

科技部工程司

109 年度學門主題式計畫「極限雷射工程主題式計畫」

規劃說明

壹、前言

極限雷射工程為目前歐美光電科技發展的核心技術，技術的進展創造出新產業與應用，並持續改進人類的文明和生活方式。為表彰極限雷射發展的貢獻，2018 年諾貝爾物理學獎，頒發給 Arthur Ashkin、Gerard Mourou、Donna Strickland。Arthur Ashkin 開發出稱為光鉗的雷射技術，透過高度聚焦雷射束產生力來移動微小物體的裝置，相應的技術稱作光學捕捉 (optical trapping)，這種技術利用雷射光的輻射壓力，讓我們可以精確抓取/移動活的細胞或病毒顆粒、把細胞捏成各種形狀，現在光鉗已經被廣泛應用於生物學領域。Gerard Mourou、Donna Strickland 開發 CPA (chirped pulse amplification) 的超高強度雷射脈衝技術，世界上所有高功率雷射儀器基本上都使用這技術。超銳利雷射光束可以用來精確切割和鑽取各種材料，眼科手術更是如此。

除此之外，2005 年諾貝爾物理學獎頒發給 Roy J. Glauber、John L. Hall、Theodor W. Hansch。Roy J. Glauber 奠量子光學的理论基礎，並使量子理論涵蓋雷射光學領域；John L. Hall、Theodor W. Hansch 對雷射為基礎的極限精準光譜學研究發展貢獻極大，其中包括光梳頻率技術，使學術界得能以精確的十五位數測量頻率，可實際運用於高精密時鐘，並有助於研發全球定位系統的新科技。

2017 年的諾貝爾物理學獎頒給了 LIGO 的創始人以及關鍵的科學家 Rainer Weiss、Barry C. Barish、Kip S. Thorne。在愛因斯坦重力波理論提出剛滿一百年，雷射干涉重力波偵測站 (LIGO) 於 2015 年 9 月 14 日成功的偵測到 13 億光年外兩個黑洞碰撞產生的極其微弱的重力波，完成了愛因斯坦廣義相對論的最後一塊拼圖，從來自 13 億光年 ($1.3 \times 10^{25} \text{m}$) 遠的「天文」數字距離外，量測在地球發生的「地文」長度改變 ($1.3 \times 10^{-19} \text{m}$)，而這都是生活上很難有感覺的極限數字。

在重力波被直接偵測到的里程碑之後，人類已經揭開了重力波天文學的序幕，開啟了觀測宇宙的新時代。1999 年獨得諾貝爾化學獎頒給 Ahmed Hassan Zewail，第一個利用超快雷射光譜技術直接觀測到化學反應的科學家，並因此而開創出一個全新的化學研究領域，稱為「飛秒化學」(Femtochemistry)，其後並更進一步推廣至「飛秒物理」(Femtophysics) 及「飛秒生物學」(Femtobiology)。雷射工程創造了現代的光電研究領域，極限雷射光學可說是光電工程的核心與最前緣。歐美日中各大國均極國家之力集中發展各項極限雷射技術以免喪失了前緣技術的掌控度，並極力開發各項產業應用，以解決能源、環境、生醫應用等各項極限議題。

貳、國內外發展現況

一、國際發展現況

歐美是雷射發展的先驅，從理論的建立(Charles H. Townes)至實現世界上第一個雷射(Theodore Maiman)，至近期在雷射冷卻(Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips)、飛秒化學(Ahmed Hassan Zewail)、量子光學理論(Roy J. Glauber)、光梳的發展(John L. Hall、Theodor W. Hansch)、光鉗的雷射技術(Arthur Ashkin)、超強雷射的技術發展(Gerard Mourou、Donna Strickland)到大型的超精確光干涉儀量測重力波(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory / LIGO)(Barry C. Barish and Kip S. Thorne)，奠定了雷射的知識及工藝的基礎。未來繼續朝超穩、超強、超短、超紫方向發展。

往超穩方向，下一代的 LIGO 光源，需使用更穩定的光源及將光進行量子壓縮(squeezed light)，甚至將使用超穩定光梳雷射檢測重力波。在超強雷射方向，美國的德州奧斯丁大學(University of Texas at Austin)，勞倫斯利佛摩國家實驗室(Lawrence Livermore National Lab)各有 25 飛秒拍瓦級雷射，美國羅徹斯特大學(University of Rochester)有千焦耳 200 兆瓦雷射，美國國家點火設施(National Ignition facility)有 4 百萬焦耳奈秒雷射，探討物質在巨大光壓下的物質行為，包含核融合的操控以徹底解決能源問題。歐盟的極限光基礎架構 Extreme Light Infrastructure (ELI)計畫有各種面向的強場雷射，包括高重複率兆瓦雷射、25 飛秒拍瓦雷射，目標是把場強推至 10^{24} W/cm² 及產生飛秒、埃秒等級的光子、電子、質子、中子、渺子、微中子的光源。在超短、超紫方面，從大型的同步輻射中心、自由電子雷射到小型的桌上型 X 光，都有同一個目標，產生高亮度超快同調短波長 EUV、X 光，產生超高空間解析及超精準時間解析影像。

在日本方面，RIKEN 所提出的四個極限雷射方向，往超穩定(Quantum Optics)、超短脈衝(Attoscience)、超長波長(Teraphotonics)、超短波長(Super-resolution)。往超穩定(Quantum Optics)方向，目標為雷射冷卻原子能量低於 10^{-9} eV、光頻率穩定至 $\Delta\nu/\nu = 10^{-17}$ ，朝超精確頻率量測及標定物理常數；往超短脈衝(埃秒)方向，目標是把瞬間電子能量加速至 GeV 甚至更高，光脈衝時間解析至 100 埃秒，朝強光子場物理、極限非線性光學推進；往超長波長方向，目標是發展 THz 光(波長 300 μm)，非侵略、破壞性量測。最後一個方向為桌上型超短波長同調光源，目標產生波長 <10nm 的 X 光，為了解析材料及生物影像。

二、國內發展現況

現今國內的極限雷射工程發展也相當地活躍，於 2011 年清華大學與中研院研究團隊領先美國、日本等國，率先成功的找出控制「光場」(optical light field)的

方法，於光頻率範圍複製當前微波(microwave)或無線電波(radio wave)製造多種形狀電磁波的技術。這項突破性的創新成果，已於 2011 年 1 月 20 日發表於國際頂尖期刊「科學」(Science)。

2015 年清華的研究團隊與國際合作團隊在如何產生「高亮度」桌上型同調 X 光上有了重大突破。研究發現使用極短波長之雷射光來產生「高次諧波同調 X 光」，可有效提升轉換效率千倍以上，顯著提高桌上型同調超快 X 光源亮度。其中桌上型高亮度的 13.5nm 的極限雷射光源，正是下一代半導體產業重要的蝕刻及奈米缺陷檢測光源，未來將於奈米檢測及生物影像扮演很重要的角色。研究結果於 2015 年 12 月發表在科學期刊上 - Science, 350, 1225 (2015)。於 2018 年，清華研究團隊產生人類史上第一道圓偏振單埃秒脈衝，此光源將拓展超快量測至電子自旋及分子旋性上，此研究結果於 2018 年六月刊登於 Nature Photonics。

國立中央大學的兆瓦極限雷射團隊，在發展桌上型「帶電粒子加速器」的同時，發現對雷射自身而言卻是一個不折不扣的「光子減速器」，波長在中遠紅外光 5-14 μm 範圍內可產生具有“相對論”光強的近單周期紅外脈衝，此研究結果於 2018 年八月刊登於 Nature Photonics。

於 2019 年清大光電研究團隊，發展極限雷射電子加速器晶片，將兆赫波留置於高度吸收的非線性光學晶體中共振放大，產生高達十萬瓦、頻寬介於千分之一到萬分之一的超高亮度遠紅外光雷射。此桌上型雷射的輻射亮度直追，甚至超過世界上許多國家型紅外自由電子雷射。這項研究成果已榮登在今年 6 月號之光電領域頂尖期刊 Optica。

國內製造業正全面擁抱雷射技術。研調機構 Laser Focus World 統計，2020 年全球雷射產值將超越 130 億美元，但雷射產業關鍵技術現仍掌握在歐美業者手中，以致台灣每年進口雷射相關設備金額超過 110 億元。工研院在經濟部支持下進行雷射光谷計畫，目標為開發關鍵奈秒雷射源及，於 2016 年自主開發雕刻用 500W 連續式及切割用 100W 光纖雷射技術，應用在金屬產品的「金屬雷射上色技術」。臺灣新創米雷迪恩開發飛秒光纖雷射光源；飛秒光纖雷射技術是精密加工未來的趨勢，米雷迪恩以玻璃光纖作雷射主體，開發的飛秒光纖雷射光源，最大特色在於可加工微米級的孔洞，且過程中不會產生熱效應，可提供臺灣半導體、醫材、PCB 等產業微米級的精密加工。工研院研究團隊，近乎全光纖的 turn-key 自動鎖模飛秒光纖雷射光梳系統，國際市場上最高重複率穩頻光纖雷射光梳，具有最小型化的雷射頭，雷射光頻率量測、絕對距離量測、原子分子光譜量測、光通訊元件測試光源、兆赫波激發源，生醫影像用光源。

參、計畫目標

本主題式計畫目標如下

1. 扶植國際領先之本土團隊，更進一步提升其國際競爭力與我國雷射研究之國際高能見度與高影響力。
2. 引導與落實台灣極限雷射光源工藝，發展工程與產業應用，留住並訓練相關尖端技術人才。
3. ”自主”發展與掌控關鍵技術，並進而協助建立自主產業技術。
4. 使新光源往『超穩』、『超亮』、『超強』、『超短』、『超紫』等物理極限邁進，並提供學、業界使用。

肆、推動議題

雷射技術是科學發展的基石也是工業技術領先的重要指標，因雷射光源有高同調及能量集中性；高穩頻雷射，可利用於探測偵測重力波、標定元素及分子狀態；高功率千瓦級雷射，可瞬間加熱金屬，用於雷射焊接工業；先進飛秒雷射，瞬間高電場可輕易游離材料鍵結，用於微米及奈米元件加工，可預期雷雕技術將超越傳統機械加工；超短埃秒脈衝，是時間解析電子於原子、分子、材料內運動的不可或缺的光源；雷射產生的極紫外、X光光源，更是現今半導體曝光機台及奈米檢測重要的關鍵光源。開發前瞻光源技術是現今台灣邁向尖端國家急需扶植的方向，而茁壯的雷射技術也將直接正面回饋，材料、電子、生物、醫藥、物理、化學、化工、地質、考古、能源、環保、微機械、奈米元件等基礎研究及工業發展。

本計畫推動議題，須符合下列任一方向：

- 『超穩』/ 超穩頻雷射、光梳雷射技術(comb laser)、量子壓縮光(squeezed light)
在精密量測與現代科技應用中，物理常數的定義、基本物理定律的檢測、原子與分子結構上的研究，光頻標準的建立及絕對光頻的量測是非常重要的標竿。現今物理上的三個基本量：質量，長度，時間都建構於時間的標準和物理常數上，而時間的標準完全仰賴穩頻雷射技術。在同調光通訊及量測的蓬勃發展下，系統的精準度已經逼近量子極限，也就是系統的錯誤發生率大致上都被光的量子效應決定，發展量子壓縮技術有可能突破此量子極限。
- 『超亮』/連續或超高重複率千瓦、萬瓦雷射技術
基礎工業需要大量之雷射系統來標記、修整及焊接，高瓦數雷射能在極小的焦點產生極高溫度，為其工業發展的核心技術。
- 『超強』/瞬間超高能量達兆瓦(terawatt)、拍瓦(petawatt)

超強雷射光束與電漿的交互作用可用於發展桌上型加速器科技，為高能物理實驗探索新的架構，所產生的 X 光和伽瑪光可作深度透視攝影和斷層掃描，產生的高品質質子束可用於癌症治療，也可觸發核反應，現地製作同位素。所產生的高壓高溫電漿可模擬天文物理現象，也可用於研究核融合反應。

■ 『超短』/飛秒、埃秒光源

二十一世紀科學已邁進奈米尺度的世界，埃秒的時代亦隨之來臨，在量子的世界，電子運動的時間是以埃秒(10^{-18} sec)為時間單位，發展超短脈衝光源，時間解析電子在奈米及量子元件內的高速反應行為，為下一代高速元件發展的核心量測技術。

■ 『超紫』/極紫外線、X 光光源

因光的空間解析能力與其波長成正比，其穿透能力也比電子束深，且有元素解析能力，高亮度極紫外線(EUV)、X 光光源，為半導體蝕刻、奈米檢測及生物影像發展的關鍵光源，在超快或高同調性的應用上，甚至優於同步輻射。

伍、 計畫撰寫說明與審查重點

(一) 計畫撰寫說明

1. 計畫內容必須陳述國內外現狀、所欲達成之技術指標以及與世界技術水準同步（或超前）之情形。
2. 計畫內容必須陳述三年計畫規劃藍圖(roadmap)及執行內容，並具體說明階段性查核點成果與後續學界/產業服務規劃或國際領先之成效。
3. 若申請團隊研發成果得與業界銜接，當提出計畫書時，請於計畫內容簡述申請團隊與業界預計之合作方式(不計入 CM03 研究計畫內容頁數)。
4. 若申請團隊將進行國際合作研發，必須填寫國際合作研究計畫資料表（申請書表 IM01-IM03），說明所洽談合作計畫內容與共同研發之進行方式、智財歸屬情形。
5. 請說明團隊成員過去在極限雷射工程發展上受國際肯定之技術項目並提供資料佐證。
6. 請說明團隊成員組成與其互補性。
7. 請說明極限雷射實驗室之空間規劃。實驗場所需設計未來可能貴儀使用空間與潛在合作廠商之工業應用空間。此實驗室為未來實地訪查地點。雷射與實驗室建置需以每 6 個月為期訂立詳細之建置查核點、評量指標，以為評審委員查核之依據。
8. 請於計畫書中說明所購置設備之用途與必要性。

(二) 計畫審查重點：

1. 計畫之研究主題必須具有前瞻性、關鍵性及創新性。技術自主與國際領先程度為主要考量。
2. 主持人須具有國際認可之卓越先期成果與領導大型團隊之經驗。
3. 計畫團隊應包含 45 歲以下之年輕學者擔任子計畫主持人或總計畫主持人。
4. 計畫主持人需以每 6 個月為期訂立詳細之技術里程碑、查核點、評量指標，以為評審委員查核之依據。此查核點須依審查委員意見從事修正。
5. 計畫須規劃下列兩項服務之一：
 - (1) 於第三年結束前示範工業(工程)應用，並規劃與相關雷射應用公司簽屬合作備忘錄作為查核點。
 - (2) 於第三年上半年前示範特殊學術應用，並提出相關貴儀服務規劃。