

突波襲擊防護技術改善之研究

A Study of Improved Surge Protection with Gas Discharge Tube

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

本研究主要利用改良市場上常用之突波防護元件-氣體放電管(Gas Discharge Tube, GDT)以提高此種突波防護元件之應用效能。藉由壓敏電阻(Voltage Dependent Resistor, VDR)材料與金屬氧化物變阻器(Metal Oxide Varistor, MOV)結合突波防護元件之組合運用，以提升其對近襲突波之快速反應及大電流承載量能力，有效改善對於關鍵零組件的突波保護能力。

關鍵詞：突波防護、金屬氧化物變阻器、壓敏電阻、氣體放電管

ABSTRACT

The gas discharge tube which is combined with VDR material or MOV device has rapid response to surge and current carrying capacity. These technologies above are effective to improve the suppression of the rapid surge attacks and also enhance the reliability of these crucial components of the system.

Keywords : gas discharge tube, VDR, MOV, surge

一、簡介

傳輸纜線或戶外天線為通電裝備系統對外傳遞或收發信號的重要媒介，並藉此與裝備內部相關系統電路與微電子元件構聯運作。然在現今自然與人為雜訊干擾龐雜，電磁波能量充斥的外在環境中，亦使得系統內部重要的電子元件暴露在外界電磁波能量藉由天線以前門耦合(Front Door Coupling)方式[1,2]進入裝備所造成突增性的傳導電流(或電壓)而產生嚴重電子訊息干擾或系統元件損毀的風險大增。這種突增性之電磁波能量的耦合傳導現象即可稱為電磁脈衝(Electromagnetic Pulse, EMP) [3-6]現象。在自然界中由閃電雷擊所形成電磁脈衝(Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP)其能量瞬間上升時間(Rise Time)較長，使其產生速度長達微秒(10^{-6} s)等級。此外，如人為蓄意的電磁干擾(Intentional Electromagnetic Interference, IEMI) [1,7-10]與核爆式的電磁脈衝(Nuclear Electromagnetic Pulse, NEMP)[11-13]其能量瞬間上升時間(Rise Time)快速，使其產生速度僅僅奈秒(10^{-9} s)等級，強大且快速的電磁波能量對通電系統裝備形成強大的破壞力。因此，提升系統裝備中重要之電子元件對電磁脈衝現象的防護能力，抑制如此強大且快速的電磁波干擾及破壞效應，皆成為軍民用通電裝備重要的研究議題。

在相關突波防護的電子元件中，氣體放電管(Gas Discharge Tube, GDT)常被採用作為這種突增性傳導能量的吸收器(Absorbor)，並聯於被保護電子元件之前端以提供一條可將過電流(或過電壓)突波能量洩放接地的捷徑。GDT 元件與其說是突波吸收器不如說是突波開關更為適當，因為一般無突波進襲下並聯於電路中的 GDT 元件呈現高電阻狀態是不導通的，然當突波進襲下的 GDT 元件因元件內部

氣體放電的原故，使並聯於電路中的 GDT 元件瞬間導通而將突波接地洩放，使相關被保護的重要電子元件及系統內電子模組得以不受這些危險的突波進襲能量所損毀。氣體放電管的重要性可見一般，而時至今日其應用範圍更廣，如切換式電源供應器、電信通訊、數據通訊、電子點火系統、影音系統、電鍍設備、施工安全及相關軍事應用等[14]。據此，對氣體放電管(GDT)特性需求要能承載不同的突波傳導現象、快速反應及自我恢復(Self Recovery)，致使進襲重要系統元件的殘餘能量能被抑制到最低[15]。

雖然目前許多通電裝備前端已有加裝 GDT 元件以欲抑制雷擊突波能量，然面對突波進襲下的氣體放電管需有足夠能量游離化元件內部氣體以導通接地，這就使 GDT 元件的反應時間較慢而維持在微秒(μ s)範圍，而不幸的是突波進襲被抑制後的殘餘能量大小與 GDT 元件導通速度成反比，亦即 GDT 愈快導通洩放能量，電路後端至負載電子元件的殘餘能量愈小，這對許多在奈秒(ns)級所產生的人為蓄意電磁干擾(IEMI)或核爆式電磁脈衝(NEMP)[16]等突波類型的進襲，GDT 元件是無法提供系統元件足夠的保護。

針對前述突波保護元件反應時間過慢的問題，最常見的壓敏電阻(Voltage Dependent Resistor, VDR)中的金屬氧化物變阻器(Metal Oxide Varistor, MOV)可能是一個不錯的解決方案。MOV 元件可以在奈秒(ns)範圍內對快速突波進行瞬間反應並導通接地洩放能量，以達保護負載電子元件之目的。然而，在相同元件體積下，MOV 元件對於過電流/過電壓突波能量的承載力並不如 GDT 元件，使 MOV 元件在幾次重覆的突波襲擊下容易衰減退化甚至燒毀[17]。由於多數 MOV 元件是由氧化鋅(ZnO)燒結製成[18-20]，受到氧化鋅(MOV)元件製程的啟發，研提在氣體放電管(GDT)表面鍍氧化

鋅薄膜之嶄新突波保護元件，預期此型元件對突波進襲下，除具有快速反應能力外，尚兼具對突波電流承載能力大的優勢，以提升欲保護之系統元件之可靠度。

二、理論分析

氣體放電管(GDT)是藉由突波能量洩放接地，使達到後端系統的殘餘突波能量銳減，以達到保護後端系統元件之目的。根據氣體放電的理論[21]，當元件內部氣體間隙上的電壓達到一定值後，流經間隙的電流急速增加，氣體間隙的絕緣能力降低，此種由元件絕緣狀態變為導體狀態稱為崩潰現象，並且於內部氣體產生電弧放電的氣體游離放電機制。電弧放電時，放電管可分為陰極區、正柱區與陽極區，如圖 1 電弧放電示意圖所示。

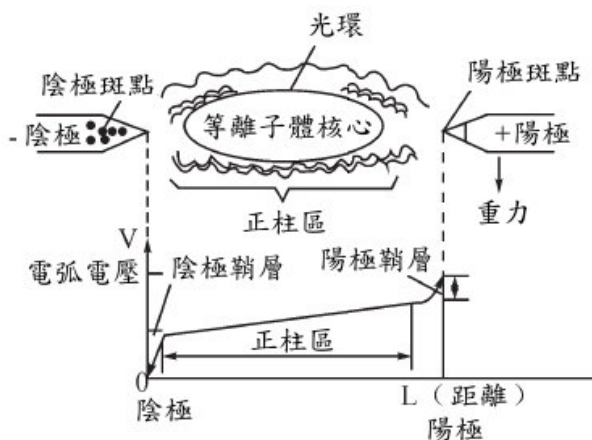


圖 1. 電弧放電示意圖

陰極區主要由熱電子發射與場致發射來產生電子流，而在圖內陰極斑點處之電流密度可達 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \sim 1 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 。依據電子流連續方程式及帕松方程式[22-23]，有：

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\rho / \epsilon_0 = -1 / \epsilon_0 \left(\frac{j_i}{v_i} - \frac{j_e}{v_e} \right)$$

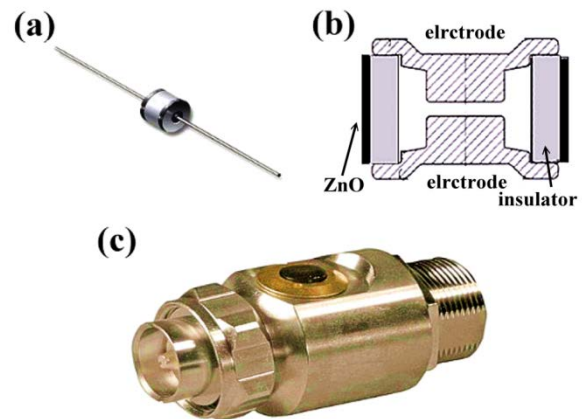
上式中 $j_i = n_i e v_i$; $j_e = n_e e v_e$; 如果座標原點定

在陰極(即電位 $V=0$)，陰極鞘層的厚度為 d_c ，陰極電位壓降 V_c 。故

$$E^2 = \frac{4}{\epsilon_0} \left(j_i \sqrt{\frac{m_i(V_c - V)}{2e}} + j_e \sqrt{\frac{m_i V}{2e}} - j_e \sqrt{\frac{m_e V_c}{2e}} \right)$$

三、實驗設計

鍍氧化鋅之氣體放電管(GDT)元件所採用的是君耀電子公司生產型號為2RM090L-5的GDT元件，其最大脈衝導通電壓(Maximum Impulse Spark-Over Voltage)為600 V/ μm 、脈衝放電承載電流為10 kA[24]，並委請新長田電子有限公司代為製作，將氧化鋅薄膜濺鍍於GDT元件表面。氧化鋅薄膜厚度約300 nm。市面上一般的GDT元件如圖2(a)，而本研究所研提之鍍氧化鋅氣體放電管元件如圖1(b)所示，並將此GDT元件置於電磁脈衝突波承載



器(EMP Container)內進行襲擊模擬測試。

圖 2. (a)一般 GDT 元件 (b)鍍氧化鋅的 GDT 元件縱剖面結構示意圖 (c)GDT 元件承載測試之電磁脈衝承載器 (EMP Container)

在實驗測試電路中的測試元件並聯於 50Ω 負載電阻，代表測試元件並聯於一般通電系統之等效負載，以 PCI 突波產生器模擬電

磁脈衝注入之量測電路示意圖如圖 3 所示。我們所使用的電磁脈衝模擬器，為瑞士 Montena 科技公司所生產型號為 EMP10K-5/500-Jy 的 10kV 短脈衝(Pulse Current Injection, PCI)產生器，來模擬電磁脈衝注入具有 GDT 突波保護元件的測試電路。此型短脈衝產生器相關最大突波輸出規格依開路電壓(V_{oc})、短路電流(I_{sc})、上升時間(Rise Time)與半高寬(Full Width at Half Maximum, FWHM)等分別為 1.2 kV、166 A、18 ns 與 545 ns[25]，符合美軍標準 MIL-STD188-125-1/2 其中短脈衝 (Pulse Current Injection, PCI)相關規範[26]。同時，注入之突波襲擊電流及其經過 GDT 突波保護器抑制後所剩餘的殘餘電流皆由 Tektronix 公司的 DPO4014B 型數位示波器加以量測分析。

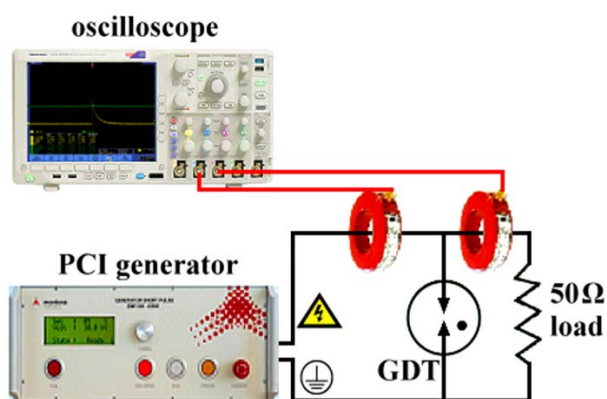


圖 3. PCI 模擬 EMP 突波注入量測電路示意圖

四、結果與討論

如圖 4 所示，一般 GDT 元件脈衝導通規格為 $1000 \text{ V}/\mu\text{s}$ ，即表示其反應約在 10^{-6} 秒左右，然人為蓄意的電磁干擾(IEMI)突波進襲的上升時間(Rise Time)若快於 GDT 元件反應時間，在電路中縱使有 GDT 元件的保護，其結果不是 GDT 元件來不及反應就是因反應慢而使突波殘餘能量過高，致使被保護之系統元件受損。本研究之 PCI 脈衝上升時間為 18 ns (10^{-9} s)，符合 MIL-STD188-125-1/2 規範中脈衝上升時間

小於 2×10^{-8} 秒的標準，因此，所研提的鍍氧化鋅 GDT 元件為的就是希望能提早觸發 GDT 元件導通，使其能因應如 IEMI 類型的突波進襲，提高突波保護器本身之效能。

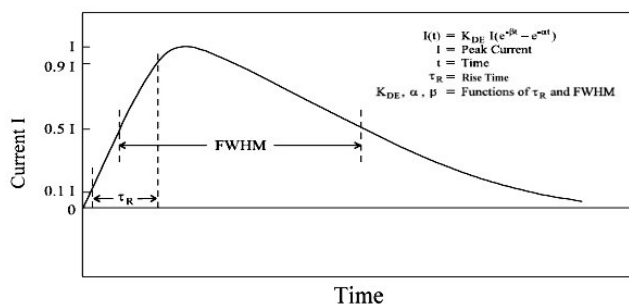


圖 4. GDT 元件導通電流示意圖 (I：最大電流； τ_R ：上升時間為 10%-90%最大電流間的時間，定義 $8 \mu\text{s}$ ；FWHM：半高寬為 50%最大電流間的時間，定義 $20 \mu\text{s}$)

如圖 5 量測結果所示，當我們調整 10 kV 的短脈衝產生器(PCI)由 0 V 至 1500 V 的突波電壓值，其 PCI 之輸出電流亦由 0 A 至 30 A 呈線性遞增的方式注入測試電路中。在一般無鍍氧化鋅 GDT 元件的突波保護測試實驗中，我們可以發現一般 GDT 元件對 PCI 突波還是有部分抑制的能力。當 PCI 突波之電壓值小於 800 V 時，因注入突波電流速度過快及電流過小，使 GDT 元件無法反應作用，導致 PCI 產生器注入的突波電流等於殘餘電流，即表示全部進入電路後端負載電阻，並以 PCI 注入為 700V 為例，其殘餘電流為 5.88A。然而當 PCI 之突波電壓值大於 800 V 時，測試電路中到達負載電阻的殘餘電流即迅速的下降並保持在 7.5 A 左右。這表示這顆 GDT 元件的突波啟動電壓約 800 V，而當輸入之 PCI 突波電壓值需高於 800 V 時，

突波電流才能被 GDT 元件啟動導通接地，並降低到達負載電阻（模擬系統元件）的殘餘電流。

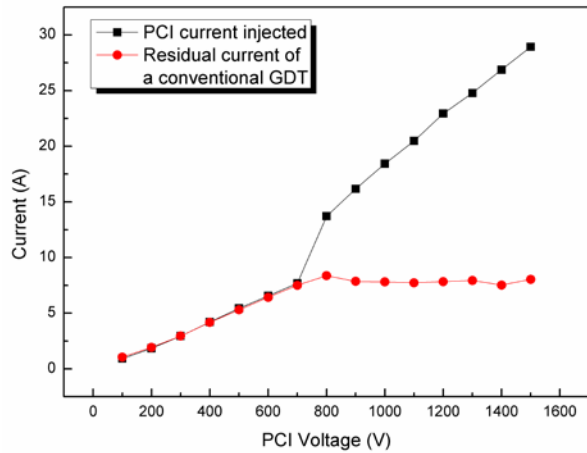


圖 5. 無鍍氧化鋅 GDT 元件之 PCI 突波電與殘餘電流的 I-V 量測特性圖

本研究之鍍氧化鋅 GDT 元件的 PCI 突波測試結果如圖 6 所示。由量測結果可看出當 PCI 注入為 700V 為例，其殘餘電流為 4.77A，且 PCI 注入突波之電壓值高於 700 V 時，在 GDT 元件表面具可變電阻特性的氧化鋅薄膜即開始導通部份突波進襲的電流，使殘餘電流開始被抑制而稍降。而當 PCI 突波之電壓值持續提升至 1000 V 時，突波進襲能量已大到足以啟動 GDT 元件以導通洩放較大的突波電流，使得殘餘電流因此而降低。所以在本研究中，即使 GDT 元件在快速突波進襲下並於未被啟動前，氧化鋅薄膜即可開始提供 PCI 突波電流一洩放接地的路徑並提早抑制殘餘電流。氧化鋅薄膜抑制殘餘電流雖然看起來很小，實際上的抑制效果卻是在 PCI 之突波電壓值為 800 V 與 50Ω 負載電阻的條件下高達 1 A 或 50 V，這相當有助於保護系統中關鍵元件並提升其可靠度。

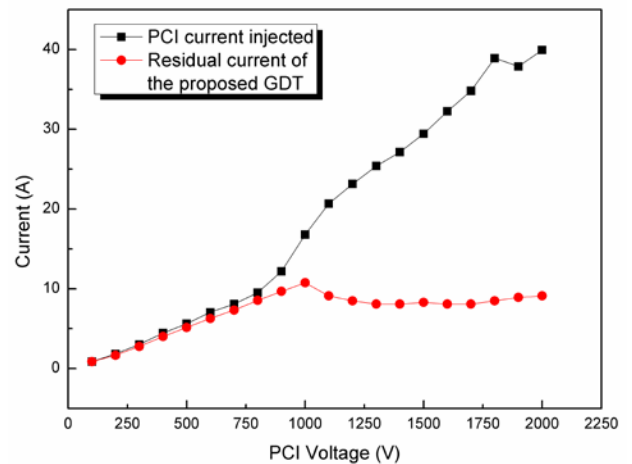


圖 6. 鍍氧化鋅 GDT 元件之 PCI 突波電壓與殘餘電流的 I-V 量測特性圖

依前述相關鍍 ZnO 薄膜的 GDT 元件之 PCI 注入與殘餘電流實驗可知，氧化鋅薄膜確有促使 GDT 元件提早反應及抑制快速突波進襲之能力。

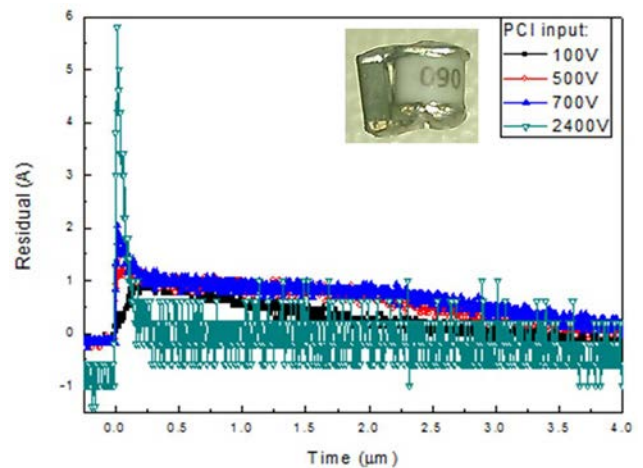


圖 7. MOV 與無鍍氧化鋅 GDT 元件焊接後之 PCI 殘餘電流特性圖

此外，為了解現行市場現有 MOV 元件對 GDT 元件突波抑制之影響，我們另將目前市場上之 MOV 元件與本實驗中相同 GDT 元件相並聯焊接後，以相同 PCI 注入測試驗證之，可得其殘餘電流如圖 7 所示。由圖 7 結果我們可知，隨著 PCI 電壓注入的遞增，GDT 元件

直至 PCI=700 V 時始導通抑制殘餘電流，並直至 PCI=2400 V 時，GDT 元件將 PCI 電流抑制剩 0.2 A。同時，從 PCI 殘餘電流測試結果中我們發現，當 PCI=100 V 注入時，由圖中黑色曲線即可看出元件就已有突波抑制效果，且具有 MOV 之箝位電流(Clamp Current)特徵，其最大值約固定於 1 A 處，這種現象在 PCI 持續遞增注入達 700 V 之前皆相同，可證明此型 MOV 並聯 GDT 的整合型元件在 PCI 注入達 700 V 之前，皆由 MOV 元件進行突波抑制功能。隨著 PCI 注入提升至 2400 V 時，我們可由圖中曲線可看出其元件殘餘電流不再具有箝位電流之特徵，而是逐漸將 PCI 電流抑制剩 0.2 A。由此顯示此時 PCI 注入電流不但有效啟動了整合型元件中的 GDT 元件之突波抑制功能，更加速了元件對突波的反應速度，這樣的結果亦符合日本學者 Hitoshi Kijima 於 2012 年的報告[27]。

五、結論

本研究主要利用藉由壓敏電阻(Voltage Dependent Resistor, VDR)材料與金屬氧化物變阻器(Metal Oxide Varistor, MOV)結合突波防護元件-氣體放電管(GDT)之組合運用，以改良元件之突波防護特性並同時兼俱對進襲突波之快速反應及大電流承載量能力，有效改善對於關鍵零組件的突波保護能力。

六、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。

七、參考文獻

[1] Mansson, D., "Intentional Electromagnetic

Interference (IEMI)," Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations, Sweden, pp. 22-24, 2008.

[2] Lee, K. A., Rhee, J. H., Cho, Y. M., Baek, J. E., and Ko, K. C., "PPPS-2013: Damage prediction of RF System Affected by Electromagnetic Pulse," Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), San Francisco, CA, pp. 1, 2013.

[3] 張連璧，電磁脈衝學與電磁屏蔽，五南圖書出版股份有限公司，台灣，第25-54頁，2007。

[4] 啟元，"傳聞中的殺手武器-打破電磁脈衝的迷思"，全球防衛雜誌，第254期，2005。

[5] Zhang, X., Yang, J., Yuan, Q., Wang, Z., and Li, X., "Research on the Suppressing Behaviour of EMP Protection Device," Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, Harbin, pp. 318-321, 2011.

[6] Pierce, D. G. and Dulgin, D. L., "An Overview of Electrical Overstress Effects on Semiconductor Devices," Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, pp. 120-122, 1981.

[7] Lugrin, G., Mora, N., Sliman, S., Rachidi, F., Rubinstein, M., and Cherkaoui, R., "Overview of IEMI Conducted and Radiated Sources: Characteristics and Trends," International Symposium in Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Brugge, pp. 24-28, 2013.

[8] Radasky, W. A., Baum, C. E., and Wik, M. W., "Introduction to the Special Issue on

- High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 46, pp. 314-321, 2004.
- [9] Savage, E. and Radasky, W., "Overview of the Threat of IEMI (Intentional Electromagnetic Interference)," *IEEE International Symposium in Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Pittsburgh, PA, pp. 317-322, 2012.
- [10] Bäckström, M., "The Threat From Intentional EMI Against the Civil Technical Infrastructure," 3rd European Survivability Workshop (ESW), Toulouse, France, pp. 1-10, 2006.
- [11] Gowd, K. P., "Parameters for Validation of a NEMP Hardened Facility," in *Electromagnetic Interference & Compatibility*, 10th International Conference (INCEMIC), Bangalore, pp. 645-649, 2008.
- [12] Raju, M. R., Sarma, V. V. R., Satav, S. M., Rao, K. R., Narayana, K. S., and Sholapurwala, Z. H., "Fast Transient High Voltage Pulse Radiating System for Vulnerability Studies of NEMP on Electronic Systems," 10th International Conference in Electromagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC), Bangalore, pp. 223-228, 2008.
- [13] Rustan, P. L., "Description of an Aircraft Lightning and Simulated Nuclear Electromagnetic Pulse (NEMP) Threat Based on Experimental Data," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-29, pp. 49-63, 1987.
- [14] "氣體放電管在浪湧抑制電路的運用", UN Semiconductor (<http://www.unsemi.com.tw/ch/Newsshow.asp?id=45>), 台中市, 台灣, 2015。
- [15] Naito, Y., Kawabata, T., Yanagawa, S., and Yamamoto, K., "Responce Characteristics of Diode Gas Dicharge Tubes," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Austria, 2012.
- [16] Thomas, M. J. and Sunitha, K., "Transient Electric Field Distribution within the Working Volume of an NEMP Simulator," in *Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC)*, Proceedings of the 9th International Conference, pp. 396-401, 2006.
- [17] Tsukamoto, N., "Study of Degradation by Impulse Having 4/10 μ s and 8/20 μ s Waveform for MOVs (Metal Oxide Varistors)," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, pp.260-263, 2014.
- [18] Beynet, Y., Izoulet, A., Fritsch, S. G., Chevallier, G., Bley, V., Pérel, T., Malpiece, F., Morel, J., and Estournès, C., "ZnO-Based Varistors Prepared by Spark Plasma Sintering," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 35, pp. 1199-1208, 2015.
- [19] Zhang, N., Jianhu, X., Zhen, S., Liuhua, D., and Tao, Y., "A Deep Insight into ZnO Nonlinear Resistor," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, pp. 546-550, 2014.
- [20] Mahmud, S., Abdullah, M. J., and Amin, Z. M., "Power Dissipation of ZnO-based

- Metal Oxide Varistors (MOVs) for Electronic Circuit Protection,” 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits, Technology, Vol. 3, pp. 2366-2369, 2004.
- [21] 李祥超等, “多電極氣體放電管與ZnO壓敏電阻匹配性能的研究”, 電瓷避雷器, 南京, 2015。
- [22] 葛自良等, “低溫等離子體放電管放電形式的發光分析”, 高電壓技術, 2002。
- [23] 肖曉林等, “基於PIC法SF₆/N₂混合氣體中絕緣子沿面放電特性研究”, 電工’ 技術學報, 2011。
- [24] “Data Sheet Gas Discharge Tube - 2R-5 Series”, 君耀電子公司 (http://www.brightking.com/docf/product/detail_106_1.html), 上海, pp. 1-3, 2012.
- [25] “EMP10K-5-500,” Montena Technology (<http://www.montena.com/system/generators/pulsed-current-injection-pci-generators/>), Rossens Switzerland, 2015.
- [26] MIL-STD-188-125-1/2, Department of Defense Interface Standard, USA, pp. 71-95, 1999.
- [27] Kijima, H. and Murakawa, K., “Lightning Surge Response Improvement by Combinations of Varistors and Gas Discharge Tubes,” *Wseas Transactions on Power Systems*, Vol. 7, pp. 60-69, 2012.