

同軸含硼聚晶鑽石輪刀開發應用於細胞鏡檢晶片模仁製作研究

Development of a co-shaft BD-PCD wheel-tool for research of a chip mold-core fabrication for cells microscopy examination

陳順同^{1*}、張智賢²、黃立文²

Shun-Tong Chen^{1*}, Chih-Hsien Chang², Li-Wen Huang²

^{1,2} 國立臺灣師範大學機電工程學系

^{1,2} Department of Mechatronic Engineering, National Taiwan Normal University

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

摘要

本研究提出一種「同軸含硼聚晶鑽石輪刀」製作的技術，成功應用於開發模具鋼的「細胞鏡檢晶片模仁」，並透過奈米深度研削技術，突破鑽石與碳鋼間，化學親和性(Chemical affinity)的屏障，能使鑽石輪刀維持在 SP³ 的結構進行研削。研究之初，設計並發展雙軸式高精微 CNC 工具機，以開發線式放電研削(Wire Electrical Discharge Grinding, WEDG)技術，主要目的在建構同軸(Co-shaft)且薄刃的含硼聚晶鑽石輪刀(Boron-doped Polycrystalline Composite Diamond, BD-PCD wheel-tool)。利用此同軸輪刀，以「線上高速快淺研削」對 NAK80 模具鋼進行陣列微溝加工。實驗證實，因線上成型鑽石輪刀，所以輪刀與主軸間的同心度(Concentricity)可獲致最高，溝槽的研磨加工能以主軸原始的最高同心精度進行，不但可獲極高穩定度的研削，且因輪刀未被拆卸，故其偏擺量最低，不但可大幅省卻刀具繁瑣校正的時間，更可獲得最小的溝槽槽寬。另外，因採奈米深度研削，故極淺切深使鑽石輪刀能處於常溫狀態下加工，抑制了鑽石中的碳原子與鐵原子親和的速度，故材料移除機制仍容許鑽石輪刀在鑽石結構下，對模具鋼的鐵原子進行差排剪切。此外，為使模仁能一次性完成加工，本研究亦於開發的工具機上建構立式拋光軸，以進行模仁表面的線上精拋，並移除陣列微溝毛邊，表面粗度可達 Ra0.045 μ m。

關鍵字：含硼聚晶鑽石、同軸、細胞鏡檢晶片、線上高速快淺研削

Abstract

The study presents a novel approach to the fabrication of a biomedical mold by using a developed BD-PCD wheel-tool. Firstly, a dual-spindle ultra-precision CNC machine tool is designed. A WEDG mechanism is built on the machine tool to machine a BD-PCD wheel-tool with high co-shaft accuracy and thin grinding-edge. The good electrical conductivity of BD-PCD allows for an ultra-thin grinding-edge of 5- μ m thickness to be produced on the wheel blank. A technique of in-situ high-speed fast-shallow grinding is proposed for precisely microgroove array generation on NAK80 mold steel. Nanometric grinding depth results in much less friction allowing for the cold machining conditions and preservation of diamond's SP³ bond structure. It overcomes the traditional obstacles

to using diamond to machine steel by having excellent metal removal rates. To precisely polish the mold-core and remove burrs from grooves' edges, a vertical polishing spindle is designed on the machine tool. The surface roughness of the microgroove is measured and achieved within Ra0.045 μm . Experimental result proved that the wheel tool can work at room temperature since grinding is controlled below nano depth resulting in decreasing the affinity between ions of carbon and iron. This makes the diamond wheel-tool easy create a dislocation for iron atoms.

Keywords: Boron-doped polycrystalline composite diamond, Co-shaft, Cell microscopy examination chip, In-situ high-speed fast-shallow grinding

1. 前言

近年來，半導體、光電與生物醫療器材等科技產業，產品皆朝向輕、薄、短、小方向發展，為了提升製造技術，製造業多朝向自動化、高效率化與微型化發展。其中，關係人類健康的生物晶片市場，包含DNA、蛋白質、實驗室晶片及新開發生物晶片等產品，更是蓬勃發展。生物晶片應用範圍非常廣泛，包含血液分析、健康診斷、環境及藥物分析等。以細胞鏡檢晶片(Cell microscopy examination chip)為例，晶片材料多以玻璃製成，並以雷射技術加工製成[1]。為節省鏡檢成本，玻璃晶片經常需重複清洗使用，不但過程中易遭感染，甚至破裂傷及檢驗人員，所以鏡檢晶片若能以塑膠製成，則可大幅降低成本，並獲致安全精確的鏡檢目標。由於受檢細胞相當小(紅、白血球直徑分別約8 μm 及12 μm)，所以細胞鏡檢晶片模仁的特徵尺寸(Feature size)也相對非常微小，相應的製造設備，包括模具、刀具及治具，也需隨之微小化。微型化技術包含黃光微影蝕刻、X光深刻(LIGA)等，但其設備投資都相當昂貴，故適於大量生產，對多樣變數的模具，或非矽基元件的製造，都不適合。鑒此，本研究先行開發「雙軸式高精微CNC工具機(Dual-spindle micro CNC machine tool)」，並以含硼聚晶鑽石進行線上旋轉放電成型，再針對NAK80模具鋼，作線上微溝陣列的開溝加工。由實驗證實，本研究能以同軸鑽石輪刀於模具鋼上成功開發出線寬8 μm 的陣列微溝模仁，並成功量產出PMMA的生醫細胞鏡檢晶片。

2. 同軸鑽石輪刀導電原理

單晶鑽石(Monocrystalline diamond)的絕緣性極佳，這是由於在四價層電子的碳原子結構中，碳原子彼此形成四個共價鍵(Covalent bond)。所有的電子穩固地拘束在四個共價鍵上，因此無任何自由電子可供導電之故。在適當溫度下，當鑽石摻雜(Doping)微量硼(Boron)元素後，硼原子便會取代碳原子，並釋放出電子。電子被釋放後，留下一個空位，稱為電洞(E-hole)，便可使鑽石帶正電荷，如圖1所示[2]。摻雜的硼原子愈多，鑽石的導電性愈好，不過，鑽石的硬度也會受其影響。因此，微量的硼原子便可使鑽石形成具有微弱導電的能力，且又不失其高硬度的特性。鑽石一旦能導電，儘管硬度極高，都可用微細線切割放電加工技術(Micro w-EDM)，切出極微細的幾何外型。圖2所示為一般聚晶鑽石和含硼聚晶鑽石，在相同切割條件下的平坦度比較。一般聚晶鑽石是絕緣的，僅有微量的鈷(Cobalt)當催化劑(Catalyst)，扮演導電角色，所以鑽石不易被加工；而含硼聚晶鑽石因本身具導電性，故可透過微細放電，高精度地加工出精細的幾何精度與表面粗糙度[3]。在另一方面，紅血球直徑約8 μm ，為兼顧鏡檢的視野與不使

紅血球駐留於鏡檢晶片檢驗區的田埂(Ridge)上，模仁微溝寬度特徵尺寸設計為 $8\mu\text{m}\pm 0.5\mu\text{m}$ ，若使用一般電鑄磨輪鑽石輪刀，則輪刀上的磨粒，最好的粒徑尺寸約為 $0-2\mu\text{m}$ [4]，以便於單一溝寬下，至少有3-5顆磨粒參與研削；但電化學沉積很難均勻控制磨粒的分佈，所以本研究以含硼聚晶鑽石作為輪刀基材，並透由自行開發的旋轉式微放電加工技術，加工輪刀刀寬至 $5\mu\text{m}$ 以下。

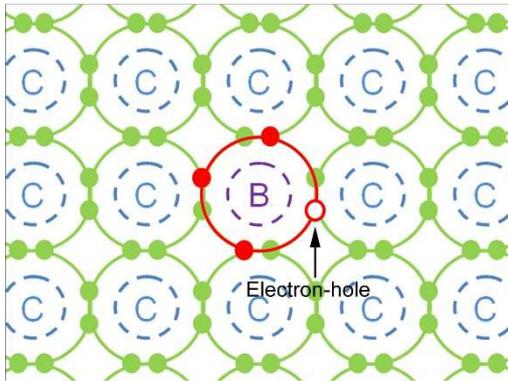


圖1 含硼聚晶鑽石導電原理

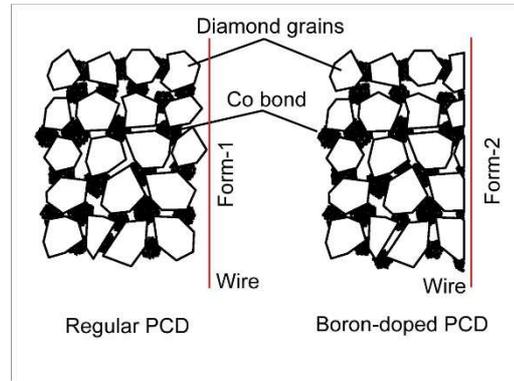
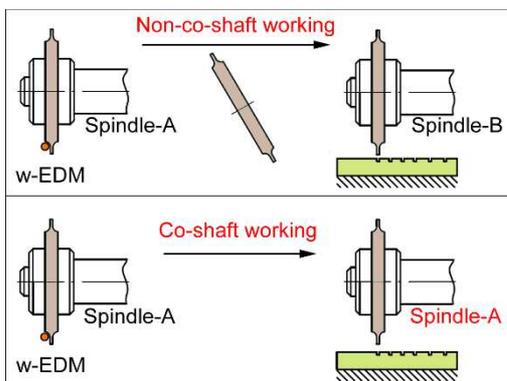


圖2 一般PCD與BD-PCD放電切割平整度比較

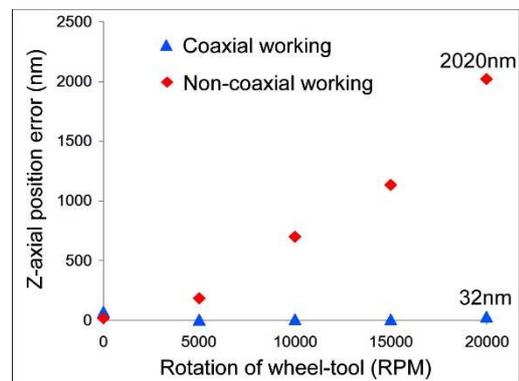
3. 製程技術設計

3.1 同軸加工技術設計

本研究主要以含硼聚晶鑽石為輪刀素材，配合自行開發的「雙軸式高精微CNC工具機」，製作陣列微溝模仁。為使微溝槽具有極窄寬度，本研究提出一種同軸研削(Co-shaft grinding)的技術，如圖3(a)所示，所謂同軸研削是鑽石輪刀在同一支高速主軸上，被削正(Truing)，削銳(Dressing)及研削微溝槽。由於鑽石輪刀心軸都是同一支，所以輪刀被修整完成後，會以最高的同軸精度(Co-shaft accuracy)進行微溝槽成型研磨，如此，輪刀具有最小的偏擺與振動，能使研磨的溝槽獲致最細寬度；圖3(b)所示係輪刀刀軸位置誤差比較。



(a) 鑽石輪刀之非同軸與同軸設計



(b) 鑽石輪刀軸位置誤差比較

圖3 鑽石輪刀軸之非同軸與同軸加工比較

3.2 晶片模仁製程技術設計

模具尺寸愈小，精度要求愈高。為能符合鏡檢晶片模仁的高加工精度需求(模仁所有公差 $< \pm 1.0 \mu\text{m}$)，本研究設計一線上模仁成型之製程技術，如圖4(a)所示。如前段所述，含硼聚晶鑽石具導電性，故於鑽石輪胚中心，先以放電鑽孔(EDM Hole-drilling)及線切割(w-EDM)技術，成型的錐度孔(1:8)，以便使輪刀胚料精密定位於高速主軸，錐度配合可使輪刀與刀軸獲致自動對心效果，如圖4(a)-(1)所示；接續在工具機上進行旋轉式線上微放電成型加工，以製作刀厚 $5\mu\text{m}$ 的成型聚晶鑽石輪刀切刃，如圖4(a)-(2)所示；由於輪刀線上成型，輪刀與高速主軸彼此可獲致最高的同軸精度，當輪刀對模具鋼進行高速快淺研削(High-speed & fast-shallow grinding)時，便可獲得高精度、高平整度，且為最窄寬度的陣列微細溝槽，如圖4(a)-(3)所示；加工完成的模仁不拆卸，輪刀軸直接切換成立式拋光軸，透由鑽石膏與軟性羊毛氈，對陣列細溝溝緣進行毛邊(Burrs)拋除與模仁表面拋光加工，如圖4(a)-(4)所示，完成的細胞鏡檢晶片模仁，即進行射出成型，如圖4(a)-(5)，最後便得圖4(a)-(6)的PMMA細胞鏡檢晶片。

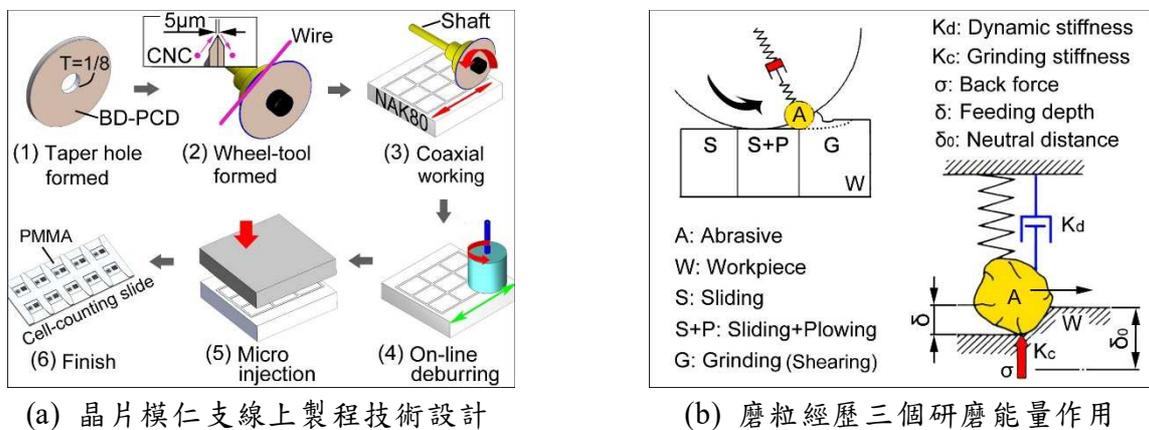


圖 4 線上模仁成型製程設計與研磨能量作用

類似傳統磨削加工，微奈米研削具足夠淺的研削深度，Malkin and Joseph [5]認為磨削過程中，工件與磨粒經歷了三個研磨能的作用，包括滑移能(Sliding energy)，犁切能(Plowing energy)，與磨屑成形能(Chip formation energy)，如圖4(b)所示。所以總研削能(P)(Watts)可表示如式(1)所示。其中， P_{sl} ， P_{pl} and P_{ch} 分別為滑移能、犁切能與磨屑成形能。

$$P = P_{sl} + P_{pl} + P_{ch} \quad (1)$$

就磨粒而言，從滑移階段便因滑移而受背分力 σ (Back stress)的作用，直至研削結束。其受力可由圖4(b)所示，磨粒背分力 σ 可由式(2)與(3)表示。

$$\sigma = K_c \delta \quad (2)$$

$$\sigma = K_d (\delta_0 - \delta) \quad (3)$$

其中， K_d 為磨粒的動態剛性， K_c 為研削剛性， σ 為磨粒A的背分力， δ ：進給深度， δ_0 ：支撐磨粒的彈簧系統中立點，令式(2)=式(3)，便可得式(4)：

$$\delta = \left[\frac{K_d}{K_c + K_d} \right] \delta_0 \quad (4)$$

由式(4)得知，要提昇晶片模仁溝槽研削面的品質，需使研削深度 δ 降低，才能獲得好的表面粗糙度，且需降低磨粒的動態剛性 K_d 及提高系統剛性 K_c ，故本研究所開發的「」以龍門式架構(Gantry framework)設計，用以提高研削系統的剛性。

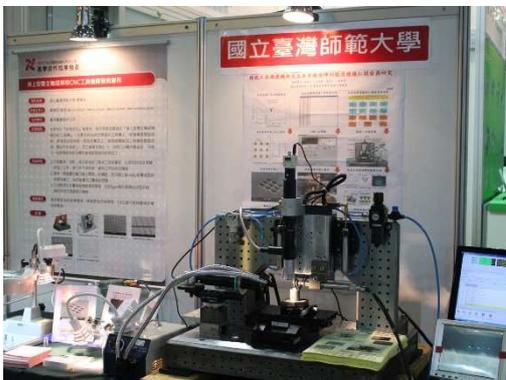
4. 雙軸式高精微CNC工具機設計

4.1 研削系統設計

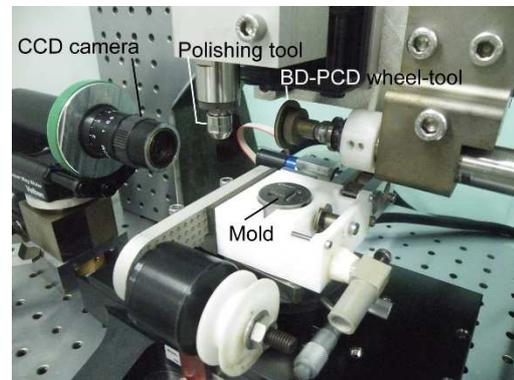
細胞鏡檢晶片模仁係開發於 NAK80 模具鋼上，而其上的陣列細溝射出成型後，為晶片鏡檢面積上的田埂(Ridge)，如上述，為防止血球細胞滯留於晶片田埂上，陣列細溝特徵尺寸設計為 $8 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ，這是一般精密加工機無法完成的精度，亦很難由其他微製造技術完成。為此，本研究自行開發設計高剛性「雙軸式高精微 CNC 工具機」。此工具機解析度達 1nm，定位精度 $0.1\mu\text{m}$ ，全行程 $110 \times 110 \times 60\text{mm}$ ，可執行高精度多軸同動插值加工。而雙主軸中的臥式軸，負責微溝槽的高速快淺研削成型；微溝毛邊則以立式軸進行線上拋光，故細胞鏡檢晶片模仁於全製程中，無須拆卸，每道製程都可在線上完成，模仁與輪刀不須重複對位校正，可大幅省卻繁瑣校正時間；且輪刀被線上精密成型，故輪刀軸能以原始同心精度作線上加工，獲致極高穩定度的溝槽成型研削，圖 5(a)為雙軸式高精微 CNC 工具機完成之外觀。

4.2 複合式工作槽設計

為使細胞鏡檢晶片模仁獲致精密微細溝槽製造，本研究提出一種線上研削(In-situ grinding)的技術，亦即模仁素材固定於加工槽中，改變刀具以便使用不同加工機制對晶片模仁加工。因此，本研究進行複合式工作槽(Hybrid working tank)設計，工作槽包括線式放電研削機構，能對含硼聚晶鑽石輪刀進行旋轉式線切割成型加工；亦能使模仁在水平方向旋轉所需角度，以進行不同方向的研削及拋光。而雙軸設計可執行臥、立兩用加工，透由不同製程技術的切換，模仁無需拆卸，故無需校正，可高精度一次成型，複合式工作槽設計如圖 5(b)所示。



(a) 開發完成的高精微溝槽研削系統



(b) 複合式工作槽設計

圖5 雙軸式高精微CNC工具機設計開發

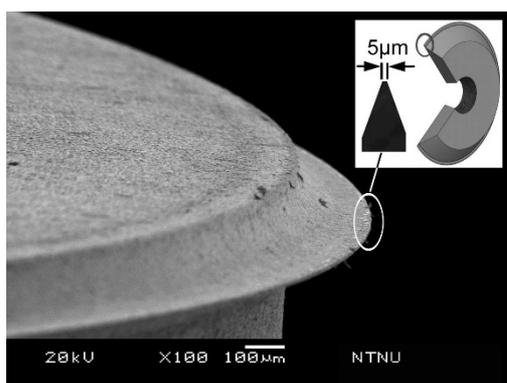
5. 實驗方法

5.1 含硼聚晶鑽石輪刀成型

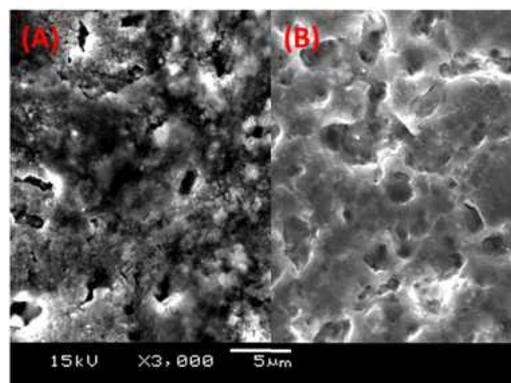
含硼聚晶鑽石係將無數微粒參雜硼的單晶鑽石，以高溫高壓燒結於碳化鎢基材上而成[6]，有別於一般單晶鑽石，燒結塊邊緣類似磨輪微結構，具銳利切邊，故製成圓片即可成鑽石磨輪。因具良好導電性，故可放電成型，此種刀具相當適合應用於硬脆材料的微溝研削。為使高速主軸獲致高精密耐磨耗特性，本研究選用高精密全陶瓷珠當主軸軸承，因陶瓷珠不導電，輪刀接受微放電修整時，不會有因軸承滾珠產生旋轉放電而發生磨耗現象。轉軸外環設計以彈簧壓力使碳刷與主軸緊密結合，以利鑽石輪刀放電成型。本研究利用「電晶體放電電源」將鑽石輪刀以線式放電削正技術成型；接續於研削系統上，以「R-C放電電源」，搭配精密載台的微位移控制，進行精密放電之輪刀銳化，能量選用如表1所示，實驗結果顯示，線上旋轉放電能精密控制鑽石輪刀尖端刀寬達 $5\ \mu\text{m}$ 以內，如圖6(a)所示。圖6(b)為使用不同放電迴路加工之表面結果比較，以「電晶體放電電源」加工的結果，顯示PCD具嚴重的表面變質層(Surface degenerating layer)，推測可能原因是高能量導致石墨化結果；反觀，以「R-C放電迴路」加工，PCD表面可得較佳的平坦度，而放電熔蝕形成的微凹坑，恰可當輪刀研削加工時，所需的屑袋(Chip-pocket)。

表1 含硼聚晶鑽石輪刀放電銳化成型參數

Parameters	Roughing	Finishing
Voltage	110 V	80 V
Capacitance	20,000 pF	1,500 pF
Speed	500 rpm	500 rpm
Feed-rate	0.06 mm/min	0.04 mm/min



(a) 旋轉放電成型的含硼聚晶鑽石輪刀



(b) 左:電晶體放電表面，右:R-C放電表面

圖6 含硼聚晶鑽石輪刀之銳化成型

5.2 高速快淺研削技術

研削(Grinding)係以磨輪上的磨粒作為切刃與工件間產生磨削作用，透由剪應力，移除微量材料的方法。由研削軌跡得知，磨粒切刃為一擺線(Cycloid)曲線，由平面研削可推導出式(5)關係式，其中， V :磨輪圓周速度(m/min)， v :工件移動速度(mm/min)， Δ :磨輪徑向進給切深(mm)， D :磨輪直徑(mm)， g_m :最大磨粒進給深度(mm)， a :輪刀磨粒切刃間隔(mm)。

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{D\Delta - \Delta^2} - (v/V)a}{(D/2) - g_m} \quad (5)$$

在一般研削條件中可得知， $D \gg \Delta$ ， $D \gg a$ ， $V \gg v$ ，因此式(5)可近似式(6)，將式(6)帶入式(5)，可得式(7)如下：

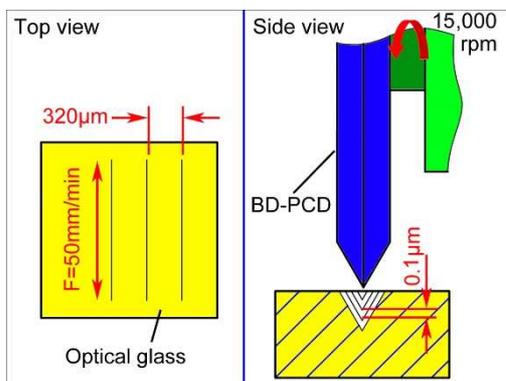
$$\sin \theta = 2\sqrt{\frac{\Delta}{D}} \quad (6)$$

$$g_m = \frac{v}{V} a \sin \theta = 2a \frac{v}{V} \sqrt{\frac{\Delta}{D}} \quad (7)$$

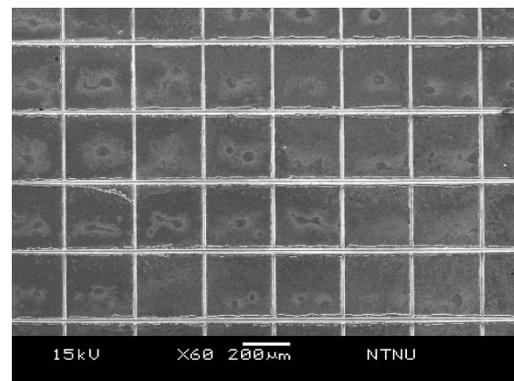
使用聚晶鑽石輪刀，鑽石磨粒間距幾乎相連，意謂式(7)中的 a 值相當小，故需採淺研削模式，以降低每顆磨粒的負載及避免填塞發生。為獲致高材料移除率，在淺研削(即降低 g_m 值)模式下， V 值需提高。因此，本實驗以每道切深500 nm進行微量的材料移除，並以高研削速度和快速進給模式，進行微溝槽創成，此謂「高速快淺研削(High-speed & fast-shallow grinding)」，參數如表2所示。透由切屑被快速且超薄量去除，工件與刀具均能維持在常溫狀態下加工，故可避免鑽石刀具因溫升而導致石墨化(Graphitization)問題發生。再者，單位時間內，快速進給所累積的行程，也能有效提高材料移除率，減少磨削阻力及磨粒切刃的磨耗，除了縮短加工時程，微溝陣列獲致快速成型外，更能精密控制微溝尺寸精度、幾何精度與表面粗糙度。圖7(a)為本研究設計的高速快淺研削示意，圖7(b)為聚晶鑽石輪刀於NAK80模具鋼上進行鏡檢晶片模仁之陣列微溝粗研削的成型結果，因NAK80模具鋼屬延性材料，微溝槽邊緣易有毛邊發生，將於下一階段製程中移除。

表2 高速快淺研削參數

Parameters	Conditions
Spindle speed	18,000 rpm
Cutting depth	500 nm/stroke
Total cutting depth	11 μm
Coolant	Cold air + Oil mist



(a) 高速快淺研削示意圖

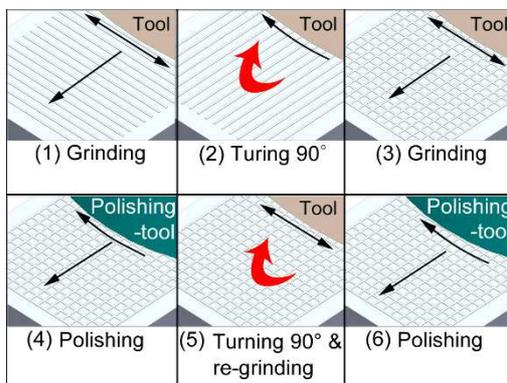


(b) 鏡檢晶片模仁陣列微溝粗研削

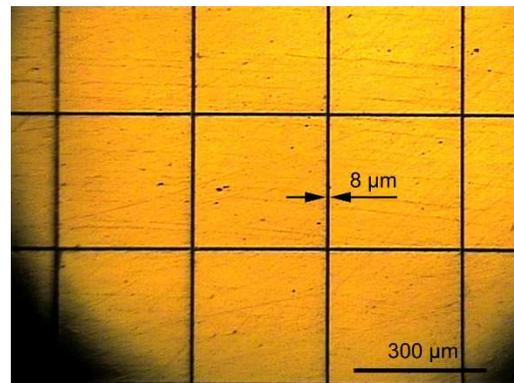
圖7 高速快淺研削技術

5.3 晶片模仁拋光與射出成型

材料研削過程中，磨粒與切屑彼此經歷摩擦(Friction)、聲切(Plowing)與磨削(Grinding)三歷程，輪刀切入材料，於聲切過程中，磨屑因磨輪劃破材料而發生上翻與外揚，部份磨屑因剪力而破裂並飛離，但部份磨屑尚黏著於材料上，於微溝溝緣形成毛邊，此對微溝品質影響甚巨，本研究透由雙軸式設計，在工件不拆卸不移位之下，直接切換立式軸，執行精拋加工。拋光以#8,000(粒徑 2-4 μm)鑽石膏(Diamond paste)加入模仁表面，再透由軟質地羊毛氈慢速淺進給，透由拋光加工可將毛邊移除，獲得相當好的微溝槽，以及降低模仁表面粗糙度至 Ra0.021 μm 。在十字溝槽交接處，研削力會促使毛邊殘屑轉至另一溝槽中，故本研究設計微溝拋光與毛邊移除的製程，如圖 8(a)所示，模仁於一面拋光完畢後，再由工作轉盤轉回 90°，由鑽石輪刀沿原 CNC 路徑再研磨微溝，幾乎可完全移除溝槽內的殘屑。圖 8(b)顯示拋光後的模仁表面，顯示本研究所提製程技術，均可獲致清晰且線寬 8 μm 的微溝陣列。



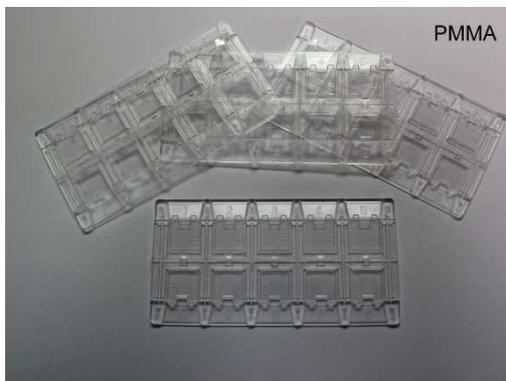
(a) 晶片模仁陣列微溝拋光製程



(b) 細胞鏡檢晶片模仁設計

圖8 晶片模仁拋光製程設計

成型的微溝陣列模仁以 PMMA 材料進行射出成型，可獲得與模具相同的棋盤網格，達量產捨棄式(Throw away)細胞鏡檢晶片目標。圖 9(a)所示係以開發的晶片模仁進行精微射出成型後，商業化的 PMMA 細胞鏡檢晶片。在一片 PMMA 材料上，設計 10 個鏡檢室(Microscopic examination chambers)，提供 10 個檢體使用。圖 9(b)為晶片檢驗室的臨床實驗，它能使細胞駐留其中，透由單位檢體容積比例，快速計算出單位面積中的細胞數量，廣用於判別人體細胞含量是否正常或異常。



(a) 細胞鏡檢晶片模仁射出成型(PMMA)



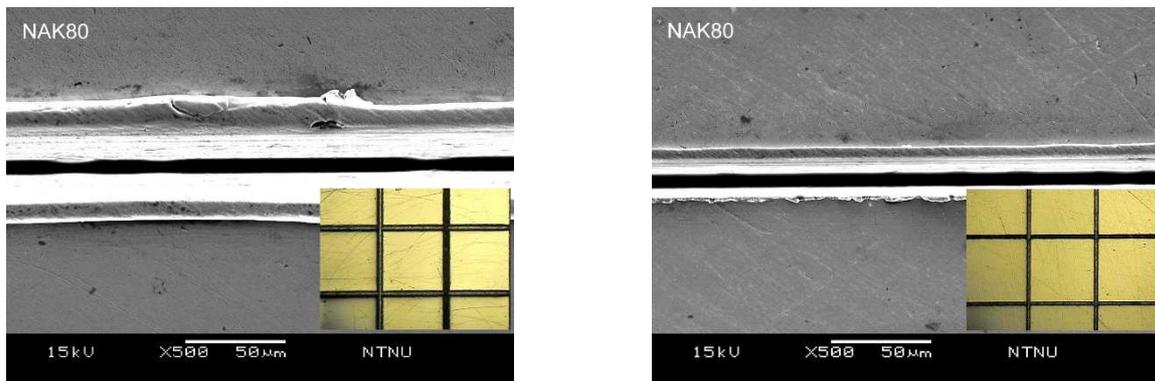
(b) 細胞鏡檢晶片臨床實驗

圖9 商業化後的細胞鏡檢晶片

6. 結果與討論

6.1 輪刀同軸加工的精度影響

鑽石輪刀裝置於高速主軸上，由於主軸以高轉速驅動，當高速主軸與輪刀不同軸時，便易發生振動，兩者偏心愈大，振幅也愈大，進而影響微細溝槽的加工寬度。在非同軸加工條件下，當輪刀轉數達 20,000 rpm 時，釀成系統大幅振動，其振幅已高達 2 μm 以上(參考圖 3(b))；反觀，在同軸加工條件下，其振幅僅達 32 nm。圖 10(a)和(b)所示，為非同軸加工與同軸加工的微溝槽寬比較，很明顯的，非同軸加工條件下，輪刀與高速主軸不同軸，致使輪刀發生偏擺振動，側向毛邊及溝槽寬度明顯增加；相反的，在同軸加工下，輪刀發生偏心與振動的幅度很小，溝槽寬度與側向毛邊明顯減少。所以同軸加工因輪刀的高同心精度，可使槽寬獲得極窄的寬度，能實現生醫晶片模仁需求的微米槽寬之溝槽陣列。



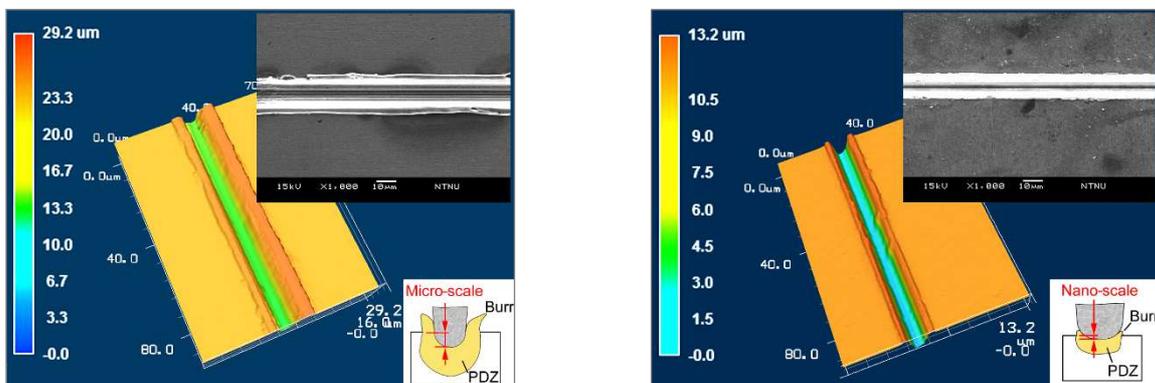
(a) 非同軸加工之溝槽寬度

(b) 同軸加工之溝槽寬度

圖10 非同軸加工與同軸加工之精度影響比較

6.2 研削深度的影響

模仁為獲致高光平微溝，本研究對微溝的深度研削，以不同的切深加工進行實驗，目的在增加研削深度且減少溝緣毛邊的隆起量。實驗以每道切深為 1 μm 及 500 nm 進行測試。如圖 11(a)所示，在每道切深 1 μm 條件下，由於 NAK80 模具鋼屬延性材料，故過大的切深易使聲切效應大於磨削效應，材料不易被磨粒剪斷，多數往兩側翻起，所以微溝毛邊隆起量多；反觀，每道切深 500 nm 時，磨削效應大於聲切效應，故材料易被磨粒剪斷，微溝毛邊隆起量明顯變少，如圖 11(b)所示。



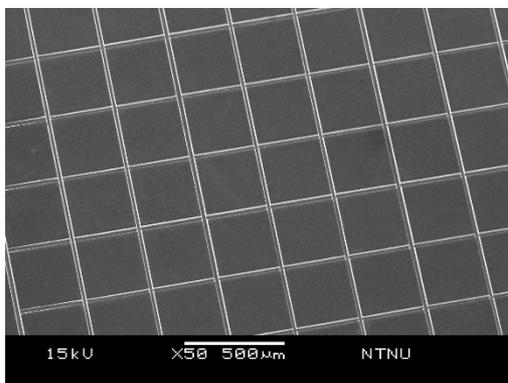
(a) 微米級研削深度

(b) 奈米級研削深度

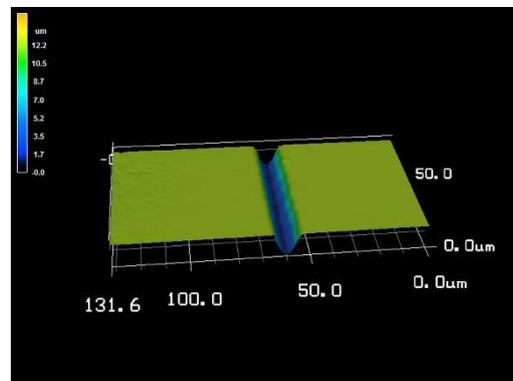
圖11 研削深度的影響比較

6.3 模仁微溝幾何精度探討

晶片模仁的幾何精度包括微溝筆直度與微溝斷面形狀，關係著晶片檢驗區的田埂(Ridge)造形。圖 12(a)所示為晶片模仁微溝陣列研削完成的顯微圖示，本研究以雷射掃描式共軛焦顯微鏡(Laser scanning confocal microscope, LSCM)對完成的模仁進行掃描量測，可建構出一微溝立體形貌，如圖 12(b)所示。由顏色判斷，得知微溝深度約 $11\mu\text{m}$ ，經射出成型後，分析其 PMMA 鏡檢面積上的田埂高度大於 $10\mu\text{m}$ ，此高度已足以區隔細胞；此外，由顯微圖得知，微溝亦具高筆直度(Straightness)，意謂輪刀在同軸成型條件下，具有極高的幾何精度與迴轉精度，此精度直接反應在 NAK80 模具鋼的微溝精度上。當鏡檢晶片模仁具良好形狀精度時，射出成型的晶片便可獲致高平整度效果。在晶片模仁的表面粗糙度方面，垂直與平行於研削方向的表粗分別為 $Ra0.161\mu\text{m}$ 與 $Ra0.045\mu\text{m}$ (Cut off, $\lambda_c:0.8\text{mm}$, $\lambda_s:2.5\mu\text{m}$)，此等表粗已足以使鏡檢晶片具鏡面效果。



(a) 高筆直度之晶片模仁微溝陣列

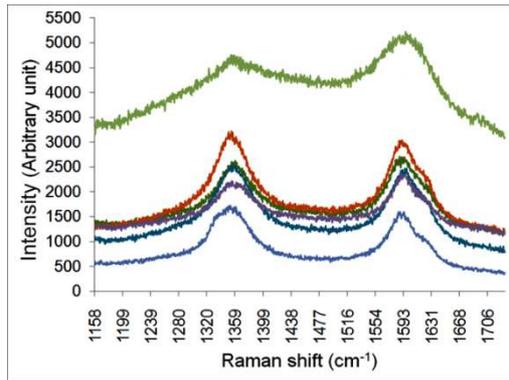


(b) 模仁微溝立體形貌

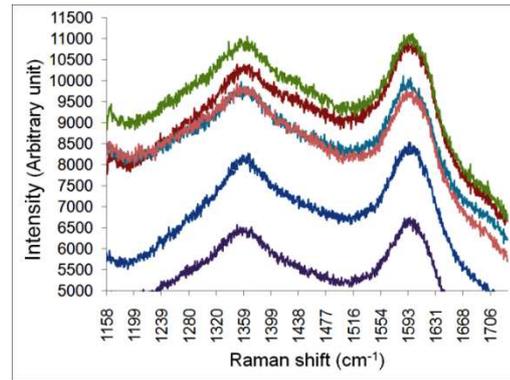
圖12 模仁微溝幾何精度量測

6.4 鑽石輪刀石墨化探討

含硼聚晶鑽石經由火花熔蝕(Spark erosion)成形所需造型，因火花熔蝕局部的溫度高達 $12,000^\circ\text{C}$ 以上[7]；文獻指出[8]，鑽石在加工溫度高於 700°C 時，便會被碳化成非晶質，這意謂鑽石經火花熔蝕後，高溫使鑽石表面形成變質層，此變質層起因於鑽石被逆催化回石墨結構所致，對鑽石的硬度與研削能力有其影響。同時，相關文獻[9]也提到，鑽石刀具不適合加工鐵系金屬，因工件中的鐵原子與鑽石中的碳原子極具化學親和性(Chemical affinity)[10]，研削過程中，聚晶鑽石輪刀上的碳原子易隨切屑被鐵原子帶走[11, 12]，造成輪刀磨耗。本研究以拉曼光譜(Raman spectrum)對鑽石輪刀進行檢驗分析，在鑽石晶體結構(SP^3)中，拉曼光譜會在波長 $1332\text{-}1333\text{ cm}^{-1}$ 間產生峰值；石墨結構(SP^2)在 1580 cm^{-1} 產生峰值(G 峰)；而非晶相碳結構(SP)峰值產生於 1350 cm^{-1} (D 峰)[13]。分析結果顯示，鑽石輪刀無論使用高能量的旋轉式放電削正(Rotary Wire Electrical Discharge Truing)(圖 13(a))；或使用低能量的旋轉式放電削銳(Rotary Wire Electrical Discharge Dressing)(圖 13(b))，發現 D 峰與 G 峰都會出現，顯見鑽石輪刀切刃已有局部石墨化現象。然而，在多道次微溝研削後，鑽石輪刀仍能維持其研削力，推估原因是研削使用奈米切深(500 nm/stroke)，使鑽石處於常溫加工，降低鑽石中的碳原子被鐵原子親和的速度，所以材料的移除機制仍容許鑽石輪刀能在鑽石結構(SP^3)下，對模具鋼的鐵原子進行差排剪切。



(a) 含硼聚晶鑽石放電削正之拉曼光譜

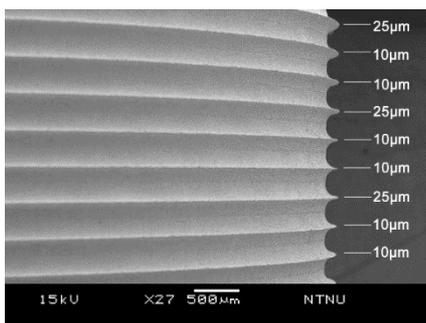


(b) 含硼聚晶鑽石放電削銳之拉曼光譜

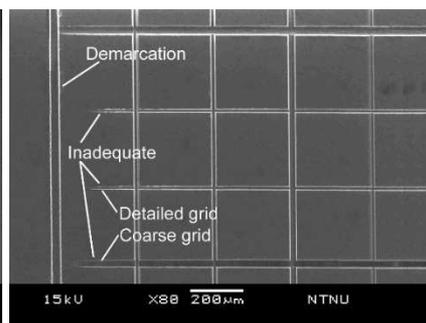
圖 13 鑽石輪刀石墨化探討

6.5 聚晶鑽石輪刀磨耗探討

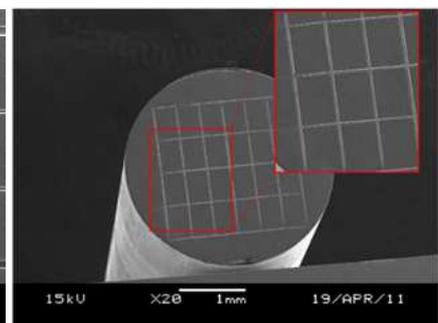
為使微溝陣列快速且精密成型，可使用具有陣列切刃的電鑄鑽石輪刀[14]，並以一次式研削(One-off grinding)技術完成之，如圖 14(a)所示，如此，晶片模仁可一次式地加工出多道平行的微溝陣列，不過，由於晶片各微溝的溝寬不一，相應的，鑽石輪刀陣列的各切刃厚度也不等，意謂鑽石輪刀各切刃的磨耗率(Wear rate)也會因之有所不同。所以當微溝陣列被磨削一段距離後，發現模仁粗溝的長度，大於細溝的長度，如圖 14(b)所示，這是因為厚切刃的輪刀，參與磨削的磨粒比薄切刃的輪刀，參與磨削的磨粒多，表示厚切刃的輪刀磨耗率較薄切刃輪刀的磨耗率低，才會造成粗細溝槽長短不一的現象。鑒此，本研究以聚晶鑽石輪刀進行逐溝研削，並對粗溝的槽寬，視為兩次相鄰的細溝，進行研削創成。因微溝陣列逐溝研削，所以溝槽長度可被精準控制，不會發生長短不一的現象，如圖 14(c)所示。另外，比起電鑄鑽石輪刀的鑽石含量(約僅 50%)，聚晶鑽石輪刀的鑽石含量高達 98%，如再搭配「高速快淺研削」技術，其聚晶鑽石輪刀的磨耗量，可被控制至極低程度(磨削 280mm 的溝槽長度後，輪刀的磨耗量為 0.1 μ m)，因此每道微溝幾乎都能維持在相同的尺寸精度。



(a) 電鑄鑽石輪刀陣列



(b) 微溝陣列一次式研削成型



(c) 微溝陣列逐溝研削成型

圖 14 鑽石輪刀磨耗探討

7. 結論

本研究以含硼聚晶鑽石為輪刀素材，於自行開發的高剛性「雙軸式超精微 CNC 工具機」上，建構線上旋轉式放電加工技術，並對含硼聚晶鑽石輪胚進行線上放電成型，目的在建構具

同軸(Co-shaft)且薄刃的含硼聚晶鑽石輪刀，再利用此同軸輪刀，以「線上高速快淺研削」對 NAK80 模具鋼進行陣列微溝加工，製作細胞鏡檢晶片模仁。實驗證實，因線上成型鑽石輪刀，所以輪刀與主軸間的同心精度可獲致最高，溝槽研磨能以主軸最高同心精度進行加工創成，不但可獲得極高穩定度研削，且因輪刀及模仁都未被拆卸，故其偏擺量最低，大幅省卻刀具繁瑣校正的時間，及獲得最細槽寬的生醫晶片溝槽模仁。實驗也發現，高速快淺研削使鑽石輪刀只承受奈米等級的切深，能使鑽石處於常溫加工，減少鑽石中的碳原子與鐵原子親和的速度，進而延長輪刀壽命。本研究除了成功開發出細胞鏡檢晶片模仁外，並射出 PMMA 的成型鏡檢晶片，成功應用於生醫細胞的鏡檢；本項技術所開發的成果，已通過臨床實驗，並已商業化。

8. 參考文獻

1. R. Pethig, J.P.H. Burt, A. Parton, N. Rizvi, M.S. Talary and J.A. Tame, 1998. Development of biofactory-on-a-chip technology using excimer laser micromachining, vol.8, pp.57-63.
2. S. T. Chen, C. H. Chang, 2012. Study on thinning of a boron-doped polycrystalline diamond wheel-tool by micro rotary w-EDM approach, Applied Mechanics and Materials, vols.217-219, 2012, pp.2167-2170.
3. S.T. Chen, C.H. Chang, 2013. Development of an ultrathin BD-PCD wheel-tool for in-situ microgroove generation on NAK80 mold steel, Journal of Materials Processing Technology, vol.213, pp.740-751.
4. S.T. Chen, C.H. Chang, 2013. Successful fabrication of a convex platform PMMA cell-counting slide using a high-precision perpendicular dual-spindle CNC machine tool, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.23, no.12, pp.125030-125042.
5. S. Malkin, N. Joseph, 1975. Minimum energy in abrasive processes. Wear, vol.32, pp.15-23.
6. T.J. Shin, J.O. Oh, K.H. Oh, D.N. Lee, 2004. The mechanism of abnormal grain growth in polycrystalline diamond during high pressure-high temperature sintering. Diamond & Related Materials 13, 488-494.
7. C. Sommer, 2000. Non-traditional machining handbook. Advance Publishing, Inc., pp.117-124.
8. S. Shimada, H. Tanaka, M. Higuchi, T. Yamaguchi, S. Honda, K. Obata, 2004. Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool of ferrous metals, Annals of the CIRP, vol.53, pp.57-60.
9. W.Z. Shao, V.V. Ivanov, L. Zhen, Y.S. Cui, Y. Wang, 2003. A study on graphitization of diamond in copper–diamond composite materials, Materials Letters, vol. 58, pp.146-149.
10. G. Davies, T. Evans, 1972. Graphitization of diamond at zero pressure and at a high pressure, Proc. B. Soc. Lond., vol. 328, pp.413-427.
11. J. Qian, C. Pantea, J. Huang, T.W. Zerda, Y. Zhao, 2004. Graphitization of diamond powders of different sizes at high pressure–high temperature, Carbon, vol. 42, pp.2691-2697.
12. I.N. Tansel, T.T. Arkan, W.Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, M. McCool, 2000. Tool wear estimation in micro-machining. Part I: tool usage–cutting force relationship, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 40, pp.599-608.
13. 塗志賢，鄭嘉良，2010. 奈米導彈-奈米鑽石的生醫應用，物理雙月刊，pp.99.
14. S.T. Chen, Y.C. Lai, 2011. Development of a novel custom micro-tool for effective cutting of a precision microgroove array on a microscope slide, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.21, No.3, 8pp.