

原子能於半導體應用

林玉祥 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 奈米光子及奈米電子實驗室

廖培凱 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 奈米光子及奈米電子實驗室

李佳翰* 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

*通訊作者

前言

到今天為止，半導體的發展已經超過了六十年，世界各國相爭投入在半導體產業上，台灣也擠身其中。根據市場研調機構 IC Insights 在去年發佈的「2019 年半導體公司營業額及成長率預測報告」[1]，全球營業額前五名的半導體公司中，美國佔了六間、歐洲地區有三間，而台灣、日本及南韓各有兩間。台灣在半導體產業的產業鏈，從上游的 IC 設計、中游的 IC 製造與下游 IC 封測，都有完整的供應鏈，專業分工在全球獨樹一幟，去年 IC 產業總產值更是超過 2.6 兆元新台幣 [2]，佔了台灣國內生產毛額 (GDP) 的 13.8%。

原子能在民生科技的應用非常廣泛，如前瞻微影技術、X 光微影技術之運用、電漿技術之輔助運用、離子佈植技術、半導體材料合成…等，諸多先端的技術皆與原子能有著極大的關係。礙於筆者才疏學淺，無法面面俱到，因此本文將會著重在幾項原子能在半導體產業中的應用。首先是目前在半導體產業至關重要的 EUV 微影製程，回顧發展 EUV 光源的起源，並盤點 EUV 應用方向、相關設備與零組件，接著回顧與解析原子能運用於生醫設備與晶片製程的現況，最後對晶

片未來會面臨的問題（如輻射防範等議題）做討論與解析，以便因應未來相關產業的迅速發展。

一、 紫外光微影技術發展

Intel 創辦人 Gordon Moore 在 1965 年發表在半導體領域中著名的摩爾定律，主要預測是：「積體電路上可容納的電晶體數目，約每隔幾年便會增加一倍。」[3]，摩爾定律推動半導體的技術創新主要根基於製程及微影技術的進步。微影技術就像是一般的照相，照相是使用太陽光（主要為波長為 390nm 到 770nm 的可見光區）照明景物，利用照相機成像產生照片；微影技術則是使用紫外光（波長為 10nm 到 400nm）當照明光源，利用晶圓曝光系統在矽晶片上產生「差異蝕刻」：半導體基板上被光照射的區域會發生化學變化，使其化學成分或是硬度和其他部分不同。在蝕刻的過程，硬度低的區域將消失，硬度高的區域將留下，透過這樣的過程，就能將光罩上的電路圖形轉印到半導體材料上，製成積體電路。過去，只要將光罩的尺寸縮小，就能不斷地縮小積體電路。

從 1982 年開始，IBM 首先將準分子雷射技術應用在半導體光刻工藝中，微影製程開始利用 KrF 氣體雷射（波長 248nm）製作深次微米線路，再發展到目前的 ArF 氣體雷射（波長 193nm）的奈米製程技術，微影技術的進步使得摩爾定律的預言實現。但是當電路尺寸小於半個光波波長時，光波就會發生繞射現象。儘管使用再小的光罩，但是產生的電路圖形並不會再縮小，而

是停滯在大約半個光波波長的大小。這個困難發生在 2000 年初期，使用的光源是波長 193nm 的 ArF 雷射。科學家和工程師絞盡腦汁地想要突破這個物理極限，包含使用浸潤式蝕刻和多重曝光等方法，達到了 7nm 製程。然而，想要繼續再微縮，各種巧妙的工程技術似乎都一籌莫展，最終半導體製程還是要走向更短波長的光源。

新的光源必須遠圖長慮，不能只解決現在的問題，更要能用在未來幾十年的半導體製程，因此，半導體界決定從原本波長 193 奈米的「深度紫外光 (deep ultraviolet, DUV)」轉到波長僅有 13.5 奈米的「極端紫外光 (extreme ultraviolet, EUV)」。EUV 光有兩種常見的產生方式：高能電漿和同步輻射光源。

高能電漿是由雷射光束產生極短波長的發光電漿，電漿要如何形成呢？首先讓錫液滴滴入真空室，使用 CO₂ 脈衝式高功率雷射器以每秒 50,000 次擊中這些迅速的錫滴，錫原子會被電離並產生高強度的電漿，再用收集鏡捕獲電漿向所有方向發出的 EUV 輻射，透過一連串的反射鏡聚焦後最終轉移至光刻系統以曝光晶圓。

「同步輻射光源」是「同步加速器光源設施」，或稱「同步光源」，乃外觀為環形之粒子加速器，如下圖 1 所示。電子束以接近光速的速度於環型加速器中繞轉從而產生高亮度的光束，其波長範圍涵蓋硬 X 光、軟 X 光、紫外線與紅外線，已廣泛應用於探討各學科領域中不同物質的特性與應用科學研

究。



圖 1. 國家同步輻射研究中心[4]

基於生產率的考量，雖然商用 EUV 量產設備仍採用大功率的電漿光源，然而歐美日韓同時使用同步輻射光源 (SR EUV) 進行研究，主要原因包括：

- (1) 同步輻射光源頻寬遠小於電漿光源，適合進行研究分析與光學性質量測。
- (2) 相對於電漿光源產生的碎屑，同步輻射光源是潔淨的光源，能提供可靠穩定的分析結果。
- (3) 同步輻射光源提供同調性較好的光源，適合進行干涉微影應用與研究。

二、 EUV 設備發展

ArF (193nm)微影製程已經逼近它的物理極限，繼續使用此光源將會使得微縮技術的困難度、研發及製作成本大幅提升，在未來的發展上可說是日暮途窮。因此，波長 13.5nm 的 EUV 微影技術應運而生，將成為未來 7 奈米以下製程技術的主流，荷蘭 ASML 公司已獲得 EUV 微影製程技術的領先地位。美國 Intel 率先投資 ASML 公司 41 億美元進行 EUV 晶圓步進曝光系統研發，

台積電也跟進砸下 8.38 億歐元投資 ASML，三星電子也跟進投資 5.03 億歐元 [5]，可見未來 7 奈米以下的微影製程技術相當重要。

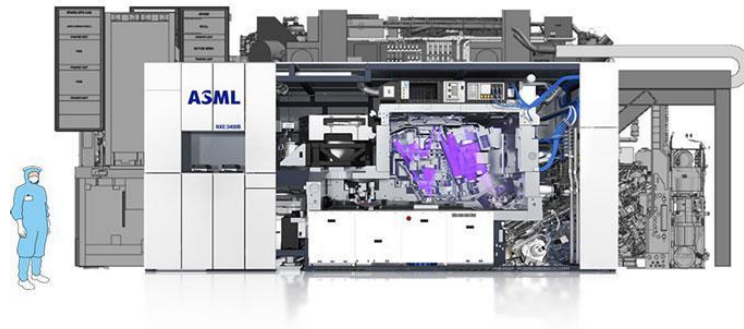


圖 2.ASML EUV lithography [6]

各大半導體公司相繼投資如此龐大的資金在於研發，可預見未來奈米半導體製程技術仍是艱難險阻，有很多問題需要去克服和突破，但這也表示了新技術的商機是無窮的。在台灣，台積電長期靠著製程的領先，在世界半導體製造商排行名列前茅，但是台灣的半導體產業還有一個重要的環節沒有解決，那就是設備。長期以來，半導體先進製程的設備都被少數的大廠給壟斷，諸如光刻機龍頭 ASML 佔據 75.3%份額；物理氣相沉積 (physical vapor deposition, PVD) 設備龍頭 AMAT 佔據 84.9%份額；刻蝕機主要是 LAM 佔據 52.7%份額[7]。這也透露了一件事，台灣的設備廠為了更先進的技術更新設備，為了佔有更大的市場份額而進行投資的同時，亦會將預算資金外流至外國的設備廠商，造成台灣國內難以達成產業成長綜效。

目前，半導體設備與零組件被美國、日本、荷蘭等三個國家掌握在手上

的有超過 75%，而且韓國與中國大陸的政府與半導體業者也正全力地追趕與美、日、荷之間的差距，一旦韓國與中國大陸這兩個國家掌握了某些半導體關鍵製程設備與零組件時，台灣是否還能夠保持目前在半導體產業的優勢呢？因此，筆者認為，台灣應該盡全力投入半導體設備與零組件的研發與生產，尤其是在與 EUV 光刻機息息相關的設備或材料，包含光阻劑、反射式光罩、EUV 波段的多層膜反射鏡...等。在前面提到的 EUV 微影製程中，多層膜反射鏡在 EUV 微影技術當中佔據非常重要的角色。EUV 為一種近似於軟 X 射線的光源，會被空氣、石英玻璃及光罩保護膜等強烈吸收，故必須將光阻曝光於真空中，使用反射式鏡片及反射式光罩，由於無法使用光罩保護膜，對於量產機台的潔淨度控制是一大挑戰。又為了因應 EUV 機台的光路設計，EUV 光須經過多次反射，然而每經過一次反射，光強度都會隨之降低，再加上 EUV 微影相較於傳統微影光源的功率還要大，因此設計出對 EUV 光具有高反射率的反射鏡顯得格外重要。

受到中美貿易戰及全球疫情的影響，不僅導致資通訊供應鏈轉移，也影響全球半導體產業的佈局，更為台灣以及其他國家帶來轉單效應，雖然台灣半導體產業現況一片榮景，但筆者仍期望台灣半導體產業能夠居安思危，可以設法提高相關設備與零組件的自給率，讓台灣在世界的半導體優勢得以維持，甚至進一步擴大，在國際上持續佔有一席之地。

三、 生醫設備發展

倫琴 (Röntgen) 於 1895 年年底發現 X 射線[8]，開啟了原子能科學研究歷史的新紀元。可以毫不誇張地說，若沒有發現 X 射線，我們幾乎無法了解原子的內部結構，因為 X 射線提供了原子游離的能量，使我們更容易觀察到原子內部的情形。X 射線極具穿透力，可以穿透未知的結構層，不用將結構層分解仍可以得知內部的情形，利用 X 射線這樣的特性，可對人體做各種診斷與檢查，包含：觀察人類的骨骼骨折和韌帶撕裂情形、發現女性乳腺癌、發現蛀牙和受影響的智齒等，諸多例子不勝枚舉。

其中市面上更是有廠商利用 X 射線的這種特性製作運用於生醫方面的感測器，以群創旗下的睿生光電為例，於今年十月在台灣醫療科技展上發布了最新可撓式 X 光感測器如圖 3. 所示。



圖 3. Flexible X-ray Sensor [9]

其特殊的製程可直接將材料輸入到機器，便會開始自動加工成產品，有別於以往採用玻璃基板的感測器，新型的可撓式 X 射線感測器採用聚醯亞胺 (Polyimide) 為基底製作成產品，其可彎曲的特性可使 X 射線在拍攝病患的過

程更加的順利。利用氧化銦鎵鋅 (Indium Gallium Zinc Oxide, IGZO) 的技術[10]可提高面板解析度又同時降低成本，其次是把 2D 圖像轉換到 3D 並結合了 AI 的技術[11]，使原本靜態的影線變成動態的即時影像，最後是運用 X 射線單能到雙能配合上影像處理的技術，使這些圖像可以達到「骨肉分離」的樣子[12]，以利醫生做更精細的診斷與判定，甚至可以預先推斷接下來可能發生病症的部位，使病人可以獲得早期的治療。

四、 抗輻射裝置

單事件效應(single effect events, SEEs) 是由單個高能粒子引起的奇異現象[13]，如電路故障或數位邏輯錯誤等，如圖 4.所示。

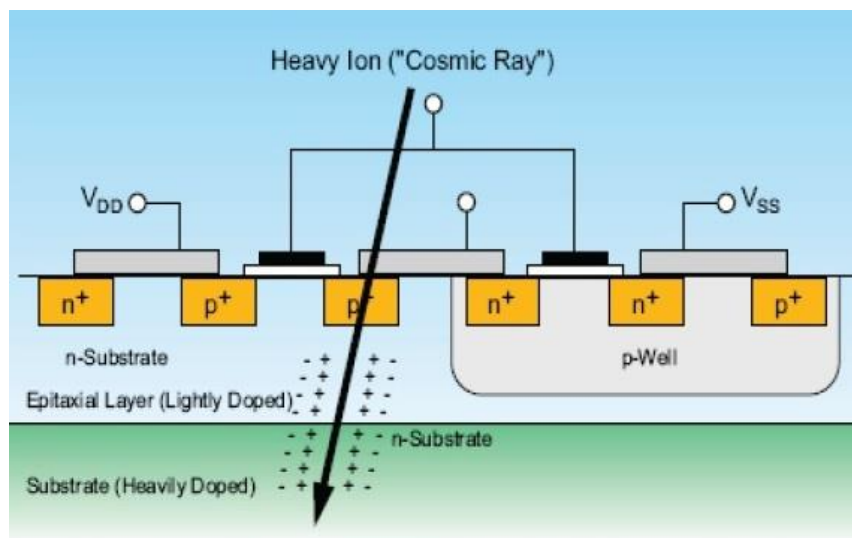


圖 4.高能粒子穿透電路板之示意圖[14]

其中 SEEs 又大致分為以下幾種情形：其一，單事件翻轉(single effect upset, SEU) 或單事件暫態現象 (single event transient, SET) 是可修正的錯誤，它們通常在電路中顯示為一個瞬間脈衝，或在儲存的邏輯位元中顯示為位元翻轉

(例如：原本是 0 變成 1)，因為他是非破壞性的，所以可利用電路本身的設計，比如自動偵錯的功能，將其修正回來。其二，單事件閃鎖(single event latch-up, SEL)，這種現象會導致極高的電流暴衝，其程度遠高於元件能承受的範圍，必須將電源復歸成原始狀態才可將其消除，嚴重的話可能造成晶片的燒壞、P/N 閘極被破壞、CCD 中大量的雜訊...等，各種嚴重至無法復元的現象。由其在太空環境中，航空太空設計者必須特別注意單事件效應 (SEEs)，其主要造成的原因有兩個：太空中的宇宙射線與高能質子。對於宇宙射線，SEEs 通常是由其重離子所造成的，這些重離子會直接電離造成 SEEs，如果貫穿設備的離子或粒子累積了足夠的電荷，則可能會發生如邏輯位元翻轉或的事件。再來是高能粒子，通常來源為輻射源或太陽耀斑，可能會在非常敏感的電子設備中 (如高速的積體電路或密集的 SRAM) 引起電離造成 SEEs [15]。

隨著設備被要求降低損耗功率、重量、體積和成本...等，同時又需要增強功能，新興的製程技術已經走在最前端 (通常易受 SEEs 的影響)，這些製程技術包括高速 CMOS 和通訊光纖，利用這些製程技術製作的積體電路 (IC) 的類型從複雜的微處理器到密集的 SRAM，必須對所有設備進行 SEEs 測試，才能確保最後的產品不會被這種效應影響！目前設計的結構必須要至少能夠承受 SET 與 SEU 這類可修正的現象，它應該至少執行三到四次 SEEs 的檢驗，比如對電子設備照射輻射線或者是特定的雷射來等效模擬輻射，並從其中進行採樣與分析，最後對電子設備進行修改，以消除所有可能的 SET 或 SEU。

目前消除 SEEs 的方法大致上分為兩種：其一，如同上面所提到的，是直接對內部電路設計自動偵錯的機制[16]，可以直接消除 SET 或 SEU 這類暫態性的影響；其二，由於可能有更嚴重的 SEL 會發生，因此必須直接改變電子元件的結構，或者是對電子設備進行屏蔽輻射或高能粒子的裝置，使其完全不會受到 SEEs 的影響，目前有已知有效的結構有 Enclosed N-MOS、Ringed-Source N-MOS、GaAs...等，皆可由台積電 (TSMC) T-18 製程進行製作。但並不是完全屏蔽掉就會是最好的設計，因為這種設計會大大的影響電路的效能，使電子元件的功率或速度受到不良的影響，因此必須在上述的兩種方法中取得一個平衡點，使電子設備不會受到太多 SEEs 的影響，也不會使效能大打折扣，其中的取捨點可謂是對 IC 或各類晶片設計者的一大挑戰！

另外，目前台灣的法規還沒有對相關的設計做規範，大部分都是參考國外大廠的設計方式，筆者期許台灣能夠在未來訂定出相關的法規或標準的流程，以利我國半導體產業的發展。在接下來的科技進展中要進入 5G、6G 或更高階的通訊時代，這些技術須要覆蓋性更廣的人造衛星，也意味著將來會有更多電子設備進入外太空，會直接曝露在大量的宇宙射線與高能粒子，假設沒有一定的保護措施與規範，許多電子設備便會受到直接的 SEEs 傷害，使通訊或各種技術異常，會大大的影響我們便捷的生活，因此這個領域千萬不可以被忽視，台灣的法規必須趕緊跟上科技的洪流，才能使我國的半導體產業繼續在全世界佔有不可取代的地位。

總合以上一到四小節的說明，可見得原子能在半導體相關產業佔據了舉足輕重的地位。比如在半導體製程的演進，若沒有原子能的知識為基底，很多的技術（尤其在 EUV 微影製程）幾乎不可能有如此飛速的進展。生醫設備與晶片的發展發展亦是，若沒有先人發現 X 射線具穿透力的特性，要在不打開物體的情況下進行研究與診斷根本不可能！人類能夠有目前的醫療技術必須慎重的感恩前人所發現有關原子能的各種知識。對晶片的設計與保護也是一門大藝術，要能夠在防護與效能之間取得一定的平衡，所謂的「水能載舟，亦能覆舟」便是如此，原子能既可以用來製造設備，也可能造成設備的損害，因此在接下來的演進中，必須好好觀察與考量這一領域的發展，才能使未來的科技愈加蓬勃發展！

參考文獻

1. Company reports, *IC Insights' Strategic Reviews* database.
2. 中央社 (民 109 年 2 月 15 日)。2019 年全球半導體衰退，台灣 IC 業產值逆勢成長。科技新報。取自：<https://technews.tw/2020/02/15/tsia-taiwan-ic-2019/>
3. 摩爾定律. (2020, November 20). Retrieved from 維基百科,自由的百科全書：<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%91%A9%E5%B0%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B&oldid=62868203>
4. 林宮玄 (2015)。台灣之光「台灣光子源」能幹嘛。泛科學。<https://pansci.asia/archives/80114>
5. 艾司摩爾. (2020, November 22). Retrieved from 維基百科,自由的百科全書：<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%89%BE%E5%8F%B8%E6%9>

1%A9%E7%88%BE&oldid=62894656

6. 圖片來源：<https://www.asml.com/en/news/stories/2020/asml-wins-semi-americas-award-for-euv>
7. 工欲善其事必先利其器，晶片開發、製造的國產「利器」(民 108 年 10 月 30 日)。Retrieved from：<https://kknews.cc/zh-tw/tech/j24m39l.html>
8. Glasser, O. (1993). Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Roentgen rays (No. 1). *Norman Publishing*.
9. 影片截圖：<https://www.facebook.com/Healthcare.Taiwan/videos/1031541190626831>
10. Chiu, C. J., Chang, S. P., & Chang, S. J. (2010). High-Performance a-IGZO Thin-Film Transistor Using Ta₂O₅ Gate Dielectric. *IEEE Electron Device Letters*, 31(11), 1245-1247.
11. Chan, H. P. (2009). Computer-aided diagnosis in breast tomosynthesis and chest CT. *日本放射線技術学会雑誌*, 65(7), 968-976.
12. Kang, H. C., Shin, Y. G., & Lee, J. (2014, June). Automatic segmentation of skin and bone in CT images using iterative thresholding and morphological image processing. In *The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014)* (pp.1-2). IEEE.
13. Normand, E. (1996). Single-event effects in avionics. *IEEE Transactions on nuclear science*, 43(2), 461-474.
14. European Space Agency：https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2012/12/Radiation-driven_Single_Event_Effect
15. Sexton, F. W. (2003). Destructive single-event effects in semiconductor devices and ICs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(3), 603-621.
16. Alfke, P. H. (2000). U.S. Patent No. 6,104,211. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.