於清華大學電機系，2000-2003年兼任系主任，2004-2007年擔任電機資訊學院院長。鑽研超大型積體電路設計與測試和半導體記憶體測試，卓然有成，2004年當選IEEE Fellow。2007年借調至工研院主持系統晶片科技中心（STC），2010年將STC整合至資訊與通訊研究所（ICL），並接任所長，2013年獲經濟部國家產業創新獎的最高榮譽，卓越創新研究機構獎。同年獲教育部國家講座主持人榮譽，2014年歸建清華大學擔任副校長。