

具高深寬比結構之精密快速模具加工研製 The Development of High Aspect Ratio Structure Applied on the Precisely Mold Manufacturing

詹家銘^{1*}、鍾明翰²、許聿翔²、周政賓¹

¹財團法人金屬工業研發展中心

²國立臺灣大學應用力學研究所

*E-mail: cmjan@mail.mirdc.org.tw

摘要

本研究以皮秒雷射(1030nm)具超快、超強、超微的冷加工特性，脈衝寬度在皮秒(10⁻¹²秒)等級，可在加工區域產生高功率密度，具極低熱影響區及非線性多光子吸收特性，進行微奈米等級之微加工。觀察其雷射加工光斑大小、熱影響區、加工深度與加工寬度之關係，開發次波長圓環型孔洞(Sub-wavelength Annular Aperture, SAA)可聚焦成突破繞射極限的微小光點與長焦深特性，以矽薄膜為基材之次波長圓環型孔洞結構的聚焦光點小能量密度高，在遠場呈現點狀聚焦的似貝索光束來達到微鑽孔加工之目的，針對不同材料進行雷射損壞閾值測試確認，並利用 FDTD 模擬找出點狀聚焦條件的最適膜厚、結構半徑大小、波長、玻璃基板、表面電漿與膜厚對聚焦的影響。本技術開發的終端應用包含陶瓷等難加工材料的微切割及鑽孔，與表面製作微奈米級的親水、疏水、耐磨耗功能結構，可簡化製程步驟、縮短製程時間。

關鍵詞：高深寬比、雷射加工、貝索光束

Abstract

We proposed a new method of mold manufacturing based on illuminating picosecond laser source (1030nm) through a sub-wavelength annular aperture (SAA) on metallic film so as to produce Bessel-like beam of sub-wavelength spot size while maintaining large depth of focus. The characteristics of the picosecond laser source were discovered that include high peak power, lower heat affected zone (HAZ), and multi-photon adsorption accompanied with the shorter pulse width (10-12 sec). The silicon nitride-based sub-wavelength annular aperture was potentially able to stimulate the Bessel-like beam with the wavelength scale spot size (~0.8um) in the far-field. We demonstrated the final results of laser machining according to the damage threshold of material, structure design, wavelength, thin film thickness, and etc. Our core design and development can be directly applied on micro-drilling, sawing, texturing, microstructure machining so as to simplify procedure and make process time shorter.

Keywords: High Aspect Ratio, Laser Machining, Bessel-like beam

1. 前言

現代 3C 產品發展趨勢為『輕薄短小』，其中許多的微結構都以特殊工法製作。具有高深寬比結構之模仁，過往都是以半導體製程相容性極強之 UV-LIGA 的製作程序，用摻雜所製作的矽基導電層基板，以光阻為濕式蝕刻之阻擋層，製作乾式蝕刻之二氧化矽阻擋層，最終使用電鑄方法，摻雜磷之矽基導電性基板可獲得與微結構模仁。雷射鑽孔製程（包括孔洞和開口），則可根據使用者的需求在堅硬脆性(如陶瓷)或軟性材料上自行設定形狀，適用於建築玻璃和太陽光電基板，以及用於電子裝置外殼（如智慧手機）的生產等。因為皮秒雷射具超快、超強、超微的特性，脈衝寬度在皮秒（ 10^{-12} 秒）等級，可在加工區域產生超強功率密度，具極低熱影響區及非線性多光子吸收特性，可進行微奈米等級之微加工。本技術的應用包含陶瓷等難加工材料的微切割及鑽孔，於材料表面製作微奈米級的親水、疏水、耐磨耗功能結構，及在金屬表面進行拋光處理等。

依據模具所採用特殊材料，同時考量各製程參數包含：切割面Ra、材料吸收光譜、雷射鑽孔速度、功率、重複率、脈衝寬、波長等，綜整各種測試結果進行前期評估。一般機械的方法無法達成微小鑽孔，需利用近場光學能量超聚焦的方式，透過特殊的鏡組，本研究開發出一款可加工微小孔徑之雷射設備。

2. 文獻回顧

傳統雷射加工受限於光斑大小，最小加工尺寸約至二至五微米，應用此創新金屬圓環型孔結構可改變原有聚焦光束行進模式(NA值大，短焦深)，開發可直接加工傳統雷射加工設備無法製作之精密微結構(如：高深寬比結構(HAR > 10:1))，推升加工既有雷射加工技術與系統設備。由金屬圓環型孔結構基礎，整合皮秒雷射加工技術，產生Bessel-beam效應(藉以突破繞射極限之微小光點與長焦深特性)，克服光學應用繞射極限，使匯聚光點大小可透過入射光波長、光偏極性與搭配透鏡數值孔鏡調變縮小至次微米級。

有鑑於前述光學刻寫技術之困境及解決必要，與國內前瞻學研單位台大團隊合作已進行相關研究，發現圓環型次波長微結構能應用於飛秒雷射設備上匯聚出微小且長焦深的光束圖案，透過現法國Strasbourg奈米結構實驗室主持人Dr. Ebbesen所提出的以金屬表面結構元件突破傳統繞射極限之奈米聚焦現象，可達到光點120nm，焦深大於2um，並結合嚴格耦合波計算與雷射直寫技術，發展出創新奈米直寫設備應用，無須相位光罩曝光技術。傳統高斯(Gaussian)透鏡因為光學繞射極限的限制使聚焦光點及景深(DOF)皆與入射數值孔徑(NA)與波長有關。完美的貝索光束方程式可以表示為，

$$E(r, \phi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \cdot e^{\pm i n \phi} \quad (1)$$

其中 J_n 是第 n 階的貝索函數(Bessel function)， kz 是指縱向的波向量，而 kr 是指橫向的波向量。由此關係式可知，光強不會因為傳遞的距離增加而有衰減的跡象，由此可見，貝索光束具有無繞射光束特性。根據(下圖一)零階貝索光束光強分布圖，其光束樣貌為中心光強最強光點與一階(高階)貝索光束為環狀光點(Doughnut shape)不相同。

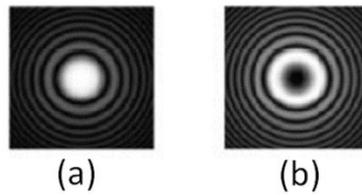


圖 1 (a)零階貝索光束 (b)一階貝索光束

事實上，完美的貝索光束並不存在，故若能產生類似貝索光束，亦即具有長焦深的光束，則可應用曝光顯影或是雷射鑽孔，以達到曝出或鑽出高深寬比且極微小的孔洞結構，以下將介紹兩種產生(零階)貝索光束的方法：

- 圓錐狀透鏡(Axicon lens)法產生零階貝索光束：利用以高斯光束經過圓錐狀透鏡聚焦，使出光在中心軸上會有建設性干涉，產生具類似貝索光束光束。若應用於更小的光點匯聚，則使用紫外光波段短波長準分子雷射光源；但一般的玻璃透鏡會吸收紫外波段，反而造成不到 1%的穿透率，若改換石英材質圓錐透鏡會使成本提高，且由於圓錐狀透鏡本身在製作上就有許多難處，特別是圓尖端部分，會因為缺陷產生不完美的聚焦光束，使得圓錐狀具焦貝索光束法天生上會有一些無法避免的限制。

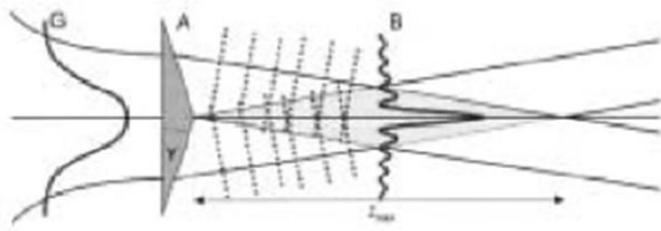


圖 2 以錐狀透鏡產生貝索光束[5]

- 環型孔洞法產生零階貝索光束：另一種產生貝索光束為環形孔洞法，以平面波為入射光源，通過環形的狹縫，狹縫寬度約 $10\mu\text{m}$ ，可將環形狹縫上的每個位置視為點光源為椎狀形狀，此波前再經由透鏡聚焦形成貝索光束。此方法相較於圓錐狀透鏡法，不會有透鏡製作上的瑕疵問題，只需薄透明基材，成本也較低，雖然其穿透率會相對降低，但可以利用較高能量雷射源與可承受損壞閾值(threshold energy)金屬/介電質材料，有機會達到更小聚焦光點的生成。

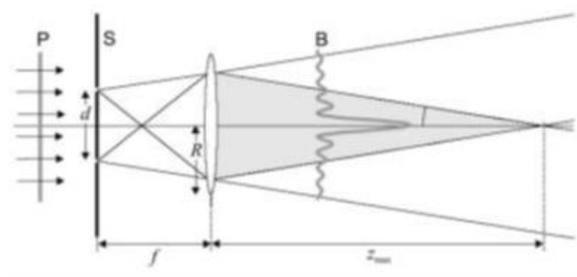


圖 3 環形狹縫聚焦產生貝索光束[7]

傳統高斯(Gaussian)透鏡因為光學繞射極限的限制使聚焦光點及景深(DOF)皆與入射數值孔徑(NA)與波長有關。正因為光學繞射極限的限制，聚焦光點受到入射光波長及透鏡數值孔徑的影響。為了縮小雷射聚焦光斑，科學家們不斷研發各種技巧，例如使用浸潤式微影、環

狀照明和選擇性記錄縱向電場等方式。然而昂貴的短波長光源及稀有的短波長光源透鏡材料造成微影技術發展延遲。所使用的前瞻技術為整合一金屬圓環狹縫結構與雷射加工機台設備，利用Bessel-like光束克服光學繞射極限，使匯聚光點更小，且透過入射光波長、光偏極性與搭配透鏡數值孔鏡可進行調變。依此上述架構本研究擬結合過去台大團隊[1-4]在表面電漿光學頭設計製作與相關理論分析模擬等長期研究成果，與金屬中心既有皮秒雷射系統整合，應用於未來可垂直鑽出更微小的導通孔，使其具有足夠焦深，其創新性為建構於1998年T.W. Ebbesen[6]教授發現金屬材料異常穿透現象之基礎上，與台大研究團隊合作開發應用表面電漿光學所建立數種新穎光學頭設計，包括金屬光學頭(MM)、單邊結構光學頭(AS)、介電質-金屬光學頭(DM)、多通道光學頭(MS)、次波長圓環光學頭(SAA)等[2]，並整合皮秒雷射加工技術以驗證其微細聚焦與長焦深等光學性質與精密加工可行性評估，擬整合金屬環型微孔結構生成Bessel-beam之特殊光學特性，直接應用於雷射加工製作出達次波長尺寸之高深寬比微結構，將有機會利用此技術使系統直接加工出高深寬比結構(HAR > 20:1)，確效本技術開發具有可製作高深寬比微結構之加工能力。

3. 實驗設計

本研究開發之 Bessel-beam 輔助高深寬比微結構雷射加工技術，構想實現執行工作可分為二大部份：

3.1 創新的光學頭設計

建立以圓環型微孔結構基礎之雷射鑽孔高深寬比結構加工技術，將過去應用於飛秒雷射的光學頭，由理論到模擬分析，探究其光學聚焦特性、結構尺寸參數分析與金屬/氧化物或其他非金屬材料基材選擇，針對符合雷射損壞閾值及加工需求，提出創新光學頭設計，以Lumerical FDTD 商用軟體模擬控制不同變因探討對光學頭微結構所聚出光束之影響，找出最適結構幾何參數。

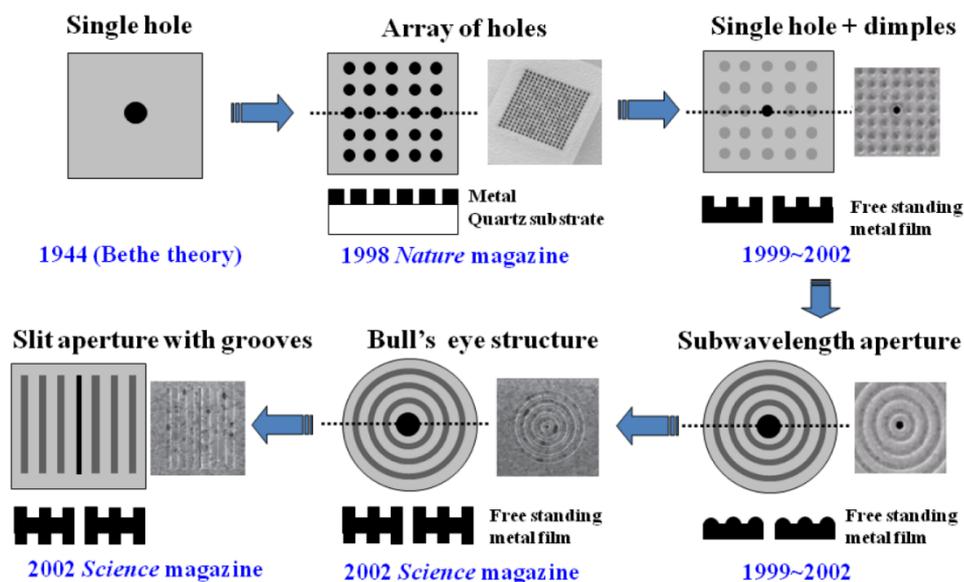


圖 4 創新光學頭設計[1]

於元件設計方面，主要是利用有限時域差分法進行關鍵參數模擬，透過套裝軟體

Lumerical FDTD Solutions(如下圖 5)進行不同的環內外徑、承載基材、狹縫寬度及結構週期性寬度等數值執行模擬分析，評估可出光之光強值、中心波段、出光角度、以及光束極化特性，以期達到 SAA 元件設計用於雷射加工的需求，具有 $3\mu\text{m}$ 以下的焦點，且具有 1:20 得高深寬比焦深。如下圖 6 為 SAA 結構貝索光束生成示意圖，可經由設計得到所需要的長焦深與出光效率高的波段，圖 7 則是 SAA 結構貝索光束電場的模擬結果。

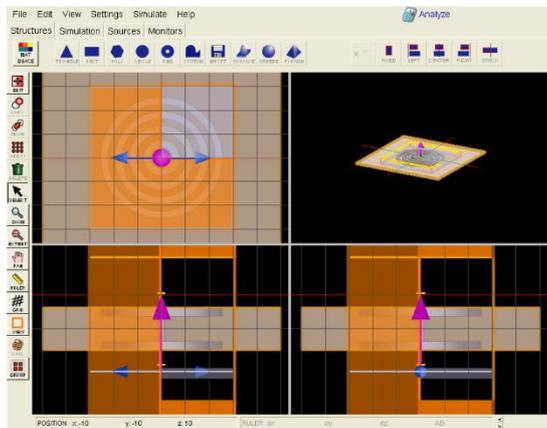


圖 5 創新光學頭模擬分析

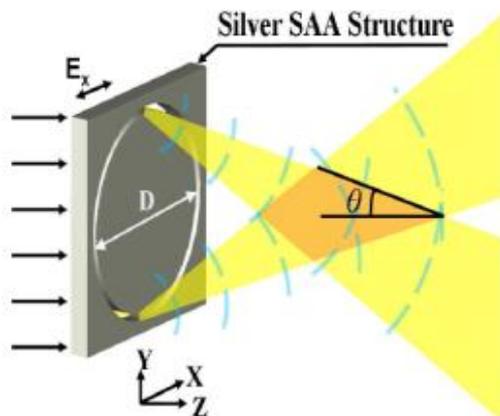


圖 6 SAA 結構貝索光束生成示意圖[3]

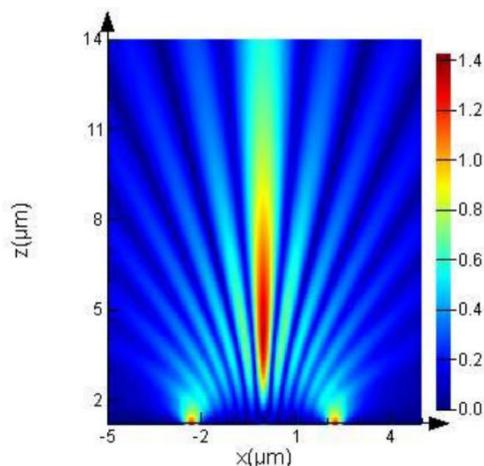


圖 7 SAA 結構貝索光束電場指向性分布圖[3]

3.2 長焦光路元件開發

本研究投入次波長圓環狹縫設計、光學模擬與元件製作量測，完成系統模組整合及優化調校測試。過去台大團隊曾利用單狹縫次波長金屬圓環(Subwavelength aperture annular, SAA)[3]產生貝索光束(Bessel beam)的物理機制，茲因其光束具有長焦深、次波長聚焦能力，規劃出包括長焦元件光學模擬與設計、長焦深光學元件的製造、長焦深光學元件特性驗證與封裝等工作項目，針對計畫中所需之長焦深光學元件產出的性能驗證，將利於後續雷射加工系統模組整合及功能實測。

3.3 長焦光路元件的製造

以台大電子所的聚焦離子束(Focused ion beam, FIB)設備(如下圖 8)，透過圖形定義方式，將長聚焦元件製作出來，同步藉由電子顯微鏡設備去確認製作過程中元件及製程加工的品質，如圖所示，可看到整體製作狀況與細部圓環的製作情形(見圖 9)。



圖 8 聚焦離子束(Focused ion beam, FIB)設備

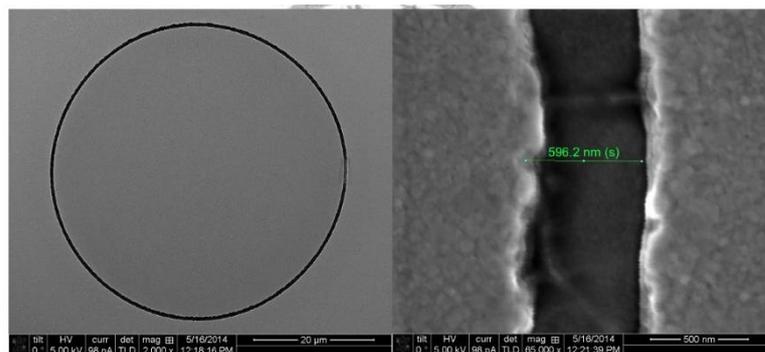


圖 9 離子束製作完成次波長圓環狹縫結構 SEM 圖

3.4 長焦光路元件特性驗證與封裝

經加工完成的成品，將以自製橫向顯微模組觀察出光情形，使用研究團隊自行組立的六軸位移平台、Olympus DP-70 CCD 及精密微動平台，再搭配團隊自行設計的基座，達到橫向觀察光學顯微鏡的量測，確認長焦深光學元件的光學特性，尤其是對雷射加工所使用波段與所形成的長焦深長度，進行元件特徵評估以及與設計的驗證。最後將整個元件封裝於載台，配合雷射高精密結構的設計與定位系統的需求，使長焦深光學元件容易被後續雷射加工使

用。

3.5 設計光學頭與皮秒雷射加工設備系統整合

利用皮秒雷射加工設備，結合過去所設計的光學頭微結構設計，對矽基板以及金屬基材進行鑽孔加工，完成相關夾治具設計製作、加工程序與控制變因確認，以及加工環境基礎模組建置，根據所使用的雷射光波長、單發最大脈衝能量調變，利用導光結構由光學頭聚焦能量至待鑽試片，針對非金屬的材料以及不產生表面電漿的材料確認是否在遠場仍會形成似貝索光束，是否有強的穿透光強，進一步確認非金屬材料以及金屬與氧化物組成材料結構形成似貝索光束的原因及特性，嘗試藉由不同圓環直徑、膜厚、操作波長、玻璃基材厚度、入射角度等變因參數，分析加工量測結果是否與數值模擬分析吻合。

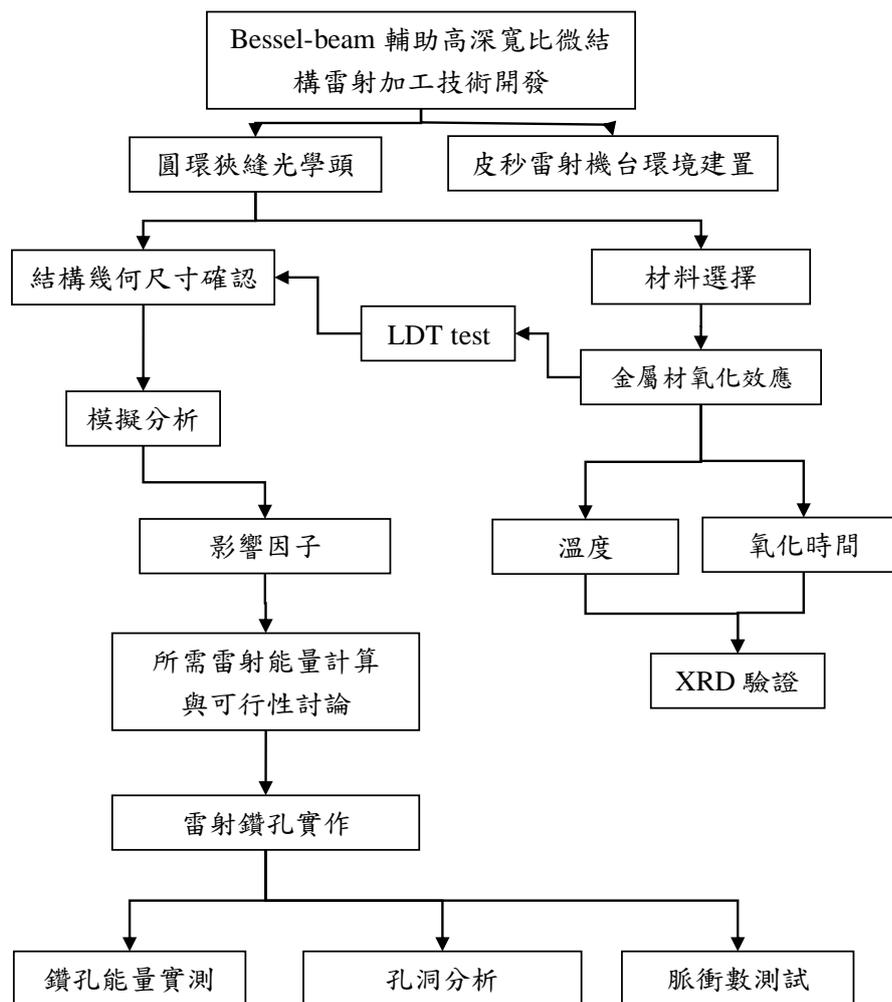


圖 10 開發流程

4. 結果與討論

本研究設計出適合用於1030nm雷射的貝索光束（Bessel beam）加工光學頭，主要使用中空圓環孔洞投射出貝索光束，使聚焦後的雷射具有長焦深與次微米聚焦點，同步也使用經過特殊設計的光柵產生表面電漿，利用其幾何特性，將產生的表面電漿引入中空圓環孔洞中，進而引起二次表面電漿共振，改善中空圓環孔洞穿透率低的缺點，製作成品如圖11(a)所示，

並且也利用雙錐狀透鏡的光路，如圖11(b)，使光預先聚焦成圓環光如圖11(c)，更進一步地提高了穿透光的強度。為配合高深寬比加工需要，在中空圓環上，也進一步擴大到直徑500um，延長工作距離。如圖12(a)為設計的模擬結果，圖12(b)、(c)則為X-Z剖面圖與Z軸能量分佈，可以得知最終產生聚焦點最強時聚焦點為0.9um，焦深長度為650um。圖13則為所製作光學頭實際進行量測的光場圖。

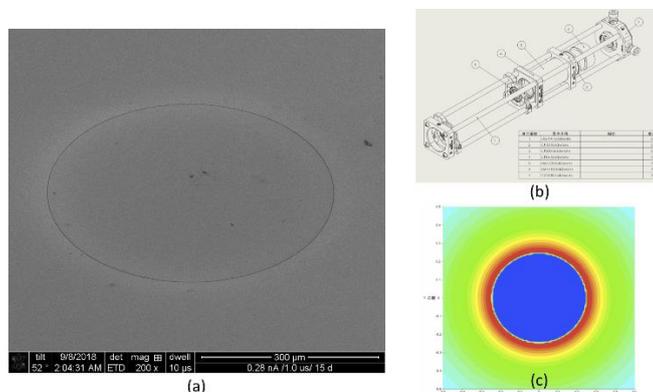


圖 11 (a)光學頭 SEM 圖(b)雙錐狀透鏡光路圖(c)模擬圓環光聚焦能量分佈圖

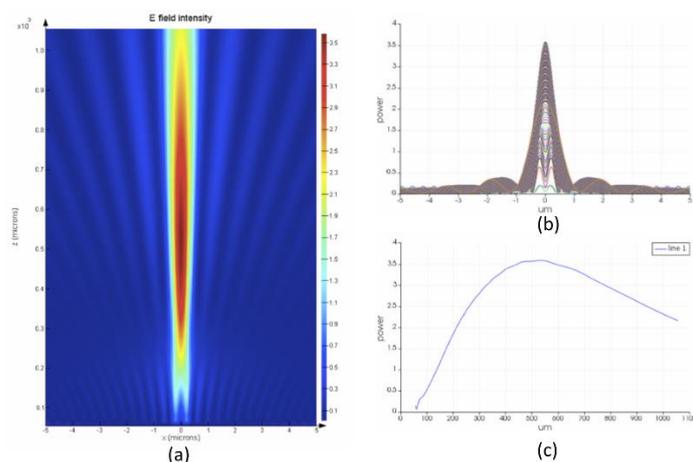


圖12 (a)模擬聚焦光場圖(b)X-Z剖面圖(c)Z軸能量分佈圖

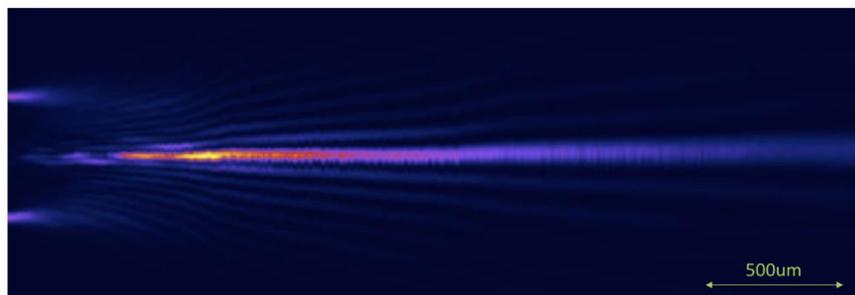


圖13 光學頭出光光場量測圖

5. 結論

本研究整合矽薄膜為基材之次波長圓環型孔洞結構與皮秒雷射(1030nm)系統，具超快、

超微的冷加工特性，開發次波長圓環型孔洞(Sub-wavelength Annular Aperture, SAA)可聚焦成突破繞射極限的微小光點與長焦深特性，可在加工區域產生高功率密度，並利用FDTD模擬找出點狀聚焦條件的最適膜厚、結構半徑大小、波長、玻璃基板、表面電漿與膜厚對聚焦的影響。實際觀察在遠場呈現點狀聚焦的似貝索光束來達到微鑽孔加工，針對不同材料進行雷射損壞閥值測試確認，成功開發出具高深寬比結構之模具加工方法研製。

6. 參考文獻

1. C. K. Chang, D. Z. Lin, C. S. Yeh, C. K. Lee, Y. C. Chang, M. W. Lin, J. T. Yeh, and J. M. Liu, "Similarities and differences for light-induced surface plasmons in one- And two-dimensional symmetrical metallic nanostructures," *Optics Letters* 31, 2341-2343 (2006).
2. L. B. Yu, D. Z. Lin, Y. C. Chen, Y. C. Chang, K. T. Huang, J. W. Liaw, J. T. Yeh, J. M. Liu, C. S. Yeh, and C. K. Lee, "Physical origin of directional beaming emitted from a subwavelength slit," *Phys. Rev. B* 71, 4 (2005).
3. C. K. Lee, C. L. Lin, D. Z. Lin, T. D. Cheng, C. K. Chang, L. B. Yu, and C. S. Yeh, "Developing a nanowriter system: Simulation and experimental set-up of a plasmonic-based lens design," in *Progress on Advanced Manufacture for Micro/Nano Technology 2005, Pt 1 and 2* (Trans Tech Publications Ltd, Zurich-Uetikon, 2006), pp. 1-6.
4. D.-Z. Lin, T.-D. Cheng, C.-K. Chang, J.-T. Yeh, J.-M. Liu, C.-S. Yeh, and C.-K. Lee, "Directional light beaming control by a subwavelength asymmetric surface structure," *Optics Express* 15, 2585-2591 (2007).
5. H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes," *Phys. Rev.* 66, 163-182 (1944).
6. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* 391, 667-669 (1998).
7. S. Astilean, P. Lalanne, and M. Palamaru, "Light transmission through metallic channels much smaller than the wavelength," *Opt. Commun.* 175, 265-273 (2000).
8. Q. Cao and P. Lalanne, "Negative role of surface plasmons in the transmission of metallic gratings with very narrow slits," *Phys. Rev. Lett.* 88, 4 (2002).
9. S. A. Darmanyan and A. V. Zayats, "Light tunneling via resonant surface plasmon polariton states and the enhanced transmission of periodically nanostructured metal films: An analytical study," *Phys. Rev. B* 67, 7 (2003).
10. L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, K. M. Pellerin, T. Thio, J. B. Pendry, and T. W. Ebbesen, "Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays," *Phys. Rev. Lett.* 86, 1114-1117 (2001).
11. E. Altewischer, M. P. van Exter, and J. P. Woerdman, "Plasmon-assisted transmission of entangled photons," *Nature* 418, 304-306 (2002).
12. H. F. Ghaemi, T. Thio, D. E. Grupp, T. W. Ebbesen, and H. J. Lezec, "Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes," *Phys. Rev. B* 58, 6779-6782 (1998).