



一種應用於氧化鎵精微結構陣列高效加工的新型微線切割放電加工電源開發 Development of a novel micro w-EDM power source for efficient machining of gallium oxide microstructure array

陳順同^{1*}，陳世耀²，李偉誠²

¹ 國立臺灣師範大學 機電工程學系 教授

² 國立臺灣師範大學 機電工程學系 研究生

*E-mail: chenst@ntnu.edu.tw

摘要

氧化鎵(Ga_2O_3)是環保綠能非常重要的創新材料，具高頻率與大電流的第四代超寬能隙半導體，比起第三代半導體材料，它能承受更高電壓的臨界電場與崩潰電壓，應用領域包括交通運輸、再生能源、5G 通訊及能源車等，在超高功率元件的應用極具發展潛力。氧化鎵具高脆性與高硬度，不易切削加工，目前多以蝕刻方式成形，但蝕刻涉及環保議題，且速度慢，不易成形高深寬比微細結構。鑒此，本研究開發一「非等能量雙電阻電容高頻放電電源(High-frequency discharge power source with non-equal energy dual Resistance-Capacitance)」，藉由場效可程式邏輯閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)」輸出訊號，控制 N 型負載開關(N-MOSFET Load switch)，以決定非等能量雙電阻電容迴路的充放電時機，故能創造出規律、密集、高頻且高低峰值相間的放電能量波列，非常適合具有熱裂解(Pyrolysis)特性的氧化鎵材料加工。實驗結果證實，非等能量雙電阻電容高頻放電電源能成功切割出具有高尺寸精度與高一一致性的曲面鰭片精微結構陣列以及精微細柱狀微結構陣列。相較於化學蝕刻製程需時 120 小時，應用本高頻放電電源技術，僅需 52 分鐘，顯見開發的電源除了具高可控性、高效能及高穩定特性外，更具免於熱危害的高頻火花熔蝕能力，深具產業應用價值。

關鍵詞：線切割放電加工、氧化鎵、熱裂解、非等能量

Abstract

Gallium oxide (Ga_2O_3) is a very important innovative material for environmental protection and green energy. It is a fourth-generation ultra-wide bandgap semiconductor with high frequency and high current. Compared with the third-generation semiconductor material, it can withstand higher voltage critical electric fields and The breakdown voltage, the application fields include transportation, renewable energy, 5G communication and energy vehicles, etc., has great development potential in the application of ultra-high power components. Gallium oxide has high brittleness and high hardness, and is not easy to be machined. At present, it is mostly formed by etching, but etching involves environmental issues, and the speed is slow, so it is difficult to form high aspect ratio microstructures. In view of this, this research develops a High-frequency discharge power source with non-equal energy dual Resistance-Capacitance, through the Field-Programmable Gate Array, FPGA output signal, controls the N-MOSFET Load switch to determine the non-equal energy dual resistance-capacitance The charging and discharging timing of the circuit can create a regular, dense, high-frequency and high-low peak discharge energy wave train, which is very suitable for the processing of gallium oxide materials with pyrolysis characteristics. The experimental results confirm that the non-equal energy dual-resistor-capacitor high-frequency discharge power supply can successfully cut



curved fin microstructure arrays and fine columnar microstructure arrays with high dimensional accuracy and high consistency. Compared with the chemical etching process which takes 120 hours, it only takes 52 minutes to apply this high-frequency discharge power supply technology. It is obvious that the developed power supply not only has high controllability, high efficiency and high stability, but also have ability to free from thermal hazards of high-frequency spark erosion capability. The developed power supply has great industrial application value.

Keywords: Wire electrical discharge machining, Gallium oxide, Pyrolysis, non-equal energy

1. 前言

在如今技科快速進步的時代，考慮到減少能源浪費，電子元件需具備高功率轉換以及環保綠能的特性。第四代超寬能隙(Bandgap)半導體氧化鎵(Gallium oxide)(Ga_2O_3)具高功率、高崩潰電壓(Breakdown voltage)(Bae et al., 2019) [1]與高臨界電場(Critical electric field)的特點，比起 SiC 或 GaN 更容易製作成電路基板(Circuit substrate)，Villora (2014) [2]指出這些優勢能有利於發展高功率發光元件。Pearton (2018) [3]提出崩潰電壓是由材料的能隙大小所決定，能隙愈大能承受的電壓與電流就愈高，因此氧化鎵能適用於需承受高電壓的工作環境。氧化鎵目前多以化學蝕刻(Chemical etching)方式加工，但蝕刻速度慢且有環保疑慮；由於氧化鎵能隙大、絕緣性高、脆性高等特性，故難以用電熱加工(Electro-thermal machining)或切削加工的方式成形，它的材料性質如表 1 所示；線切割放電加工機(Wire electric discharge machine)具有高加工效率的電晶體放電電源(Transistorized EDM power source)，適於高熔點高硬度的金屬切割成形，不過 Chen and Huang (2021) [4]提醒，被加工的精微結構恐因火花熔蝕(Spark erosion)的溫度過高，因而吸收過多的焦耳熱(Joule heat)發生熱變形(圖 1(a)左圖)。分析傳統的電阻電容放電電路(Resistance-Capacitance relaxation circuit)後發現，雖然傳統的 RC 放電電源(圖 1(b))具高峰值(High-peak)及窄脈衝時間寬度(Narrow pulse time width)的電流(圖 1(c))，產生的焦耳熱非常低，很適合微結構的加工(圖 1(a)右圖)，但它的加工效率很低，其未放電的時間遠大於放電的時間，導致加工時間很漫長。鑒此，本研究提出「非等能量雙電阻電容高頻放電電源(High-frequency discharge power source with non-equal energy dual Resistance-Capacitance)」的設計，藉由電容器能產生高峰值與短脈衝能量的特性，以「場效可程式邏輯閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)」控制兩組電阻電容放電電源，以便創造出極短脈衝且高低峰值相間的高頻放電能量波列(High-frequency discharge energy pulse train)。此非等能量的高頻波列具高低峰值相間的放電電流，適用於氧化鎵微結構之高精密切割加工。文中，對新開發的放電電源性能表現，進行定性與定量分析，包括放電電源的火花熔蝕能力(Spark erosion capability)評估，對氧化鎵材料的熔蝕機制(Erosion mechanism)與移除率(Material Removal Rate)檢視，並對表面粗糙度(Surface roughness)進行探討。

表 1 氧化鎵與鋁合金材料特性

Parameters	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (TAMURA Co., 2021) [5]
Density	$5.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Specific heat	$0.49 \times 10^3 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Melting point	1,725 °C
Young's modulus	230 GPa
Electrical resistivity	$0.1 \times 10^{-1} \Omega\cdot\text{m}$
Thermal conductivity	13.6 W/m·K

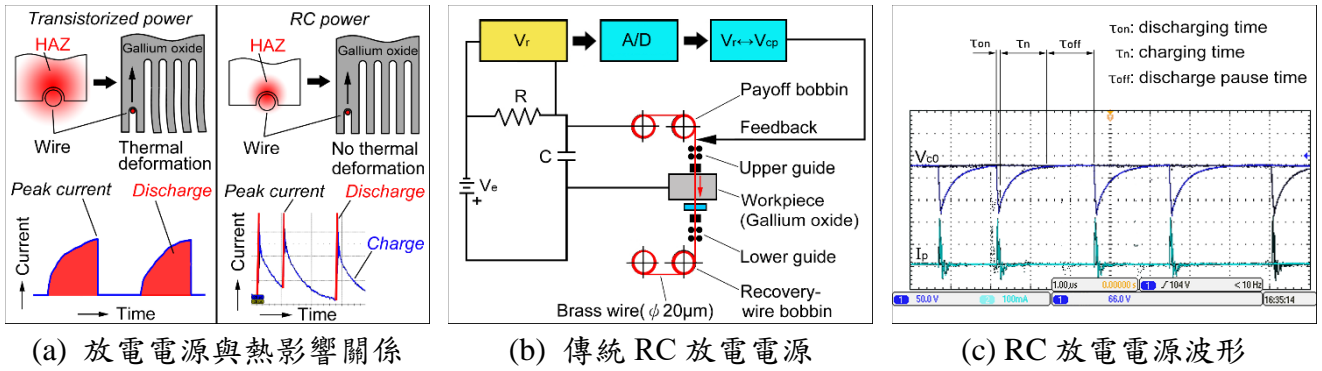


圖 1 電晶體放電電源與傳統電阻電容放電電源

2. 實驗材料與系統

2.1 氧化鎢材料的熱裂解

Galazka 等人(2010) [6]報導，氧化鎢在溫度超過熔點且缺氧的狀態下，會發生熱裂解(Pyrolysis)，並產生氧分子, GaO (式(1))與 Ga_2O (式(2))及 Ga (式(3))等產物。氧化鎢發生熱裂解後，鎢會以小塊狀的殘渣模式從母材剝離(圖 2(a))，不會於切槽外部邊緣形成熔疤，這也是經線切割放電加工後，切槽邊緣能保持乾淨整齊的主因(圖 2(b))。

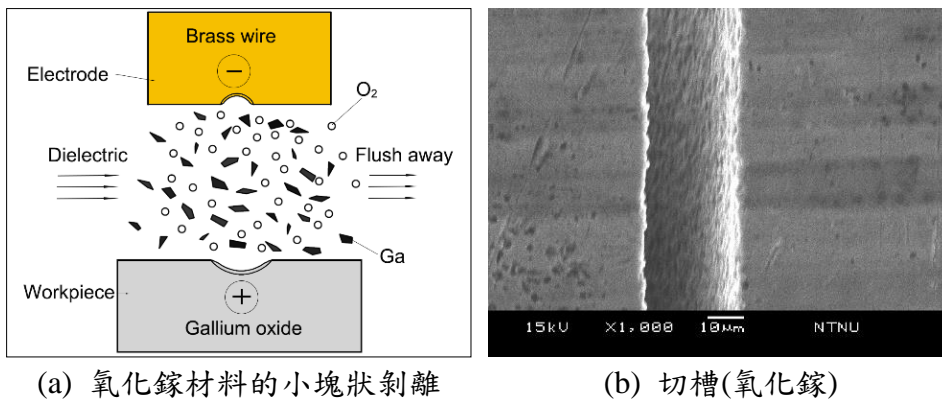


圖 2 線切割放電加工下鋁合金與氧化鎢材料移除模式之差異

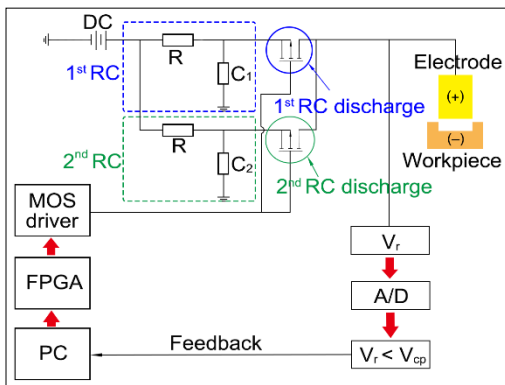
2.2 實驗系統設計

本研究提出一種「非等能量雙電阻電容高頻放電電源(High-frequency discharge power source with non-equal energy dual Resistance-Capacitance)」的設計(圖 3(a))。放電能量來自一組能量可調整的雙 RC 放電電源，並透由「場效可程式邏輯閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)」控制 N 型負載開關(N-MOSFET Load switch)，由閘極(Gate)輸入 5V 訊號，控制源極(Source)與汲極(Drain)導通，產生由汲極流向源極的導通電流(On-current)，N 型負載開關可防止電流逆衝回 FPGA 端。藉此控制非等能量雙電阻電容迴路的充放電時機(圖 3(b))，故能輪流

釋放具高低峰值相間的高頻放電波列。由於脈衝寬度極窄，創造出的高溫電漿已達迫使氧化鎂材料發生熱裂解的最低放電能量，因此材料能被微量高速去除，加工的微結構也能免於熱變形，故能提高材料的移除效率。兩電容的充電時間(Charging duration)(C_t)與放電週期(Discharging cycle)(D_c)設計，分別如式(4)與式(5)所示。當電晶體 IRF 740 導通時，電晶體 IRF 9630 的閘極電壓(Gate voltage)低於充飽電荷的汲極電壓(Drain voltage)，因此滿足 IRF 9630 的導通條件進行放電(圖 3(c))。考慮到氧化鎂材料僅在高溫缺氧條件下發生熱裂解，因此每發放電的作用時間(τ_{on})與休止時間(τ_{off})，都設計的很短，放電波形具高峰值且窄脈衝時間寬度特性，而放電波列具高密度且高低峰值相間的放電電流(圖 3(d))。高峰值電流(High-peak current)用於對氧化鎂材料產生汽化、爆炸與熱裂解，提高材料移除率；而低峰值電流(Low-peak current)則負責融化、小塊狀殘渣(Debris)及毛邊(Burrs)等。此能量波列設計所產生的放電波列規律、密集，且具足夠的放電休止時間，能使氧化鎂材料在極短時間內，以微量及定量的模式被移除，故能精密切割出高尺寸精度與高完整幾何精度(Geometrical accuracy)的氧化鎂微結構。

$$C_t = \tau_{on} + 2\tau_{off} \quad (4)$$

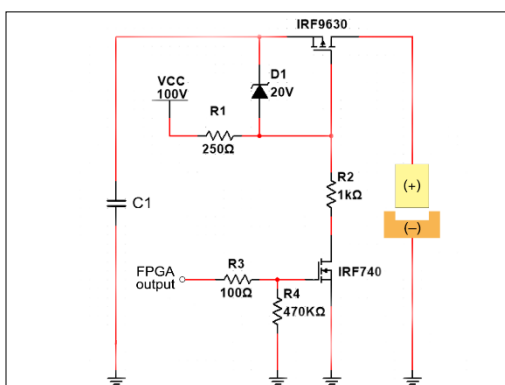
$$D_c = \tau_{on} + \tau_{off} \quad (5)$$



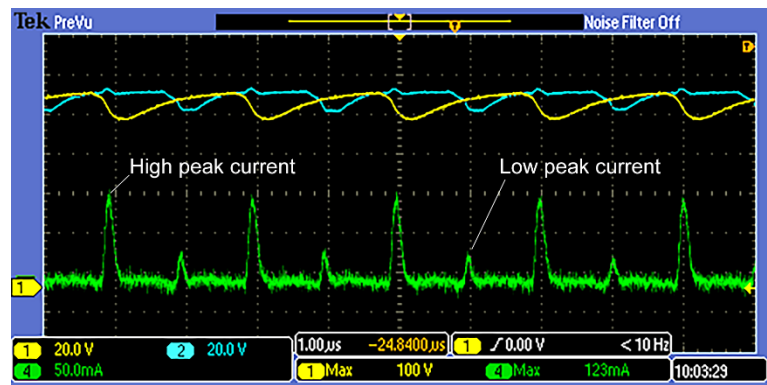
(a) 雙電阻電容迴路設計



(b) FPGA 控制雙電容充放電時機



(c) 單電阻電容負載開關設計

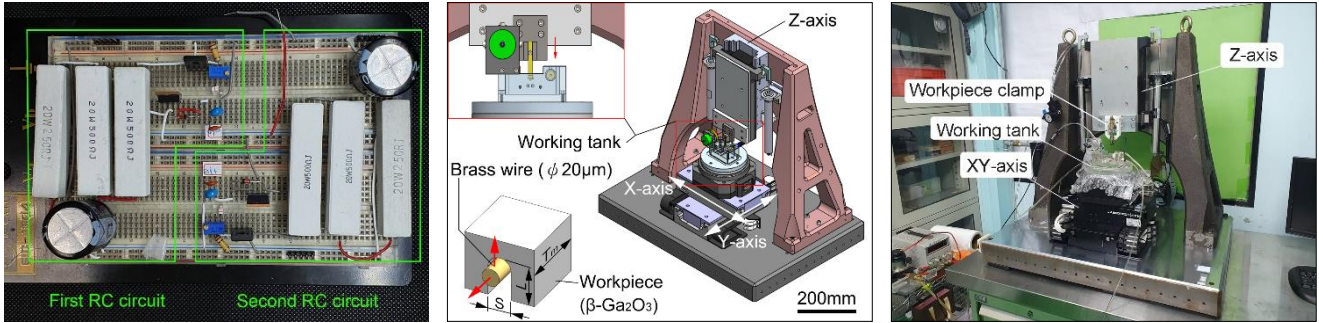


(d) 高低峰值相間的高頻放電能量波列設計

圖 3 「非等能量雙電阻電容高頻放電電源」設計

非等能量雙電阻電容高頻放電電路佈線於電路板(Breadboard)(圖 4(a))上，並整合於實驗室開發的三軸 CNC 線切割放電加工系統上(圖 4(b))，系統上的工作台設計一具微細銅線(繞線機構(圖 3(b)左上圖)，對精微結構進行切割加工實驗。為避免放電短路(Discharge short)，放電迴路中設計一即時取樣電壓(Real-time sampling voltage)(V_r)，透過 A/D 轉換(A/D converter)至

主控電腦端與比較電壓(Compare voltage)(V_{cp})相比較(參考圖 3(a))，以作為調整黃銅線極進給率(Feed-rate)的依據。CNC 線切割放電加工系統的三軸微位移載台(Precision translation stages)採線性馬達(Linear motor)驅動，解析度(Resolution)與重現精度(Repeatability)分別為 1 nm 及 100 nm(圖 4(c))。加工時，工件浸泡於流動的燈油介電液(Lamp-oil dielectric fluid)中，微細黃銅線以臥式倒置模式(圖 4(b)左下角)，由下而上切割精微結構，Chen and Chu (2017) [7]報導，倒置式切割有助於放電殘渣因重力而自然掉落，並由介電液沖離極間。



(a) 雙電阻電容迴路雛型設計 (b) CNC 線切割放電加工系統 (c) 完成的實驗系統

圖 4 實驗系統設計

3. 實驗方法

3.1 放電電源的性能定義

放電電源的放電性能指標(Performance of discharge)定義，包括：單位時間所能輸出的庫倫量(Coulomb per unit of time)(I_{ct})，為放電電容(Discharging capacitance)(C)、極間電壓(Gap voltage)(V_g)與放電頻率的成積，如式(6)所示；切割的槽寬(Kerf width)(s) (參考圖4(b))與移除的體積(Removed volume)(V_v)分別可由式(7)及式(8)求得，式中， g , L 與 T_m 分別為單邊間隙寬度(Critical gap)，切割長度(Cutting length)與素材厚度(Material thickness)(T_m)；線極進給率(Feed-rate of wire-electrode)(F_r)可能影響放電短路或二次放電(Secondary discharge)，意謂實際加工時間(Actual machining time)(A_{mt})可能比理論加工時間(Theoretical machining time)(T_{mt}) (式(9))長，因此可由式(10)求得放電短路時間比(Short-circuit time ratio)(S_{tr})，此比值愈小，放電短路機率愈低，加工效率愈高；材料移除率(Material removal rate)(M_{rr}) (式(11))為單位時間材料移除量，火花熔蝕能力(Spark erosion capability)(S_{ec}) (式(12))為單位電量所移除材料的體積($\text{mm}^3/\text{Coulomb}$)，火花熔蝕能力愈高，加工效能愈高。

$$I_{ct} = C \times V_g \times f \quad (6)$$

$$s = 20 \mu\text{m} + 2 \times g \quad (7)$$

$$V_v = (S \times L + \frac{S^2 \pi}{8}) \times W \quad (8)$$

$$T_{mt} = \frac{L}{F_r} \quad (9)$$

$$S_{tr} = \frac{A_{mt} - T_{mt}}{A_{mt}} \times 100\% \quad (10)$$

$$M_{rr} = \frac{V_v}{A_{mt}} \quad (11)$$

$$S_{ec} = \frac{M_{rr}}{I_{ct} \times 60} = \frac{\frac{V_v}{A_{mt}}}{I_{ct} \times 60} = \frac{V_v}{A_{mt} \times I_{ct} \times 60} \quad (12)$$

3.2 等能量模式之放電加工性能檢視

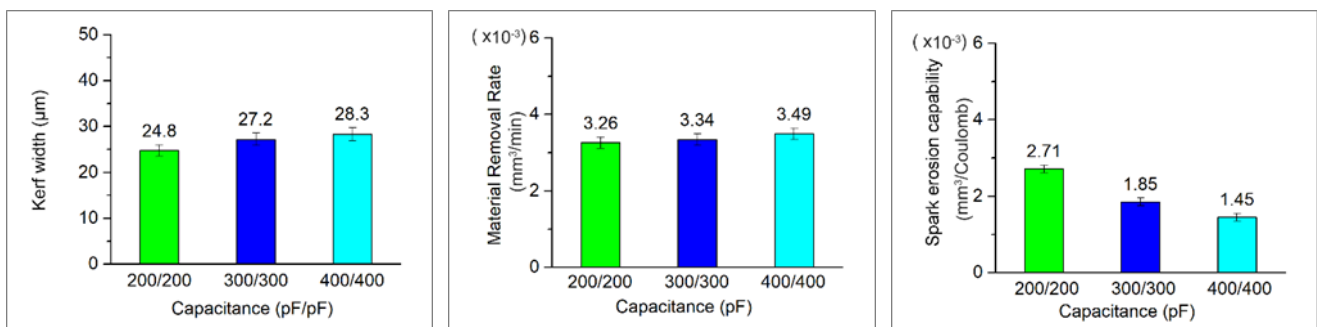
以表2的等能量(Equal energy)條件進行放電性能測試。實驗發現100 pF的放電能量太小，經常短路無法有效移除氧化鎵。電容在200 pF時，能獲得最窄的槽寬，且槽寬尺寸隨電容的提高而稍有變寬趨勢(圖5(a))。需注意的是，電容在200 pF以上時，其大小對材料移除率影響不大(圖5(b))。實驗也發現，在使用200 pF的電容進行放電時，能量足以移除氧化鎵的氧並引發熱裂解，同時不會造成短路，且殘渣很少。這解釋了為什麼在高頻放電電源設計下，火花熔蝕能力與電容大小呈反比關係(圖5(c))。評估火花熔蝕能力，此能力愈高，表示能以更低的放電能量移除等量的材料，也愈適於精微切割加工，表3列出在「等電容」模式下，對氧化鎵材料放電加工的性能表現。

表2 等能量高頻放電加工參數

Parameters	Conditions
Workpiece material	β -Ga ₂ O ₃
Wire-electrode diameter (d _w)	Brass wire (Ø 20 µm)
Material thickness (T _m)	500 µm
Cutting length (L)	400 µm
Working voltage (V)	100 V
1 st /2 nd Discharging capacitance (C)	100/100, 200/200, 300/300, 400/400 pF
Discharging frequency (f)	1 MHz
Feed-rate of wire-electrode (F _r)	0.24 (mm/min)
Dielectric fluid	Lamp-oil

表3 等能量對氧化鎵的放電加工性能表現("-"無評估)

	100 pF	200 pF	300 pF	400 pF
Coulomb per unit of time (I _{ct})(Coulomb/sec)	1×10 ⁻²	2×10 ⁻²	3×10 ⁻²	4×10 ⁻²
Removed volume (V _v)(mm ³)	-	5.45×10 ⁻³	5.59×10 ⁻³	5.84×10 ⁻³
Short-circuit time ratio (S _{tr})(%)	98%	0%	0%	0%
Material removal rate (M _{rr})(mm ³ /min)	-	3.26×10 ⁻³	3.34×10 ⁻³	3.49×10 ⁻³
Spark erosion capability (S _{ec})(mm ³ /Coulomb)	-	2.71×10 ⁻³	1.85×10 ⁻³	1.45×10 ⁻³



(a) 切割的槽寬尺寸

(b) 材料移除率

(c) 火花熔蝕能力

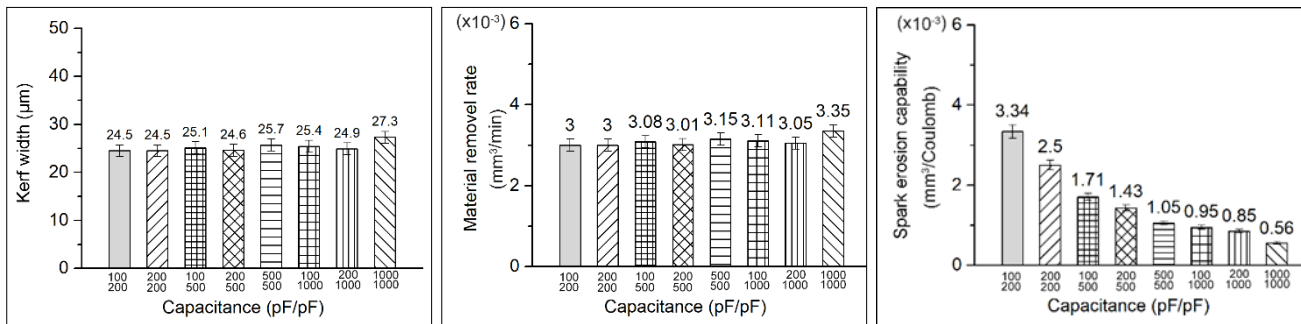
圖 5 非等能量高頻放電電源在等能量模式下的放電加工性能檢視

3.3 非等能量模式的放電加工性能檢視

非等能量高頻放電加工參數如表4所列，共7組非等能量的電容組合。結果顯示，以100 pF/200 pF的電容組合能獲得最窄的切割槽寬尺寸(圖6(a))，不過所有電容組合的切割槽寬尺寸差異很小，且電容大小的使用與材料移除率關係並不大(圖6(b))，暗示在100 pF/200 pF的電容組合作用下，氧化鎵材料即會發生熱裂解，且每發放電能量幾乎都被應用到氧化鎵材料的熱裂解上，即使再提高放電能量，對材料移除影響也很有限。如前述(3.2節)實驗結果，100 pF無法對氧化鎵作有效的材料移除，這表示高峰值電流(High-peak current)(即200 pF)，確實被用到氧化鎵材料的汽化、爆炸與熱裂解；而低峰值電流(Low-peak current)(即100 pF)，則貢獻到小塊狀殘渣與毛邊等的移除，故能精密切割出完整的微溝槽。這也說明了為何以100 pF/200 pF的非等能量電容組合能獲得最高的火花熔蝕能力的原因(圖6(c))。

表4 非等能量(Non-equal energy)高頻放電加工參數

Parameters	Conditions
Workpiece material	β -Ga ₂ O ₃
Wire-electrode diameter (d_w)	Brass wire (\varnothing 20 μ m)
Material thickness (T_m)	500 μ m
Cutting length (L)	400 μ m
Working voltage (V)	100 V
1 st /2 nd Discharging capacitance (C)	{ 100/200, 200/200, 100/500, 200/500, 500/500 , 100/1000, 200/1000, 1000/1000 (pF/pF)
Discharging frequency (f)	1 MHz
Feed-rate of wire-electrode (F_r)	0.24 (mm/min)
Dielectric fluid	Lamp-oil



(a) 槽寬尺寸

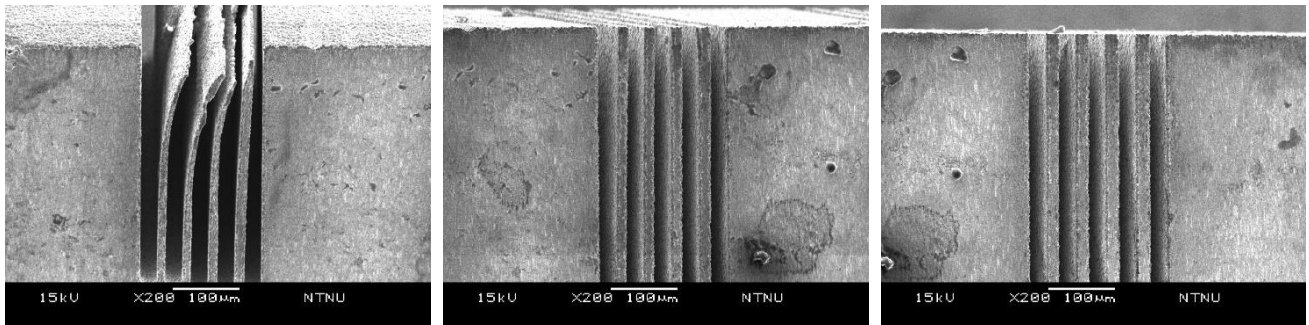
(b) 材料移除率

(c) 火花熔蝕能力

圖6 非等能量高頻放電電源對氧化鎵材料的放電加工性能檢視

3.4 放電電源的放電熱影響

Zahiruddin and Kunieda (2016) [8]提醒，放電加工會引起熱應力場，導致鰭片發生熱變形，且鰭片厚度(Fin thickness)(t_f)愈薄，愈易發生熱變形。所以製作氧化鎵微結構前，需先測試在相同的放電能量下，不同氧化鎵微結構厚度的接受程度。氧化鎵微結構的鰭片厚度設計為三群組(13~16 μ m, 17~20 μ m及21~24 μ m)，每片厚度間隔1 μ m。測試結果顯示，13~16 μ m厚度的鰭片微結構發生熱變形(圖7(a))；當鰭片厚度增加至17~20 μ m時，鰭片沒有受放電熱的危害(圖7(b))，顯見此系列厚度的微結構能藉由氧化鎵材料自身的熱擴散率，將熔蝕熱快速散離，因此熱變形在鰭片厚度17 μ m以上的微結構不會發生(圖7(c))。



(a) $t=13\sim16\ \mu\text{m}$

(b) $t=17\sim20\ \mu\text{m}$

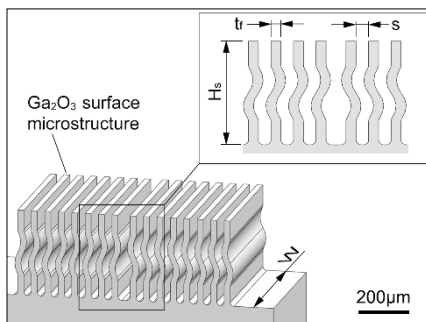
(c) $t=21\sim24\ \mu\text{m}$

圖7 非等能量高頻放電電源的放電熱影響

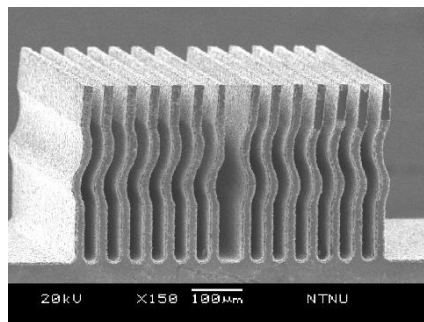
為驗證非等能量高頻放電電源對材料切割成精微結構的可行性，本實驗對氧化鎵材料設計了兩種氧化鎵微結構：具有 14 片曲面微結構的對稱鰭片陣列(圖 8(a))和具有 100 支微細柱狀微結構的探針陣列(圖 8(d))，相關加工參數及工件尺寸如表 5 所列。比起其他半導體材料，氧化鎵能隙更寬，更適合在高電壓、高溫與高頻的嚴苛環境下使用，因此氧化鎵微結構可製作成如場板(Field plate)、柵槽(Grating)及鰭片型(Fins)等造型陣列，可適用於電子元件的微結構或微裝置(Micro device) (Wang et al., 2019) [9]等領域。實驗完成的曲面鰭片(Surface fins)陣列微結構(圖 8(b))具高完整性，高對稱性，鰭片陣列及鰭片間距(Fin space)(s)也具高一致性(圖 8(c))，完成時間約僅 52 mins，比起化學蝕刻(Metal-assisted chemical etching, MACE)製程耗時 120 hrs (Huang et al., 2019) [10]，加工效率極高。在微細柱狀微結構陣列製作方面，先切割 X 方向的微溝槽，然後旋轉 90°後再切割 Y 方向的微溝槽(圖 8(e))。值得注意的是，由於高頻放電電源的每發放電能量(100 pF/200 pF)都非常小，高溫電漿對氧化鎵材料表面的作用深度很淺，因此這兩種微結構的表面幾乎沒有熱裂解發生(圖 8(f))。

表 5 非等能量(Non-equal energy)高頻放電加工驗證參數

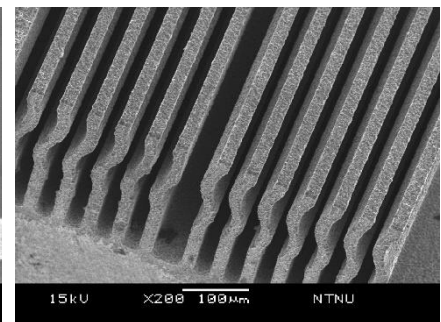
Parameters	Conditions
Workpiece material	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$
Wire-electrode diameter (d_w)	Brass wire ($\text{Ø } 20\ \mu\text{m}$)
Workpiece dimensions	$t=20, s=25, H_s=400, H_p=300, T_m=500\ (\mu\text{m})$
Working voltage (V)	100 V
Discharging frequency (f)	1 MHz
1 st /2 nd Discharging capacitance (C)	100 pF/200 pF
Feed-rate of wire-electrode (F_f)	0.48 (mm/min)
Dielectric fluid	Lamp-oil



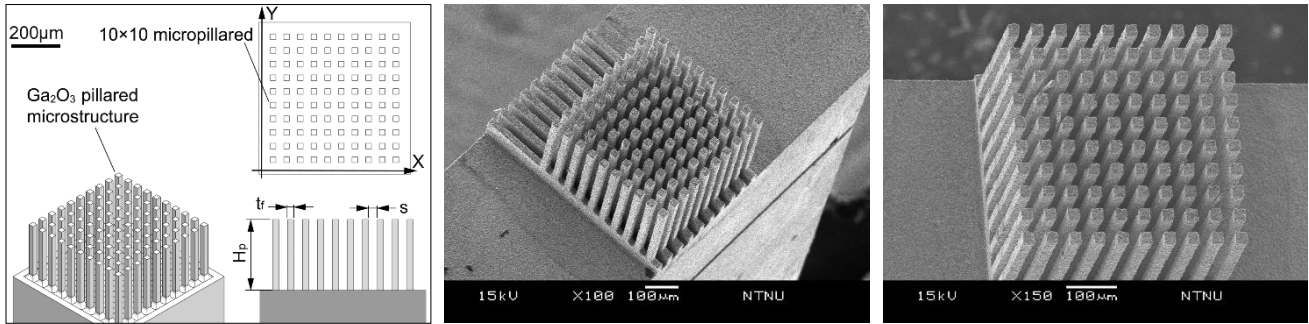
(a) 曲面微結構陣列設計



(b) 成形之曲面微結構陣列



(c) 曲面微結構陣列放大

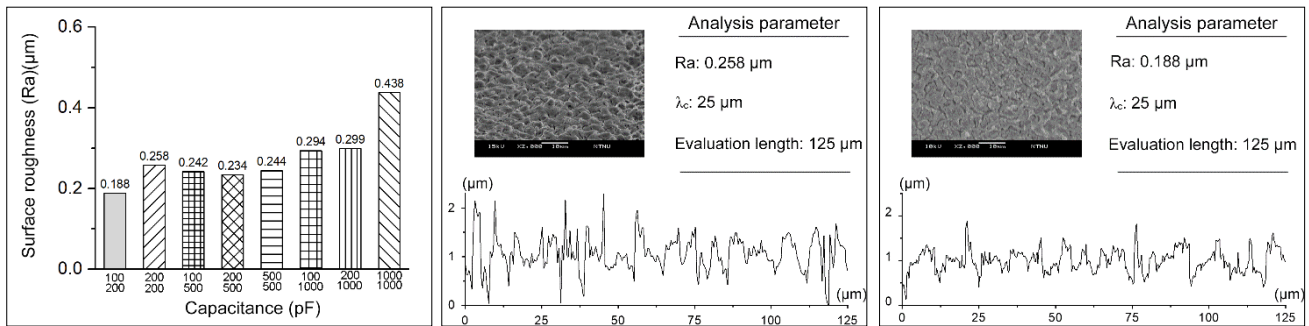


(d) 柱狀微結構陣列設計 (e) 成形之柱狀微結構陣列 (f) 柱狀微結構陣列放大

圖 8 高頻放電電源之放電加工性能實驗驗證

4. 結果與討論

在放電能量測試後，發現以 100 pF/200 pF 的電容組合，能在氧化鎳材料上獲得最好的表面粗糙度(圖9(a))。這是因為，在等電容組合的模式下(如 200 pF/200 pF, 500 pF/500 pF 及 1000 pF/1000 pF)，每發放電都只貢獻到材料的熱裂解，對表面粗糙度的改善沒有幫助；而 100 pF/100 pF 的電容組合(如前述(3.2節)實驗)，無法進行有效的材料移除。在本研究中，非等能量高頻放電電源比起等能量(Equal-energy)放電波列加工所得的表面粗糙度(圖9(b))，可得更優的表面粗糙度(圖9(c))。這意謂以非等能量高頻放電電源對氧化鎳材料加工，有移除材料和對表面「精加工(Finishing)」的效果。「非等能量」於加工過程中，低峰值電流所產生的放電能量非常小且密集，能對高峰值電流加工所殘留的放電坑的微小突出部、加工面上的微細熔疤等進行修整與去除，所以工件表面細緻的放電面是低峰值電流所貢獻的。



(a) 表面粗糙度

(b) 200 pF/200 pF

(c) 100 pF/200 pF

圖9 非等能量高頻放電電源對表面粗糙度的影響探討

5. 結論

本研究成功設計一種「非等能量雙電阻電容高頻放電電源」，適於對半導體材料氧化鎳進行精微結構製作。實驗證實此非等能量高頻放電波列適於氧化鎳材料的高精密切割加工。研究過程對新開發的放電電源性能表現進行定性與定量分析，期望這項新技術的研發，未來能貢獻於半導體、光電與精密電子等產業，以下是本研究的結論摘要：

- (1). 設計的「非等能量雙電阻電容高頻放電電源」，其每發放電能量的作用時間與休止時間都很短，且被熔融或汽化的材料有足夠的時間被凝固成殘渣並被介電液帶走，放電波列規律且密集，實驗證實它能大幅改善傳統電阻電容電源低加工效能的問題。
- (2). 非等能量高頻放電電源能產生高峰值及窄脈衝寬度的電流波形，此類波形可創造出高密度小能量的高溫電漿，使加工的氧化鎳受熱裂解移除的機制大於被汽化移除的機制。



- (3). 透由火花熔蝕能力評估，可了解設計的放電電源對材料的移除效能。實驗結果顯示，100 pF/200 pF的電容組合，可創造出氧化鎂的最高火花熔蝕能力。
- (4). 非等能量高頻放電電源所產生的高峰值電流對氧化鎂材料的汽化、爆炸與熱裂解，能有效提高材料的移除率；而低峰值電流可移除小塊狀殘渣及邊緣毛邊等，有助於改善微結構的表面粗糙度，其表面粗糙度可達Ra0.188 μm (圖9(c)右上)。
- (5). 實驗證實，非等能量高頻放電電源能切割出具高完整性、高對稱性與高一致性的氧化鎂曲面鱗片及微細柱狀微結構陣列，且切割效能遠高於化學蝕刻製程，意謂所設計的非等能量高頻放電電源具高可控性、高效能與高穩定的特性。

6. 誌謝

本研究感謝國科會計畫(MOST 111-2218-E-003-001)經費支援，使研究得以順利完成，在此致上最高的謝意。

7. 參考文獻

1. Bae, J., Kim, H.W., Kang, I.H. Kim, J., 2019. Field-plate engineering for high breakdown voltage $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanolayer field-effect transistors. RSC Advances 9, 17, 9678-9683.
2. Villora, E.G., Teherani, F.H., Look, D.C., Rogers, D.J., Arjoca, S., Shimamura, K., Inomata, D., Aoki, K., 2014. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ and single-crystal phosphors for high-brightness white LEDs and LDs, and $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ potential for next generation of power devices. SPIE 8987, 89871U.
3. Pearton, S., Ren, F., Tadjer, M., Kim, J., 2018. Perspective: Ga_2O_3 for ultra-high power rectifiers and MOSFETS. Journal of Applied Physics 24, 220901.
4. Chen, S.T., Huang L.W., 2021. A micro-energy w-EDM power source based on high-frequency spark erosion for making diamond heat-sink array. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9, 1267-1283.
5. Gallium oxide, TAMURA Corporation, <https://www.tamuracorp.com/electronics/en/index.html>
6. Galazka, Z., Uecker, R., Irmscher, K., Albrecht, M., Klimm, D., Pietsch, M., Brützam, M., Bertram, R., Ganschow, S., Fornari, R., 2010. Czochralski growth and characterization of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals. Crystal Research and Technology 45, 1229-1236.
7. Chen S.T., Chu C.Y., 2017. Fabrication and testing of a novel biopotential electrode array. Journal of Materials Processing Technology 250, 345-356.
8. Zahiruddin, M., Kunieda, M., 2016. Analysis of Micro Fin Deformation Due to Micro EDM. Procedia CIRP 42, 569-574.
9. Wang, S., Chen, K., Zhao, H., He, C., Wu, C., Guo, D., Zhao, N., Ungar, G., Shen, J., Chu, X., Li, P., Tang, W., 2019. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanorod arrays with high light-to-electron conversion for solar-blind deep ultraviolet photodetection, RSC Advances 9, 6064-6069.
10. Huang, H.C., Kim, M., Zhan, X., Chabak, K., Kim, J.D., Kvit, A., Liu, D., Ma, Z., Zuo, J.M., Li, X., 2019. High Aspect Ratio $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Fin Arrays with Low-Interface Charge Density by Inverse Metal-Assisted Chemical Etching, ACS Nano 13, 8784-8792.