

變容器對高速元件保護設計之研究

A Study of protected design of high speed devices with Varactor

田主業

Chu-Yeh Tien

空軍航空技術學院一般學科部航空通訊電子系

Department of Aviation & Communication Electronics

Air Force Institute of Technology

摘要

本研究主要利用變容器電路設計提高相關高速元件靜電突波防護效益。藉由變容器電極形狀設計並與被保護高速元件之電路結合，提升高速元件對靜電突波襲擊下之耐受能力，有改善對於高速元件之保護能力。

關鍵詞：電容、高速元件、靜電突波、耐受力

ABSTRACT

The discussion of electrostatic discharge immunity is important issue for high speed devices to avoid serious charge accumulation problem. A varactor structure by alternating different shapes and sizes, its capacitance value and capacitance conversion ratio are increased, thereby improving the suppression of the rapid surge attacks and also enhance the reliability of these crucial device.

Keywords : capacitance, high speed devices, surge, suppression

一、簡介

在高速電子元件應用中，氮化鎵電子元件因其優異特性而被廣泛應用於軍民用科技中[1]，但隨著機動武器載台、綠能電動載具及移動通訊的需求與積體電路密集化科技的發展，電子元件有愈發精密，朝輕、薄、短、小、低成本且功能強的趨勢發展。然而，在帶給使用者便利的同時，電子元件因微型化的結果使其降低對環境可能入侵的破壞承受能力。根據美國ESD協會對電子產品損壞原因的統計表示，大約有27~33%的原因是由突波所引起的

[2]。靜電放電是造成大多數的電子元件或電子系統受到過電壓應力(Electrical Overstress, EOS)破壞的主要因素。當產品受到靜電傷害時，輕則當機，需重新開機；嚴重的話，甚至可能對元件造成永久性的傷害，導致效能降低或者元件嚴重損毀而無法使用。另外，如輸入電源不穩所產生之突波進襲現象、人體或機械、電子裝置因交互作用導致電荷累積而易產生靜電放電現象等，微小之突波放電亦會造成高速電子元件損壞及系統錯動、當機甚至燒燬[3-6]，致使對各樣電子系統裝備造成無法復原的破壞，除無法賡續遂行任務外，

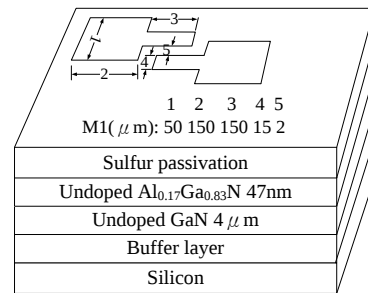
更嚴重甚至肇生人員性命喪失情事。

近年來，除了矽以外，寬能隙的碳化矽(SiC)[7]，氮化鎵或氮化鋁(GaN, AlN)[8]其耐壓也可以達3000伏以上，如果能將這些半導體材料做為直接接受衝擊的前端元件，那麼就可以將突波襲擊對高速元件電路的攻擊所造成的損害降到最低。寬能隙的氮化鎵系列的元件理論上具有相當良好之抗突波能力，但是由於磊晶基底不匹配所造成的高缺陷密度使得氮化鎵系列元件所能承受的突波範圍仍然有限。為了克服突波所造成的傷害，各國均對抗突波元件進行研究。本研究即應用變容器元件之抗突波特性[9-11]，設置於被保護之高速元件之輸入前緣，並施以靜電突波之進襲輸入，針對在此保護設計下之高速元件之特性衰減變化做耐受度之測試，即可驗證變容器對高速元件之保護設計成效。

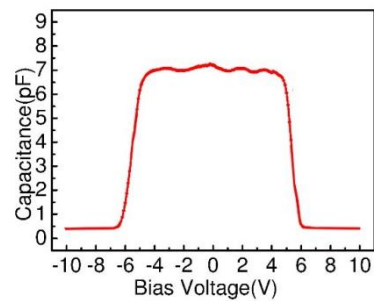
二、實驗設計

本研究所研製之抗突波變容器的結構如圖一所示，這樣的抗突波元件基本上跟被保護的高速電晶體元件是相同的，也是說它們可以做在同一片晶片上，這樣的好處就是我們可以利用積體電路技術，非常密集的將此做在同一塊基材上。此種變容器元件特性請參閱圖二，從圖二可以看出來它的電容跟它的電壓關係，並可由變容器上之電極幾何形所決定。從圖上可以發現當這個電容數值，只要電壓大到某一個程度後，它的電容值會突然的變小，那這個意思就是說當突波，尤其是電壓的突波進來時，其電壓都是幾百伏到幾仟伏特，這些特別高的電壓一旦進來時，這顆抗突波元件的電容自然就會由原來的二十幾pf，下降到零點幾pf，那這樣就可使得不需要的突波訊號被截斷，避免不需要的突波訊號進入下一級的被保護的高速元件裡，而造成被保護元件或者後級電路的損壞，確保關鍵性系統元件之正常運

作。

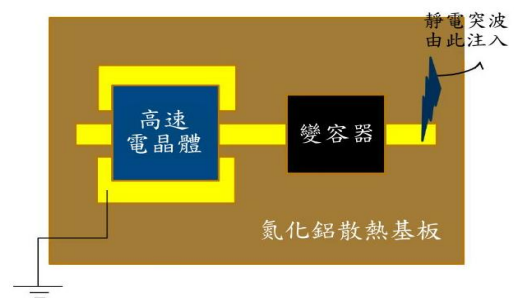


圖一、變容器的結構



圖二、變容器C-V圖

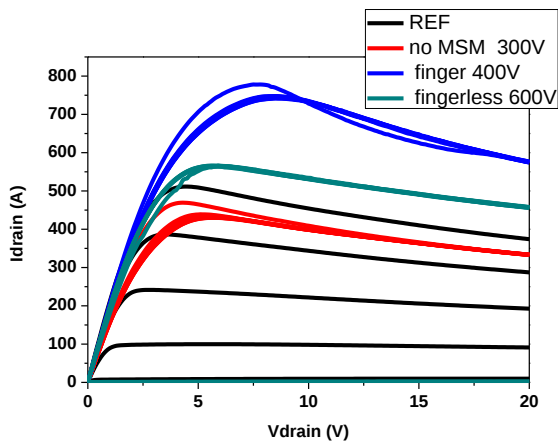
在本實驗量測過程使用Agilent B1500A機台量測被保護高速元件的直流特性，待測元件為閘極長度 $100\mu\text{m}$ 、寬度 $2\mu\text{m}$ 的高速電晶體元件，在與高速元件相同的變容器元件製程中，變容器電極的設計具有不同形狀、大小，以而提升其電容轉換比與操作電壓範圍，近而保護高速元件，最後，將兩種元件覆晶封裝[12]在同一基板(如圖三)，量測元件熱效應改善後特性，同時進行靜電突波注入後，量測該元件之直流特性，判斷元件是否損壞。



圖三、元件覆晶於散熱基板示意圖

三、結果與討論

(一)不同形狀變容器+高速電晶體元件之靜電耐受度測試



圖四、於不同變容器電極條件下，靜電突波注入後高速元件IV輸出特性曲線

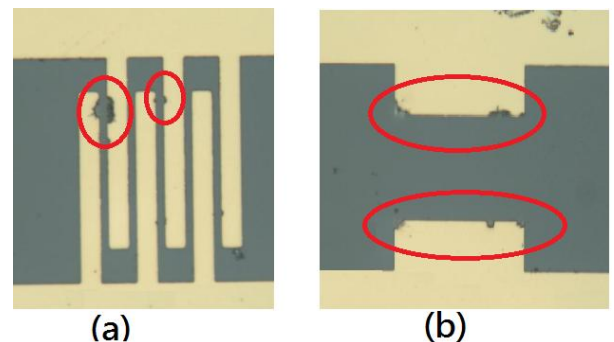
表二、覆晶後不同形狀變容器+高速電晶體元件對靜電耐受度測試比較表：

元件特性比較	靜電耐受度	測試後高速電晶體閘極漏電流
高速電晶體(無變容器配置)	300V	自 10^{-6} mA 增加約兩個數量級
指叉型電極之變容器+電晶體	400V	自 10^{-6} mA 增加約兩個數量級
無指叉型電極之變容器+電晶體	600V	自 10^{-6} mA 增加約兩個數量級

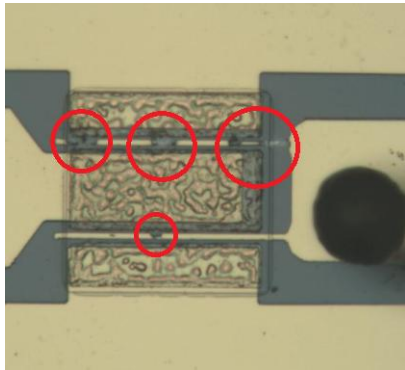
由表二可知，覆晶後不同電極的形狀變容器與被保護之高速電晶體元件對突波進襲的耐受度以配置無指叉型電極之變容器為最高(約靜電電壓=600V時，高速電晶體失效)，此時高速電晶體的閘極漏電流約增加二個數量級，同時，發生變容器因承受不了靜電突波的注入，導致在變容器電極邊緣有擊穿的現象，如圖五(a)、(b)，另在高速電晶體元件上我們

也發現閘極失效的位置(如圖六)，此現象可能為靜電突波的瞬間高電流注入造成缺陷，導致出現高速電晶體元件之閘極電極出現熔融現象，致使元件的損毀而失效。由此看出，指叉型電極之變容器因指叉型電極相距較近，當注入靜電電壓升高時較易產生尖端放電現象[13]，而尖端放電所形成之高熱電弧將其電極金屬熔燬，而喪失其元件原有之抗突波特性，致使靜電突波迅速竄入後級之待保護高速電晶體元件，亦同時因突波高熱造成電晶體閘極熔燬現象，最終使高速元件喪失其電壓電流控制能力。

另外對於無指叉型電極之變容器而言，因變容器電極間之距離較寬，當靜電電壓注入時，累積於電極邊緣的電荷需高至一定量方能產生尖端放電效應，造成電弧高熱而致使電極熔燬。故就實驗結果我們可以發現此以無指叉型電極之變容器其對於高速電晶體元件的靜電突波保護能力而言，似乎是指叉型電極之變容器的兩倍，其保護能力較強。

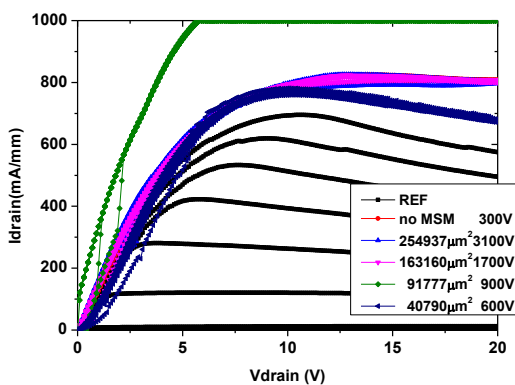


圖五、(a)靜電注入後指叉型電極損壞點 (b)靜電注入後無指叉型電極損壞點損壞點

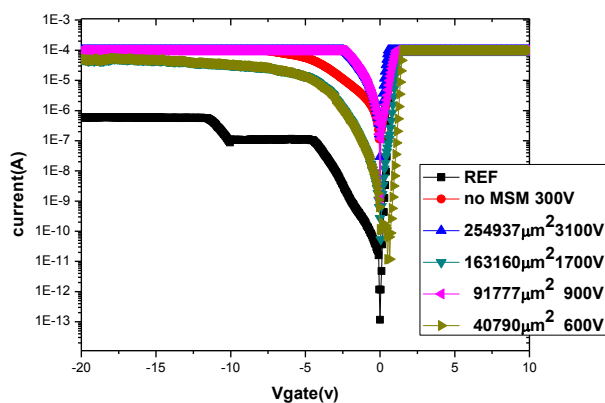


圖六、靜電注入後閘極電極損壞點

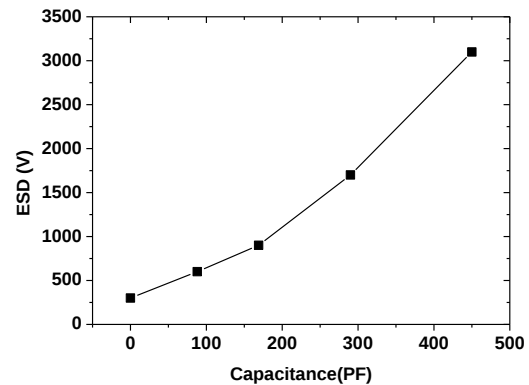
(二)不同電極面積大小的變容器+高速電晶體元件對靜電耐受度測試



圖七、靜電突波注入後 IV 輸出特性曲線



圖八、靜電注入後蕭基二極體特性曲線



圖九、不同電極面積的變容器最大電容值對靜電耐受程度趨勢圖

圖七為覆晶後元件經靜電注入後 $I_{DS}-V_{DS}$ 曲線圖，從圖可以清楚看出覆晶後元件，未經由變容器保護注入靜電後，在 300V 的靜電脈波注入後，從圖八明顯看出高速電晶體元件的漏電流增加三個數量級，且閘極被破壞，不再具有控制通道的功能，閘極無法控制電流，電流值維持在最高，判定元件遭到靜電破壞，而經由電極面積 $40790 \mu\text{m}^2$ 的變容器保護注入靜電後，大約在 600V 的靜電脈波注入後，明顯的使元件的漏電流增加，且閘極亦無法控制電流，而電流值維持在最高，判定元件遭到 ESD 破壞，同理，分別在電極面積 $91777 \mu\text{m}^2$ 、 $163160 \mu\text{m}^2$ 、 $254937 \mu\text{m}^2$ 的變容器保護注入靜電後，高速電晶體分別約在 900V、1700V 及 3100V 等靜電電壓注入下閘極遭破壞使漏電流逐漸增加而一樣無法控制電流，而電流值維持在最高，亦判定元件遭到 ESD 破壞。由實驗結果整理得到變容器電極面積大小所產生之元件最大電容值，與其所能對不同靜電電壓注入下的耐受能力關係(如圖九所示)得知，變容器電極面積越大，其變容器的最大電容值愈大，致使其對高速電晶體的靜電突波防護力愈佳。

四、結論

本研究主要利用抗突波變容器與被保護之高速元件之組合，強化對靜電突波之保護能力之提升，並由實驗結果證實置於被保護元件前端之變容器，其無指叉型形狀之電極及在電極面積愈大的情況件下，愈能有效改善被保護高速電晶體元件之抗靜電突波進襲之能力，並確保其元件特性。此研究將有助於在許多通電系統中，對於關鍵電子零組件之保護設計，以確保系統之運作效能。

五、致謝

感謝長庚大學綠色科技中心提供相關製程及量測協助。

六、參考文獻

- [1] U.K. Mishra , P. Parikh, Y.F. Wu., “AlGaIn/GaN HEMTs: An overview of device operation and applications, ” Proceedings of the IEEE, vol. 90, pp. 1-16, 2002.
- [2] Colby, J., “Key Considerations for ESD Circuit Protection,” Electronic Design(<http://electronicdesign.com/boards/key-considerations-esd-circuit-protection>), 2001.
- [3] ESD/EOS, Intel Packaging Databook, USA, pp.6-1~6-8, 2000.
- [4] Yeoh, T. S., “ESD Effects on Power Supply Clamps,” Proceedings of 6th IPFA ‘97, Singapore, 1997.
- [5] Wang, Y., Jin, X., Yang, L., Jiang, Q., and Yuan, H., “Robust Dual-Direction SCR with Low Trigger Voltage, Tunable Holding Voltage For High-Voltage ESD Protection,” Microelectronics Reliability, Vol.55, pp. 520-526, 2015.
- [6] Phulpin, T., Trémouilles, D., Isoird, K., Tournier, D., Godignon, P., and Austin, P., “Analysis of an ESD Failure Mechanism on a SiC MESFET,” Microelectronics Reliability, Vol. 54, pp. 2217-2221, 2014.
- [7] Shiqi Ji, Zheyu Zhang, and Fred Wang, “Overview of High Voltage SiC Power Semiconductor Devices: Development and Application”, CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, VOL. 1, pp. 254-264, 2017.
- [8] T.P. Chow, and R. Tyagi, “Wide bandgap compound semiconductors for superior high-voltage unipolar power devices”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 41, pp. 1481 – 1483, 1994.
- [9] 程俊毓，氮化鎵 MSM 壓變電容元件研製及其 ESD 應用研究，長庚大學，碩士論文，民國 96 年。
- [10] C. Y. Tien, P. Y. Kuei , L. B. Chang and C. P. Hsu, Capacitance Swing and Capacitance Ratio of GaN-Based Metal-Semiconductor-Metal Two-Dimensional Electron Gas Varactor with Different Dielectric Films,” J Electr Eng Technol, pp. 1721-1726, 2015.
- [11] Y. C. Ferng, L. B. Chang, A. Das, C. C. Lin, C. Y. Cheng, P. Y. Kuei, and L. Chow, “Improvement of Surge Protection by Using an AlGaIn/GaN-Based Metal-Semiconductor-Metal Two-Dimensional Electron Gas Varactor,” Japanese Journal of Applied Physics, 51, pp. 124201-1~124201-4, 2012.

- [12] Compound Semiconductor., “ IMEC improves GaN HEMTs with ceramic substrates,” Vol. 20 Page:16-18, Number, 9, 2005.
- [13] A. A. Yahya, and J. E. Harry, “Factors affecting the glow-to-arc transition at the cathode of an electric discharge at atmospheric pressure, ” International Journal of Electronics, Vol. 86, pp.755-762, 2010.