

超快雷射之特性原理 與加工應用

銓州光電股份有限公司 徐豐源副總經理

自1960年代雷射技術問世以來，其應用範圍早已愈來愈廣，雷射在加工方面具有加工精細、生產效率高、適用範圍廣及易自動化等優點，因此對很多應用產業包括印刷電路板、太陽能電池和平面顯示器產業等，特別具有影響力。而受近年3C產品朝向「輕薄短小」與「多功整合」發展趨勢影響，「微製程」更成為電子產業再升級的關鍵，而雷射具有可在物件極微小區域範圍內進行加工動作的特性，可用來取代一些傳統製程所無法完成的工作項目，因此特別受到廣泛注目。

微雷射加工製程技術依雷射光脈衝寬度可區分為：飛秒級(fs)、皮秒級(ps)及奈秒級(ns)雷射等，一般次皮秒級和飛秒級屬於超快雷射加工。飛秒級雷射由美國 Clark-MXR 公司生產的雷射加工機為主，產品尺寸精度可達奈米等級(約50nm)。相較於傳統雷射(奈秒級)容易發生熱效應的微裂縫、熔融殘渣、重鑄區、精度差的缺點，飛秒雷射所具備的超強、超快、超微物理特性，使其在IC半導體、顯示器、生

醫、太陽光電、微機電等產業深具突破性的應用潛力。

超短脈衝雷射(或稱超快雷射)之所以能達成高品質之微加工製程乃因此超短脈衝於加工物質上的作用機制。超短脈衝的光交互作用機制與傳統雷射脈衝完全不同，以下我們將基於相同的微加工過程而唯有脈衝時間不同的基礎下做詳細比較。

首先，我們可以了解微加工的品質強烈地取決於工件上的熱堆積程度，或更精準地說是依熱的能量所留在材料上所帶來的破壞。而超短脈衝則遠遠比任何標準要來的短的多，所以能量並沒有足夠的時間經由熱傳導等機制擴散至加工點外的區域。如此高的能量在如此快的時間內聚積在材料中，將導致所謂電漿化的反應，此電漿隨即從材料中以高能量氣體形式帶著大部分的熱能飛散而出。過程中，材料是由固態不經液態直接轉換成氣態濺散，所以幾乎沒殘留什麼熱在材料上，加工品質因此非常理想。沒有任何其他的加工模式能夠產生如此高的能態，所以擁有此獨特能力的超快雷射才能達成有別於傳統雷射加工所達不到的加工精度。

首先我們要先了解傳統雷射加工的原理，如此我們才能更進一步理解超快雷射加工技術的不同之處。當然我們必須闡明這些是很複雜的，甚至有些部分在物理上來説都還不是完全地被了解。儘管如此，我們確實了解到極短脈衝在物質上的交互作用與傳統雷射加工是完全不一樣的。例如，我們已經知道超快雷射脈衝在物質的交互作用上具有極高的再現性(我們將在後面討論其原因)，這一發一發具再現性的結果也使得微加工能獲得極高的品質。

首先要從了解一些我們不是那麼熟悉的時間尺度開始，以下是一些短時間的尺度定義：毫秒、微秒、奈秒、皮秒及飛秒。飛秒是奈秒的百萬分之一。是的！那是一個非常快的時間，所以我們稱其為“超快”。一般常見的傳統雷射加工機的雷射脈衝大約是幾個奈秒，所以飛秒雷射的脈衝大約僅有百萬分之一，那麼短、那麼快！

為了方便討論的緣故，我們較武斷地將光與物質的交互作用物理機制分成兩種時間範圍，一種是雷射脈衝非常非常短(稱為超短或超快脈衝)，而另一種則是沒那麼短(相對上稱其為長脈衝)。一般將超短或超快脈衝定義為小於大約10皮秒甚至短於一個皮秒，而大於10皮秒則歸類於長脈衝。長脈衝雷射可能是連續波、半連續波或是Q開關雷射，只要他們發出的雷射光符合我們此處的定義。

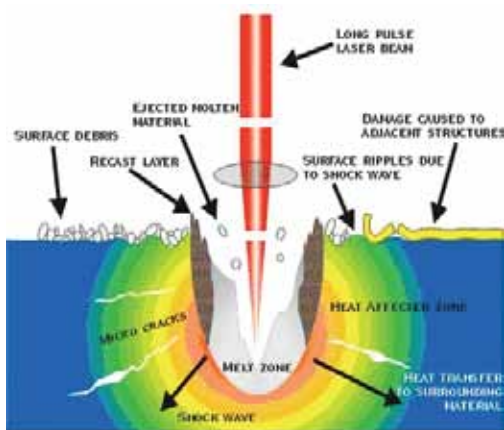
事實上，目前市面上幾乎所有商用雷射都屬於我們所定義的長脈衝雷射的範疇，就讓我們先來看看長

脈衝雷射的加工機制。長脈衝與物質交互作用的基本方式為藉由雷射所帶來的熱堆積在脈衝時域內擴散至材料上，如圖一所示。技術上來説，雷射的脈衝寬度比熱擴散時間來的長，若是做雷射焊接，這將是一個很好的現象，但對其他大多數微加工來説，周圍材料上熱擴散的效應就不是我們所樂見的了。為甚麼呢？以下我們來探討許多會因熱擴散傷害到加工品質的因素。

熱擴散會降低微加工製程上的效率，因為將能量帶離加工點，而使其降低了原本應完全用來移除材料的能量。試想一下，若是水桶中有個洞不斷地讓水漏出來，就得補更多的水來平衡所漏出的部分。

當材料的熱傳導系數愈高，就像是水桶中的洞愈大，就得補愈多的水進桶中把他補滿。

- 熱擴散也會降低聚焦點(加工點)的溫度，導致加工溫度只略高於材料熔點。材料的移除是基於高能集中於加工使其熔融部分進而蒸發，如圖一所示，濺射出來的微珠會再掉落回加工物表面進而污染樣品，此污染物甚至可能相當大。因為殘渣的溫度更會使其牢牢地黏附在加工件上，使得清理上非常困難，甚至造成加工件的破損。
- 熱效應亦會降低加工精度。一般來說，熱會從聚焦點往外擴散，使得熔融區域將遠大於雷射聚焦點尺寸，因此很難做到微細加工。換句話説，材料的移除飛濺區將不僅侷限於光束本身的聚焦點大小，所以即使雷射點大小能到達1微米甚至更小，但在很多的材料上是無法做出小於10微米直徑大小的。
- 熱擴散會影響加工點周圍一個很大的區域，一般我們稱之為熱影響區(heat-affected zone 或 HAZ)。熱能波(或衍生而來的冷卻波)將於熱影響區內傳播，引起機械應力，且可能產生微裂縫(甚至大裂縫)，如圖一所示。隨著材料冷卻，這些缺陷將“凍結”在結構內部。而之後在使用時，這些裂縫可能會更加延伸至塊材深處進而導致元件提早失效。另一個具有相當程度關聯性的現象是加工孔洞周圍重鑄區的形成，此區重新凝固的材料與原



圖一 長脈衝雷射加工物理機制

本未熔融的材料在物理甚至化學特性上有極大的不同，重鑄區的機械結構性也較為脆弱，因此幾乎都需要在加工後加以移除。在某些應用上，例如動脈支架的精密加工，為了能在人體內使用，此重鑄區(又稱熔渣)必須經過多道繁複、昂貴的後清理製程。

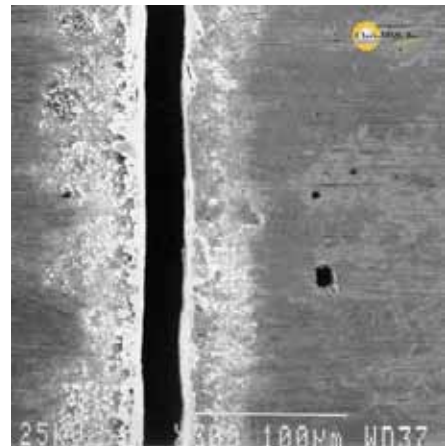
- 有時熱擴散也會導致表面震波的形成，而導致元件加工區附近的結構或多層膜材料受損。當震波的振幅隨著加工材料改變時，通常在製程上愈多的能量堆積會導致愈強的震波形成。顯而易見地，熱擴散會伴隨著多種物理或化學現象而影響微加工製程，因此該如何降低甚至除去熱擴散的效應是製程上極為重要的課題。

雷射加工還有一些限制，例如，毫無意外地傳統雷射並無法加工透明材料。但是超快雷射辦的到！超快雷射能夠加工透明材料。所以，若以市面上長脈衝雷射做微加工，熱擴散效應將支配著加工製程，伴隨著許多我們不希望見到的效應而降低了加工品質。

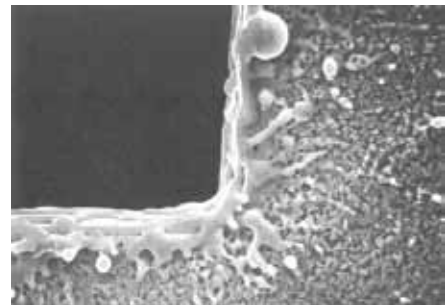
Invar(一種鎳鐵合金)在室溫下具有極低的熱膨脹係數，因此常用於需要高度穩定的機械設計上。圖二的樣品是以長脈衝雷射(雷射參數為脈衝寬度8奈秒，能量0.5毫焦耳，未施以氣體噴嘴)加工後的結果。很明顯的，在此條件下的加工製程看起來無法讓人滿意，在加工區邊緣可以看到很清楚的重鑄區，還有大塊的熔渣殘附在加工區邊緣。當然我們可以試著用某些種類的氣體噴嘴在加工過程中加以協助，但需注意的是，噴嘴雖然能物理性地將熔融物從加工區移除達到清潔性較好的切割結果，但也可能交互汙染下游樣品。

我們接著討論超快雷射脈衝的加工移除製程，基本的特徵在於雷射脈衝照射過程中，光與物質的交互作用是在極快速的時間內完成，因此熱的堆積並沒有足夠的時間從加工點擴散到其他區域。雷射脈衝時間比熱擴散的時間還短，通常這是非常罕見的也是非常吸引人的特點，而這幾乎只有超快雷射能辦到。

- 因為能量根本沒足夠的時間擴散開來，可以大幅提升機械加工的效率。例如上述水桶的例子，就像沒有了會漏水的那個孔，雷射的能量就無處可跑(更精準的說是沒有時間傳到別處)，不斷地在加工點累積，幾乎在瞬間讓溫度上升到材料的熔



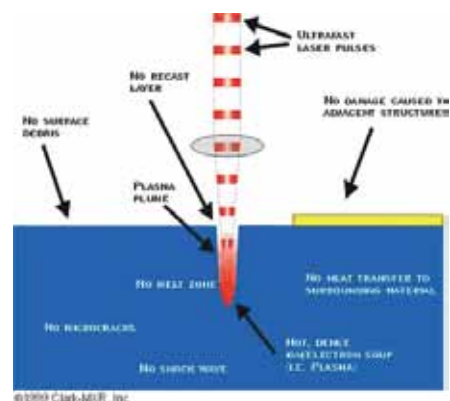
圖二 長脈衝雷射加工於1mm 厚度之Invar合金



圖三 熱影響區(HAZ)在長脈衝雷射加工下產生的熔渣

點，然後很快地遠遠超過沸點。事實上，溫度直接爬升至所謂的電漿區，聽起來神奇，正因為這不是一個平常的科技經驗。

- 超快雷射能夠帶來一個難以置信的尖峰功率，通常可達到百億瓦級(10GigaWatt，這甚至比一個大型核電廠的平均功率來得高)，因此在加工點每平方公分的雷射強度可輕易地超過數百兆瓦。毫無疑問的，目前還沒甚麼其它人造的物品能達到如此高的功率強度。

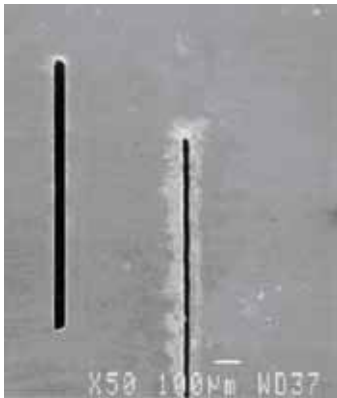


圖四 超快脈衝雷射作用機制

- 所以沒有甚麼材料能夠承受如此高的功率強度，也就是說，我們可以以超快雷射的脈衝去加工非常硬或熔點非常高的材料，例如鉬(Molybdenum)跟銱(Rhenium)等。

在此缺少熱擴散效應的機械加工製程中，還有哪些作用產生呢？

- 以超快雷射的脈衝使得材料表面產生電漿化之後，內部力量產生的壓力會形成一股爆炸性的煙縷而往外噴散，原本材料原子間的內聚力遠遠不足承受高濃度的離子(帶電荷的原子)及電子從表面爆發開來。因為電子比起離子來得輕且較具有動能，所以會在此過程中先快速噴發材料，然後



圖五 兩種雷射加工於1mm厚度之Invar合金

才是離子的噴發，因為這些都是帶正電的離子，所以因互斥的力量噴離材料。當然，此過程不會有微滴凝結於材料周圍，而且，沒有熔融的過程自然沒有飛濺的材料污染附近的表面。

接下來我們將敘述更多飛秒雷射在微加工製程上的優勢，我們以上述1公厘厚的Invar(鎳鐵)合金，在相同的條件下改以200飛秒，0.5毫焦耳的超快雷射來加工，很明顯的，從圖五的結果可以看出來，超快脈衝的加工面乾淨很多，不僅看不到重鑄區，邊緣較直，而且沒有污染物附著的問題，我們能輕易的做出超快脈衝加工品質較優、加工效率較高的結論。

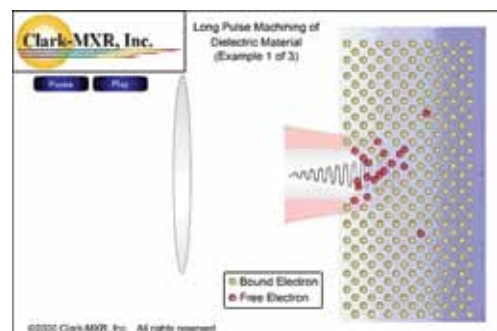
影響加工製程效率的因素

儘管超快雷射加工大部分的獨特優勢能以不具熱擴散來加以解釋，但仍有一些非常重要的特性，諸如每發超高重複性、次微米結構加工能力、透明材料加工能力，必須讓我們審視超快脈衝與物質交互作用時更詳細的物理原理。

除了熱擴散、加工雷射光的波長及雷射聚焦點相對加工件的位置之外，加工製程中的隨機(Stochastic)或肯定(Deterministic)模型也將決定加工精度。

如圖六所示，我們在此將雷射脈衝視為一種電磁波，電磁波的頻率相當於雷射脈衝的“顏色”，而波包的長度即為雷射的脈衝寬度，波的振幅則為雷射的尖峰功率。當光學波包(即此雷射脈衝)進入加工材料，即開始造成電子受激振盪。束縛電子因受限於固定位置，所以僅產生小幅度的擺動，相對的，未受束縛的自由電子一旦受激便將強烈振盪起來，而且偶而會碰撞到附近的原子。如果雷射場的強度夠大，則會把電子束縛的能階中踢出，如此便有了兩個自由電子；相同的這兩個自由電子可能再去撞出另兩個附近原子中的電子，如此一直反覆下去。這類的倍增效應一般稱之為“雪崩效應”，而此過程中產生了電子及離子化的原子，所以我們稱其為“雪崩離子化”。

全部的過程如圖六所示，一開始時，至少必需有



圖六 長脈衝與材料間交互作用機制

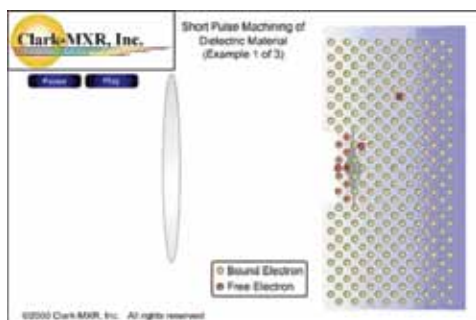
一個以上的自由電子存在電磁場中，若沒有自由電子，就沒有雪崩過程的重要開始，也就無法完成材料的加工。金屬材料中有非常充分的自由電子，所以雪崩過程幾乎是馬上發生，所以加工之再現性極佳(但仍會有熱擴散的問題)。在半導體或絕緣體內的自由電子相對非常少，所以雪崩過程不見得馬上發生，這取決於光束是否打到自由電子。假設一開始時電磁場內存在一些自由電子，那加工會顯得比較有效率；倘若沒有，則雪崩不會開始，所以加工的過程就必須靠些運氣。這當中先天性存在的物理性變異，將導致加工的不穩定性，即使雷射是非常穩定、每發的聚焦點大小及能量都一模一樣，加工的結果仍然會有所不同，因此當我們想做一些非常微細的加工時，這將是一個非常嚴重的限制。

對於此現象我們能做些甚麼?我們有辦法戰勝這物

理作用嗎？是的，這是可能的！假如我們能以某種方法去創造出一個先天具有很大量自由電子的環境，則原本自然產生的自由電子是否存在於電磁場中就不再是一個重要的因素了。重要的是自由電子的總數，而非原本的數量。

那我們要如何創造出大量的自由電子呢？至少有兩種方法，而此兩種皆依照以下的原理：其實工件中原本就已經存在大量的電子，只是可能絕大部分都是束縛電子而無法形成雪崩過程。只要我們能夠將這些束縛電子瞬間轉變成自由電子，那這個問題就迎刃而解了。要達到這個目的，我們可以使用紫外光雷射或超快雷射，圖七中展示出使用超快雷射的機制。

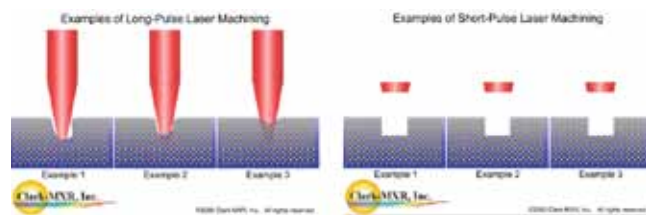
電磁波振幅的大小相當於就是雷射尖峰功率的強



圖七 短脈衝與材料間交互作用機制

度，圖七中的超快雷射產生非常非常高的尖峰功率。我們之前提過，當雷射脈衝進入加工材料，即開始造成電子受激振盪，但束縛電子僅產生小幅度的擺動，這是指一般正常的狀況。但以超快脈衝的超強電磁場去打材料時，這絕不能以一般狀況等同視之。正因電磁波場強之高，束縛電子瞬間都從能階中被踢出成為自由電子，所以馬上創造出一個具有大量自由電子的環境，也因此雪崩離子化過程立時展開。這是一個可靠的、具再現性的過程，因此加工品質極佳、極其穩定。圖八中我們顯示出兩種截然不同的結果。

超快脈衝的多光子吸收及飽和雪崩離子化效應的雙重結合，使得小於1微米的加工製程成為可能。我們就來看看如何使用這個具高再現性的概念，在材料上來創造出次微米的特徵尺度。用雷射光來加工材料時，如果你想達到最小的特徵尺寸，你必須先將光束聚焦至你能做到的最小尺寸。通常這個大小取決於幾個因素，簡化來看，這大約就是雷射光的波長。所以，如果你使用0.5微米波長的雷射，那麼最小的聚焦

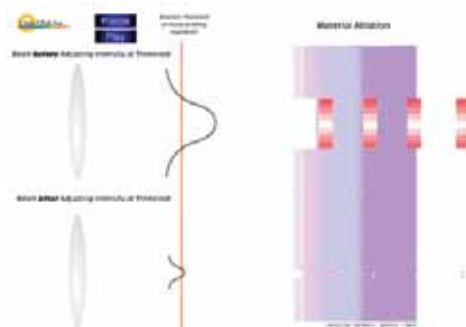


圖八 兩種雷射與材料交互作用後的結果比較

點大約就是0.5微米。然而，你會發現因為長脈衝雷射使用時在材料周圍所產生的熱效應，根本很難達到10微米以下的特徵尺寸。

如圖九所示，我們可以看出超快雷射的脈衝如何達到遠低於中心波長的特徵尺寸。首先，我們一樣將雷射聚焦，聚焦點的光強度分布將呈現高斯分布(即中心點最強，往周圍平滑地減弱)，而超快雷射的加工洽需要考慮加工閾值，唯有超過閾值的部分會被加工。所以只要我們調整雷射聚焦點的強度(這是非常容易做到的)，讓只有光束的峰值部分超過閾值，那我們就能控制只有非常限定的區域會被加工，此限定的區域甚至能小到只有聚焦點大小的十分之一。所以想像一下，若我們以一個中心波長 0.2 微米的雷射做加工，我們甚至能達到大約僅為20奈米的加工尺寸。這麼具有高精度、高再現性的次微米製程，是傳統的長脈衝雷射沒辦法做到的。

超快雷射幾乎能加工所有種類的材料，不會汙染加工件，沒有熔融殘渣、微裂縫、振波、重鑄區或剝離層，也不會傷害其它微結構；這是一個高可靠性、高再現性，且能達成次微米結構的新科技，相信在未來的各種製程中必將扮演吃重的角色。



圖九 次微米加工製程的達成