

靜電放電概論

第一部分—靜電放電 (ESD) 簡介

© 2013，靜電放電協會，紐約州羅馬市

歷史背景沿革

對許多人來說，靜電放電 (ESD) 只是一種行經毛料地毯、滑過汽車座椅，或是觸摸金屬門把時，所感受到的電擊現象，或時。然而幾世紀以來，靜電和 ESD 一直都是嚴重的工業問題。早在 15 世紀時，歐洲和加勒比海地區的軍事要塞就已使用一些靜電控制措施和器材，來防止火藥庫因靜電火花點燃而發生意外。1860 年代，美國造紙廠採用基本的接地裝置、火焰離子化技術，及汽鼓等，以消除紙幅經過乾燥程序後所帶的靜電。任何你可想像得到的商業和工業生產過程，多少都會遇上帶電與放電等相關課題。靜電控制在很多工業領域中都有著舉足輕重的地位，如軍火炸藥，石油化工，醫藥，農業，印刷和平面設計，紡織，噴塗，甚至塑膠製品等。進入電子時代，靜電及靜電放電帶來了新的相關問題。況且，隨著電子器件速度的增快，集成電路也越來越小，它們對 ESD 普遍變得更敏感。這種趨勢可能會加速發生。美國靜電放電防護協會 (ESDA) 於 2010 年 4 月發佈修訂的「靜電放電技術準則」 (*Electrostatic Discharge (ESD) Technology Roadmap*) 中提到：「電子器件從 2010 到 2015 年間及以後，敏感度將會越來越高，各公司應立即監測各種操作處理程序的防靜電能力。」今天，在全球電子化環境中，實際上無論從何種面向來看，ESD 都衝擊著生產力和產品可靠度。

儘管經過三十年來的大量努力，ESD 仍然影響產品良率、製造成本、產品質量，產品可靠度和獲利率。光器件本身的損害，成本可從幾美分的簡單二極體到數千美元複雜的積體電路等。如再考量維修和重工、運輸、勞力和相關開銷等成本，很明顯地，這個問題有著極大的改善空間。今天幾乎所有電子製造企業，約數千家，均開始關注於業界所能接受的基本靜電控制因素。ESDA 已設定各種靜電防護標準，來引導廠商建立基礎靜電消解和控制技術 (見第六部分 - ESD 標準)。任何忽略靜電控制的企業，將不可能有機會成功製造和運送完全無損的電子零件產品。

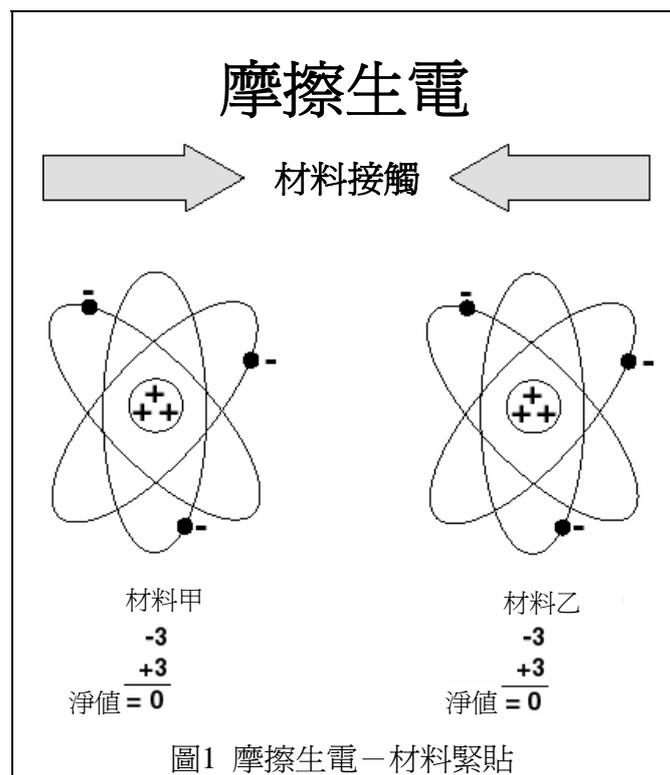
靜電：創造電荷

靜電放電 (ESD) 相關名詞定義可參考 *ESD ADV 1.0 Glossary* (*靜電放電協會專有名詞表*)，亦可自 www.ESDA.org 網站免費下載。**靜電荷**之定義為「處於靜止狀態的電荷」。靜電是材料內部或表面的一種電荷不平衡狀態。這種電子不平衡狀態會形成電場，這種電場可被測出，同時它也會影響其它物體。靜電放電定義為「高靜電場引起靜電荷快速、自發地轉移。注意：一般情況下，不同電位之兩個物體彼此接近時，電荷即由兩者間的火花通過。」

靜電放電可以改變半導體設備的電氣特性，減損或破壞它的效能。靜電放電也可能會影響電子系統的正常運轉，造成設備故障或失靈。帶電物體的表面會吸附並留置污染物，

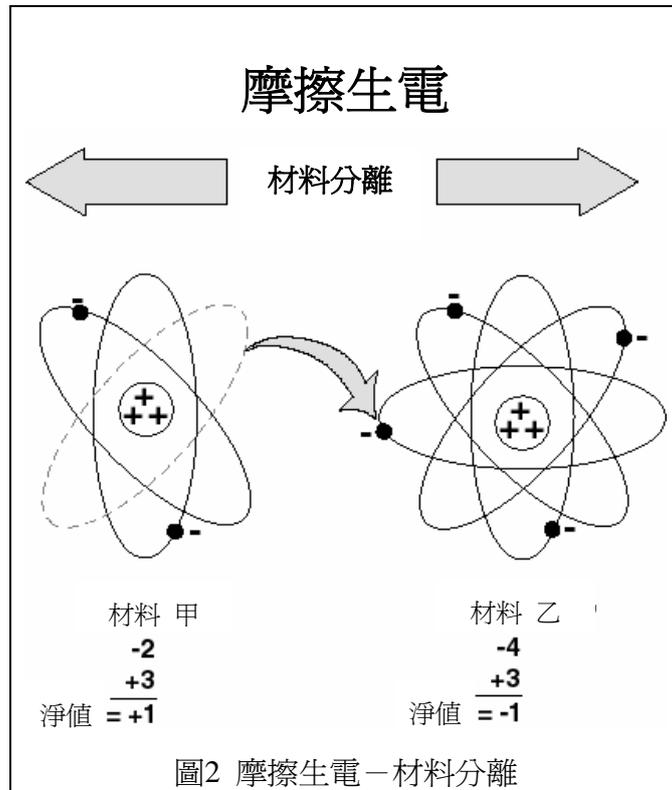
使清除微粒的工作變得困難。空氣中的微粒一旦被吸附至矽晶片或器件的集成電路表面，將引起程度不一的晶片受損情形，進而導致產品良率降低。

為能夠控制靜電放電，應先了解靜電荷一開始是如何產生的。最常見的情況是，兩種材料接觸後再分離，即產生靜電。這兩種材料可以是完全相同或不盡相同的，而不同材料通常會釋放更高層次的靜電。例如，走路時，鞋底與地板的接觸與分離便會產生靜電。將電子器件放入或抽出自提袋、卡匣或管子等，都會產生靜電，因其外殼和金屬引線與容器表面已有多次接觸和分離。這些例子中，儘管靜電荷量大小不一，靜電確已形成。



以材料間的接觸與分離來創造靜電荷，稱為“摩擦生電”。英文「Triboelectric」源自希臘文的單字，「tribo」意為「摩擦」，「elektros」意為「琥珀」（史前樹脂之化石）。摩擦生電涉及材料間的電子傳輸。不帶電的材料，其原子核中的質子（正電）與環繞在原子核外圍的電子（負電）數量相同。在圖 1 中，材料「甲」所包含的原子具有數量相等的質子和電子。材料「乙」所包含的原子亦具有數量相等（也有可能相異）的與質子和電子。兩種材料皆呈電中性。

當兩種材料接觸然後分離，帶負電荷的電子便從其中一種的表面移轉至另一種的表面。何種失去電子、何種獲得，取決於其自然特性。失去電子的材料變成帶正電，得到電子的則帶負電。請參考圖 2 說明。



靜電的測量單位為「庫侖」（coulombs）。一件物體的電荷量「 q 」是由該物體的電容量「 C 」和電壓（ V ）所決定：

$$q = CV$$

雖然如此，通常我們還是會以「電壓」來表示一個物體的靜電位。

兩種材料接觸、電子傳遞和分離的這個過程，實際上比這裡所描述的還要複雜許多。摩擦所產生的電荷量，受材料間接觸面積、分離速度、相對濕度，和化學性質、表面功能性以及其他因素所影響。材料一旦產生電荷，就是「帶靜電」（若電荷仍留在該材料上）。此電荷可從該材料移轉出去，發生靜電放電情形，稱 ESD 事件。其他因素包括實際放電電路的電阻，以及兩個物體間介面上所產生的接觸電阻，都會影響實際釋放的電荷量。表 1 顯示主要幾種靜電產生場景及其電壓位準，從表中可看出濕度會減少電荷量的累積。儘管如此，高相對濕度亦會產生靜電荷。

方式	相對濕度10-25%	相對濕度65-90%
行走在地毯上	35,000V	1,500V
行走塑膠地板	12,000V	250V
在工作檯邊工作	6,000V	100V
從工作檯拿起塑膠袋	20,000V	1,200V
發泡膠椅	18,000V	1,500V

材料上的靜電荷也可經由其他方式創造，例如感應、離子轟擊，或與另一帶電物體接觸，但摩擦生電仍是最常見的方式。

材料特性如何影響靜電荷

摩擦生電系列

當兩種材料接觸後分離，電荷的極性和大小視該材料在摩擦生電序列中所排的順序位置而定。摩擦生電序列表顯示電荷如何在各種材料上產生。材料接觸分離時，序列表中較上位者帶正電，較下位者則帶負電。一般而言，表中所列材料，互相分得越開者所產生的電荷，會較越靠近者來得高。但這些表僅可作為一般指南，因為這裡面仍涉及許多未經良好控制以確保重複性的變數。典型摩擦電系列如表 2 所示。

+ 正電	兔毛 玻璃 雲母 人髮 尼龍 羊毛 毛皮 鉛 絲綢 鋁 紙 棉花 鋼鐵 木
-------------	--

負電 -	琥珀 封蠟 鎳，銅 黃銅，銀 黃金，鉑金 硫 醋酸人造絲 聚酯纖維 賽璐珞 矽 鐵氟龍
---------	---

實際上幾乎所有材料，包括水和空氣中的微塵顆粒，都可摩擦生電。電荷產生量、電荷如何流動，以及流動速度等，都是該種材料在物理、化學和電氣上的功能特性。

絕緣材料

可防止或限制電子流經表面或通過體積之材料，稱為絕緣體。絕緣體都有極高的電阻，故絕緣材料的定義是「具有表面電阻或體積電阻等於或大於 1×10^{11} 歐姆之材料」。絕緣體表面可產生大量電荷。因絕緣材料不允電子流動，正電荷和負電荷可以同時停留在絕緣體表面，但不一定在同樣位置上。呈負電性的位置因電子過剩，或可滿足電子缺乏的另一端（呈正電性）。然因電子無法於絕緣材料之表面隨意流通，故兩種電荷可於位置上停留很長的時間。

導電材料

導電材料因電阻低，故可使電子輕易流經表面或通過體積。依據 **ESD ADV 1.0 Glossary (靜電放電協會專有名詞表)**，導電材料的低電阻為小於 1×10^4 歐姆（表面電阻）和 1×10^4 歐姆（體積電阻）。當導電材料充電時，電荷（電子缺乏或過剩）將均勻分佈在材料表面。若帶電的導電材料與另一導電材料接觸，電子無疑可為兩者共享。若後者連接至交流電設備接地或其它任何接地點，電子多半會流向地面，導體上的過剩電荷即可中和。

與絕緣體一樣，導體的摩擦生電可創造靜電荷。只要導體與其它導體或地面隔離，靜電荷將持續留在導體上。若導體接地，則電荷將很容易流向地面。或是，帶電導體與另一導體接觸，則電荷將於兩導體間流動。

靜電消散材料

具靜電消散性的材料（或稱消電性材料）具有介於絕緣和導電材料間的電阻（ $1 \times 10^4 < 1 \times 10^{11}$ 歐姆，表面或體積電阻）。電子可流經或通過消散材料，但仍由材料的表面電阻或體積電阻所控制。

相較於另兩類材料，靜電消散材料亦可藉摩擦生電的方式產生電荷。然而，就像導電材料，靜電消散材料允許電荷移轉至地面或其它導電物體。一般而言，在相等大小下，靜

電消散材料的電荷移轉，比導電材料需要更長的時間。靜電消散材料的電荷移轉也明顯比絕緣材料快速，但比導電材料慢。

靜電場

帶電材料亦有靜電場及其所屬力線。進入此電場附近的導電物體會被極化，稱為「感應現象」（如圖 1）。處於該電場中的導電物體，其表面電子將受負電場所排斥。正電場會把電子吸至其表面，使其他區域呈現正電性。在極化過程中，導電物體的實際電荷並無改變。然而，若該物體為導電性或消散性，並在極化過程中接地，因電荷呈現不平衡狀態，電荷將自地面流入或流出至地面。若靜電場被移除，且不接地，電荷將留在該物體上。若不導電物體進入電場，電偶極子將會與電場排列，形成相對表面電荷。非導體（絕緣材料）無法藉由感應現象來達到充電目的。

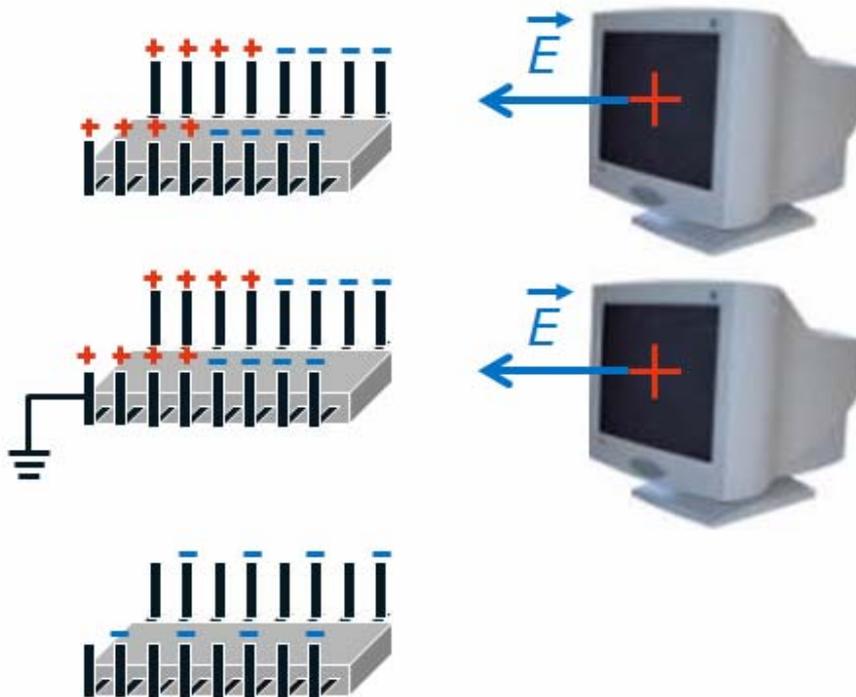


圖1：感應現象

ESD 損害－器件如何發生故障

靜電損害的定義是：「某物體因靜電放電導致不能滿足一個或多個特定參數而產生的變化。」這種狀況從生產製造到現場服務的任一節點都可能發生。損害發生通常是因為在未進行防護控制的環境中操作某種敏感器件，或採用了較低階的 ESD 損害防治規範。損害一般可分為「破壞性故障」或「潛伏性缺失」兩種。

破壞性故障

當電子器件遭逢 ESD 事件，它可能會永久失效，起因是金屬熔化、接頭斷裂，或氧化故障等。該器件因電路遭永久性破壞，導致完全無法作用，或僅能部分作用。通常這種型態的故障在該器件出貨前的測試中可檢出。若測試後發生破壞性等級的 ESD 事件，零件或可繼續投入生產，而損害則須俟該器件最後檢驗不合格時才能被檢出。

潛伏性缺失

依據 *ESD ADV 1.0 Glossary (靜電放電協會專有名詞表)*，「潛伏性缺失」的定義是：「經過一段正常運轉期後發生的故障。此種故障可歸因於早期的靜電放電事件。潛伏性缺失的概念備受爭議，並不完全被所有的科技產業接受。」潛伏性缺失是難以辨識出來的。發生 ESD 事件的器件可先局部排除後再繼續執行其設定的功能。然而，該器件的使用壽命可能會變短。一項產品或系統的構成器件若具潛伏性缺失，經使用者開封使用後可能出現過早故障的情形。這種故障通常需花昂貴的修理費用，在某些情況下還可能對使用者造成傷害。

適當的儀器能有助確認一項器件是否曾有災難性故障情形。基本的性能表現測試可具體證明器件曾受損。然以現有科技，潛在性缺失極難證明或檢出，尤其是當該器件已組裝成爲最終產品後。

基本 ESD 事件——電子器件故障成因爲何？

ESD 損害通常由以下三種發生情形之一所引起：直接對器件發生靜電放電、器件本身發生靜電放電，或是電場感應放電。ESD 損害是否會發生在靜電放電敏感物體 (ESDS) 上，取決於其放電能量消散力，或其耐受電壓位準。器件受損程度決定於其 ESD 敏感度。

放電至器件

當帶電導體 (包括人體) 放電至另一物體，便發生 ESD 事件。靜電損害的最主要原因是人體或帶電材料將靜電荷直接移轉至靜電放電敏感物體 (ESDS) 上。在地板上行走時，身體便開始累積靜電荷。手指輕觸 (或靠近) ESDS 或組件的引線時 (通常爲不同電位)，身體便會放電，極可能造成靜電放電損害。此種損害模式稱爲「人體模型」(HBM)。放電也可發生在帶電的導電物體上，例如金屬工具或配件。此種事件就其放電性質，稱爲「機器模型」(MM)。

從器件放電

電荷從 ESDS 移轉至導體也是一種 ESD 事件。處理封裝材料、工作表面，或機器表面時，或與其接觸後分離，靜電荷即可累積在 ESDS 本身。這情形經常發生於器件在某個平面上移動或在包裝內振動時。電荷從 ESDS 上移轉稱爲「帶電器件模型」(CDM)。其所牽涉的電容、能量和電流波形，完全不同於放電至 ESD 敏感物體之情形，當然也就產生不同的故障模型。

自動化組裝趨勢似可解決 HBM ESD 事件所造成的問題。事實上，由自動化設備來進行組裝，部分零組件可能對損害更爲敏感。舉例來說，某件器件從饋線滑下時可能已帶電，若它接著與工作頭或任何其它導電表面接觸，便會立即放電到該金屬物上。

電場感應放電

另一種直接或間接破壞器件的靜電帶電過程稱為「電場感應」。如前所述，任何物體經靜電帶電後，電荷便建立了靜電場。若將 ESDS 放置於靜電場，電荷便感應至該物體上。若該物體接著在靜電場範圍內接地，電荷便被移出，發生「CDM 事件」。若該物體離開靜電場範圍並重新接地，就會發生第二次的 CDM 事件，因為此時的電荷（與第一次的極性相反）亦被移出。

ESD 的防護規模為何？

ESDS 因 ESD 事件引致的受損程度，取決於其放電能量消散能力或耐受電壓位準，如前所述，這些因素進而決定零件的 ESD 敏感度。依各 ESD 事件模型進行測試有助於瞭解零組件的 ESD 敏感度。儘管測試過程中的放電與真實世界的 ESD 事件，兩者間並沒有直接關連性，惟確認了電子組件的 ESD 敏感度後，就可對 ESD 的防護規模提供適當指引。有關這些測試流程，本系列第五部分有更詳細的說明。

ESD 耐受電壓之定義：「不會引起器件故障的最高電壓位準；器件可通過所有低電壓測試」。在相對較低的電壓位準下，許多電子組件都對 ESD 損害敏感或易感，不少是在低於 100 伏特時便敏感，一些磁碟機零組件的耐受電壓更低於 10 伏特。目前的產品開發設計，趨向將更多的集成電路植入微型器件，進一步提高其 ESD 敏感度，使潛在問題變得更為嚴重。表 3 為各類組件的 ESD 敏感度。

表3 代表性電子器件的ESD敏感度 器件或零件對人體模型（HBM）與帶電器件模型（CDM*）的敏感度
器件或零件類型
微波設備（肖特基勢壘二極體，點接觸二極體，以及其他 > 1 千兆赫的檢波二極體）
分離式金屬氧化物半導體場效應電晶體設備
表面聲波（SAW）設備
結面場效應晶體管（JFETs）
電荷耦合設備（CCDs）
精密穩壓二極體（負載電壓調節線，<0.5%）
運算放大器（OP AMPs）
薄膜電阻
集體電路
巨磁阻效應（GMR）和新科技的磁碟機讀取頭
雷射二極體
混合動力車
特高速集體電路（VHSIC）
矽控整流器（SCRs），輸出電流 < 0.175 安培，環境溫度 10°C
*特定敏感度可查閱供應商數據表

總結

在「**靜電放電 (ESD) 簡介**」部分，我們討論了靜電帶電和放電、創造電荷的機制、各種材料、ESD 損害類型、各種 ESD 事件，以及 ESD 敏感度等。以下為本部分結論：

1. 幾乎所有材料，包括各種導體，均可摩擦生電。
2. 電荷量受材料類型、接觸和分離的速度、濕度，以及其它因素所影響。
3. 帶電物體具有靜電場。
4. 靜電放電會造成器件損害，並使參數立即失效；ESD損害亦可能只造成不利於檢測時發現的潛伏性缺失，也可能會導致器件過早發生故障。
5. 靜電放電可能會發生在整個製造、測試、運送、裝卸、及操作等過程中，甚或是發生於投入現場服務的作業期間。
6. ESD損害也可能是對器件放電、從器件放電，抑或是靜電場電荷移轉等情形所造成的結果。各種器件的ESD敏感度均不同。

為保護產品不受 ESD 損害，應先瞭解靜電帶電和放電的基本概念。有效的 ESD 控制方案端賴有效的培訓方案，所有參與人員均需具備關鍵性的基礎觀念。有關 ESD 控制的基本概念見第二部分。

參考書目

- *ESD-ADV 1.0, Glossary (靜電放電協會專有名詞表)*, ESD Association, Rome NY.
- *ESD TR20.20, Handbook (靜電放電手冊)*, ESD Association, Rome, NY.
- *ESD ADV 11.2, Triboelectric Charge Accumulation Testing (摩擦生電累積測試)*, ESD Association, Rome, NY.
- *ANSI/ESD S20.20—Standard for the Development of Electrostatic Discharge Control Program (靜電放電控制方案建立標準)*, ESD Association, Rome, NY.