

以石墨烯飽和吸收體產生穩定超短脈衝光纖雷射之研究

The Study of Stable Ultrafast Fiber Lasers Employing Graphene Based Saturable Absorbers

黃碧鈴、葉昭永、鄭木海

Pi Ling Huang, Chao-Yung Yeh, Wood-Hi Cheng

2004 年英國曼徹斯特大學研究團隊 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 成功從石墨中分離出石墨烯而證實其可以單獨存在，兩人也因此獲得 2010 年諾貝爾物理獎。石墨烯是目前世上最薄的材料，為已知材料於室溫下具最低電阻，具備幾近透明加上良好導電性。石墨烯不只應用在電子領域，更可廣泛應用在許多光電產業上，如太陽能電池、觸控面板、飽和吸收體等。本文探討不同製程石墨烯做飽和吸收體薄膜在超快光纖雷射系統中產生穩定的脈衝輸出，使得石墨烯可望有潛力成為低成本且可產生超短脈衝之飽和吸收體材料。

In 2004, the Manchester group, Andre Geim and Konstantin Novoselov, extracted the graphene by using adhesive tape to repeatedly split graphite crystals into increasingly thinner pieces. This proved the existence of free-standing atoms; hence, they obtained the Nobel Prize in physics 2010. Graphene is the thinnest material in the world with the lowest electrical resistance at room temperature among the materials, and it is highly transparent and a good conductor. Graphene is not only utilized in electric field but also is now widely applied in optoelectronic industries, such as solar cells, transparent touch screens, and saturable absorber. We investigate the stable pulse output with graphene based saturable absorber in ultrafast fiber laser system. From our measured results, the graphene based saturable absorber may possess the potential a low cost mode locker in ultra-short pulse fiber lasers.

一、前言

在 1960 年雷射發明之後不久，科學家就開始發展共振腔內之光學元件，能夠對共振腔內光的強度做週期性的調變，產生縱模間有固定相位差的鎖模技術。超快雷射指的就是用鎖模 (mode locking) 技術產生超短脈衝寬度的雷射⁽¹⁾。超快雷射因具有

超短脈衝時間、寬頻寬及高峰值功率輸出的特性，可被廣泛應用於各領域，如超快光譜學、光纖通訊、光學斷層掃描及生醫光電應用等。產生超短脈衝雷射輸出之條件除了包括基本雷射結構外，還多了一個短脈衝產生元件 (pulse-shortening device) 以達鎖模運作。若再加上腔內脈衝壓縮技術，如控制共振腔內線性色散 (group velocity dispersion, GVD)

及非線性光學自相位調變 (self-phase modulation, SPM) 則可進一步得到雷射系統最短的光脈衝寬度。鎖模雷射 (mode locked lasers) 依增益介質的頻寬不同可以用來產生脈衝寬度從皮秒 (ps, 10^{-12} s) 到飛秒 (fs, 10^{-15} s) 等級的範圍，在目前的鎖模技術中，被動式鎖模光纖雷射 (passively mode-locked fiber lasers) 吸引許多研究者的注意原因在於此種光纖雷射系統無腔體長度匹配問題，成本較低，體積小，堅固耐用。

被動式鎖模 (passive mode locking) 是在共振腔內放入「飽和吸收體 (saturable absorber)」的非線性光學元件。飽和吸收體具有非線性吸收特性，其吸收係數隨著光強度增加而降低，因此強度最大的脈衝可得到最小損耗，藉由飽和吸收體及增益介質的相互作用可將連續波輸出轉變為脈衝輸出。目前飽和吸收體被廣泛使用的有半導體飽和吸收鏡 (semiconductor saturable absorber mirror) 或非線性光學鏡 (nonlinear optical mirror)^(2,3)。半導體飽和吸收鏡的缺點是成本貴、製作複雜、頻寬有限，並且只能操作在反射模態，無法與光纖傳輸系統一起使用。近年來研究顯示石墨烯 (graphene) 可為很有潛力的飽和吸收體，原因是石墨烯的零能隙性質使光的線性吸收係數與波長無關。本實驗主要針對兩種不同製程 (溶液濕製程及化學氣相沉積生長結晶層狀製程)，石墨烯飽和吸收體在被動鎖模光纖雷射系統下可成功得到飛秒等級的脈衝輸出及其鎖模特性，包括脈衝序列輸出、光譜及鎖模脈衝。

二、新崛起的光子元件－石墨烯

2004 年，俄籍學者利用 3M 膠帶剝離塊狀石墨 (graphite)，成功取得厚度僅一原子的碳薄片，證明了石墨烯的存在，此研究獲得 2010 年諾貝爾物理獎。石墨烯是第一個被證實存在的準二維結晶狀材料，由碳原子以六角形結構排列而成的單層平面結構，結構如圖 1 所示⁽⁴⁾。由於石墨烯的成功製備，使得許多石墨烯的特性研究也迅速地展開。石墨烯具有以下許多優異特點：單層石墨烯只吸收 2.3% 的光，幾乎為透明材料；具有良好的機械強度，強度約為鋼的 100 倍，幾乎跟鑽石一樣

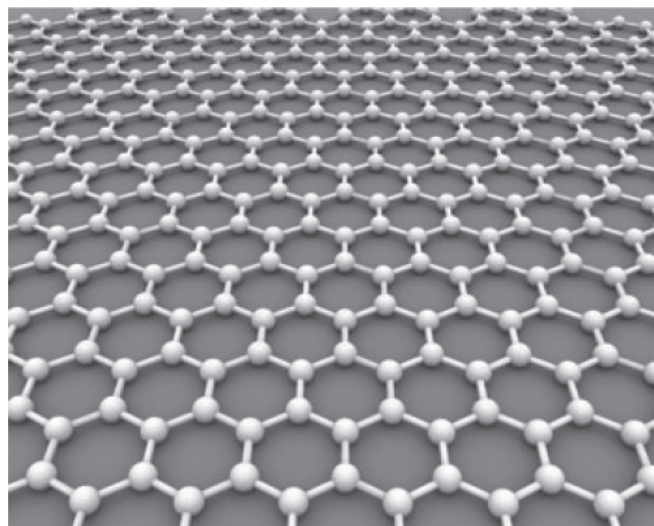


圖 1. 石墨烯的二維結構，是由碳原子以六邊形鍵結，再形成蜂巢狀的晶格。(Courtesy of AlexanderAIUS at Wikipedia)

硬；導熱性比銀高約 10 倍；在室溫下，石墨烯具高電子遷移率，不僅較奈米碳管高，更是矽的數倍；具備可撓曲特性以及高化學穩定性，因此成功分離出單層石墨烯材料也揭示了许多應用的可能性⁽⁵⁾。此外，石墨烯具有快速的激態至基態的電子遷移回復時間 (recovery time)，又稱為「快速飽和吸收體」。超快雷射利用石墨烯的寬頻光學非線性特性，使得零能隙的石墨烯不再局限於奈米電子學應用，而能跨足光電子學及積體光子元件⁽⁶⁾。

1. 石墨烯的線性吸收機制

石墨烯每單位晶胞 (unit cell) 內具有兩個碳原子，如圖 2 所示。單位晶格向量 (unit lattice vectors) 可以表示為

$$a_1 = \frac{a}{2}(3, \sqrt{3}), \quad a_2 = \frac{a}{2}(3, -\sqrt{3}) \quad (1)$$

其中，碳原子之間的距離 $a \approx 1.42 \text{ \AA}$ ，其倒置晶格向量 (reciprocal-lattice vectors) 可寫成公式 (2)⁽⁷⁾：

$$b_1 = \frac{2\pi}{3a}(1, \sqrt{3}), \quad b_2 = \frac{2\pi}{3a}(1, -\sqrt{3}) \quad (2)$$

在石墨烯的倒置晶格中，K 及 K' 稱為狄拉克

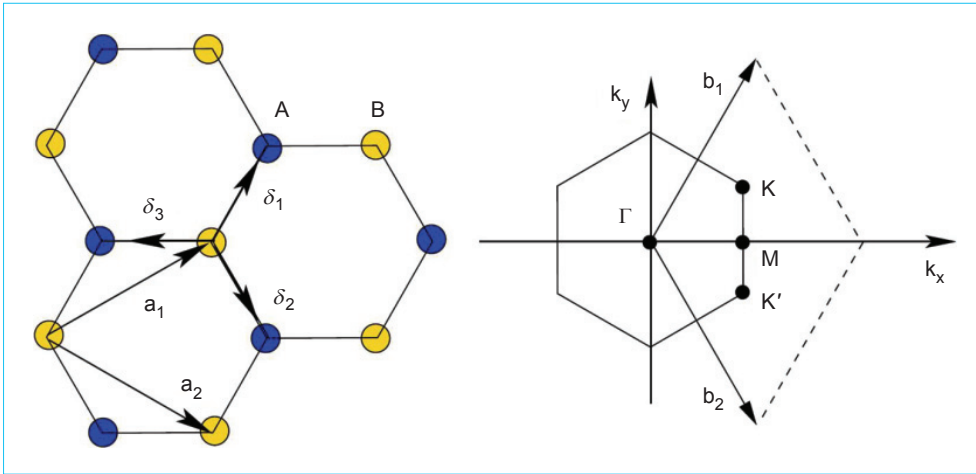


圖 2. 石墨烯的原子結構與對應的布里淵區⁽⁷⁾。

點 (Dirac point)。圖 3 為石墨烯的電子分布及靠近狄拉克點附近的能帶分布，純的石墨烯在其布里淵區 (Brillouin zone) 邊緣，價帶 (valance band) 與傳導帶 (conduction band) 相交於費米能階處形成狄拉克錐 (Dirac cone)，造成石墨烯形成點能隙 (point band gap) 的半導體。相較於奈米碳管 (carbon nanotube) 飽和吸收體其吸收波長需與碳管管徑分布相對應，由於石墨烯中的狄拉克電子具有線性色散，此種特殊的能帶分布使得石墨烯的飽和吸收特性不再受限於能階的大小，而涵蓋從可見光到近紅

外光整個通訊波段的工作範圍，遠遠超過其他的已知材料，實為理想的寬頻飽和吸收體，且有較小的飽和吸收強度。

2. 石墨烯之非線性吸收特性與鎖模機制

石墨烯的光吸收機制亦如圖 3 所示。當低強度的入射光入射石墨烯飽和吸收體時，在價帶的電子吸收能量被激發到傳導帶，經過約 10–150 飛秒後，被激發的熱電子熱化 (thermalize) 然後冷卻形成費米–狄拉克分布 (Fermi-Dirac distribution)。

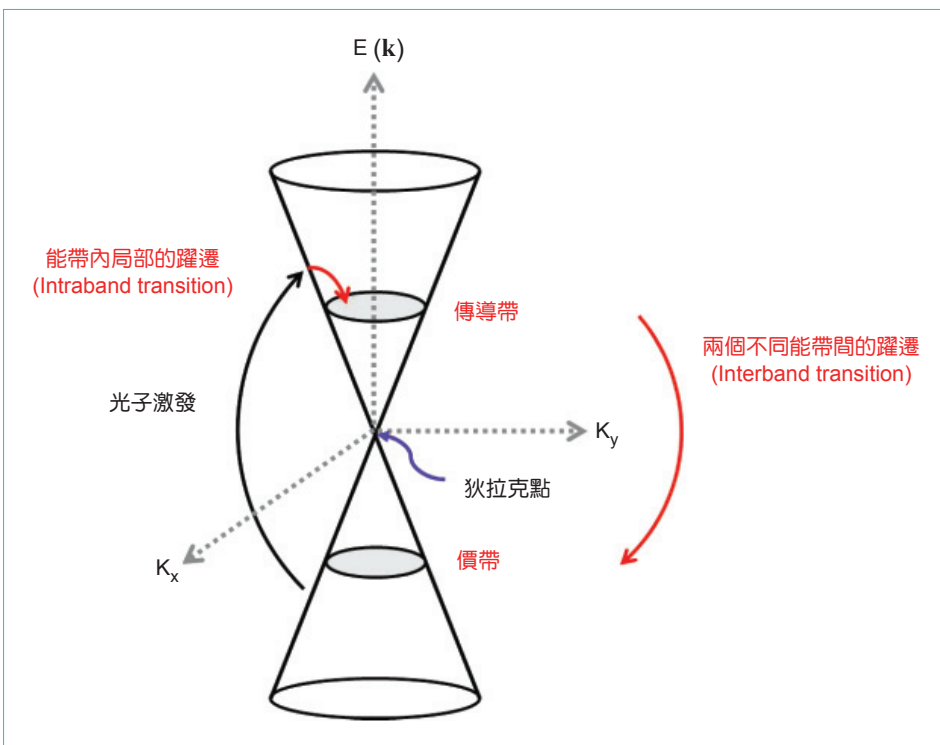


圖 3. 石墨烯電子帶分布。

當入射光強度漸增，被激發的載子數目增加，此時產生的電子電洞對將會填滿接近價帶和傳導帶邊緣的能階，根據包立不相容原理 (Pauli exclusion principle)，兩自旋相同的電子不能同時佔據相同能階，因此激發態中已無可供電子躍遷的空間，此時石墨烯材料達到飽和吸收狀態，對入射光吸收損耗降低，使得入射光子能夠完全穿透飽和吸收體^(8, 9)。

飽和吸收體的吸收係數可以下式表示：

$$\alpha(I) = \alpha_0 \left(1 + \frac{I}{I_{\text{sat}}} \right)^{-1} + \alpha_{\text{ns}} \quad (3)$$

其中， α_0 為線性吸收係數 (linear absorption coefficient)，表示飽和吸收體未飽和時的損耗； α_{ns} 為非飽和時的吸收係數 (nonsaturable absorption coefficient)，為材料本身的線性光學損耗， I_{sat} 為飽和吸收強度。根據 Beer-Lambert law， $T = I_{\text{out}}/I_{\text{in}} = \exp(-\alpha(I) \times L)$ ，光穿透厚度為 L 的飽和吸收體時穿透率可用公式 (4) 表示⁽¹⁰⁾：

$$T(I) = \exp \left(\frac{-\alpha_0 L}{1 + \frac{I}{I_{\text{sat}}}} - \alpha_{\text{ns}} L \right) \quad (4)$$

圖 4 為飽和吸收體非線性吸收示意圖，完全穿透值和飽和穿透值之間的差定義為本質損耗 (nonsaturable loss)，表示試片本身的線性光學損耗。飽和穿透到最低穿透值的差為調制深度 (modulation depth)，調制深度越大，表示脈衝高強度的中心部分與兩側低強度部分的穿透率差越大，脈衝寬度壓縮之塑形的能力越好。當低強度的光入射飽和吸收體時，飽和吸收體未達飽和，對入射光衰减小，穿透率幾乎不變；而當入射光強度漸增達到飽和吸收強度時，被激發至飽和吸收體上層能階的電子增加，同時在低能階的電子數減少，造成飽和吸收體非線性的吸收行為。當飽和吸收體達到飽和狀態時，高能階與低能階上的電子數達到平衡，使飽和吸收體對光的衰減變小，入射光可直接穿透⁽¹¹⁾。因此雷射光的脈衝中心部分在經過飽和吸收體時衰減較小，脈衝兩側部分有較高的吸收，如圖 5 所示⁽¹²⁾。當脈衝在共振腔中重複地經過飽和吸收體後，脈衝會被壓縮到極限值，被動鎖模雷射就是

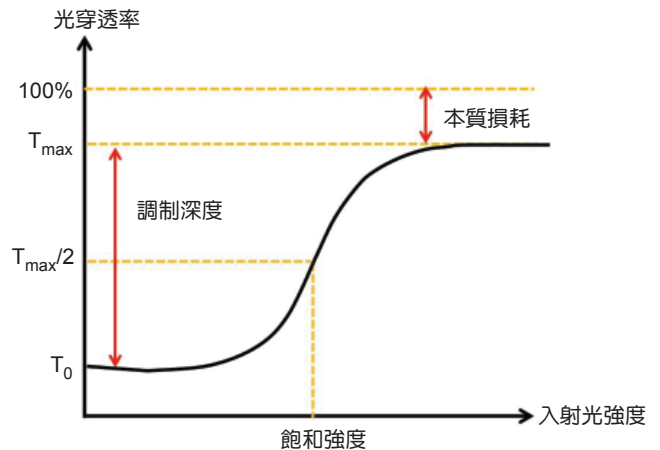


圖 4. 入射飽和吸收體光強度對穿透率關係圖。

利用飽和吸收體的非線性吸收效應將連續波雷射輸出重塑成強度高的週期性短脈衝輸出。

三、石墨烯飽和吸收體的製程方法

目前製備石墨烯的方法有很多種，如機械剝離法、氧化石墨烯還原法、電化學法等。在本研究中使用的方法有兩種，一為濕製程製作的石墨烯薄片 (graphene flakes)－聚乙烯醇飽和吸收體薄膜。另一為化學氣相沉積 (chemical vapor deposition, CVD) 生長的結晶層狀石墨烯 (atomic-layer graphene)。

1. 濕製程製作之石墨烯－聚乙烯醇薄膜

石墨晶體是由一層層的單原子層石墨片堆疊形成，碳原子間是以 sp^2 鍵結，而層與層之間以凡

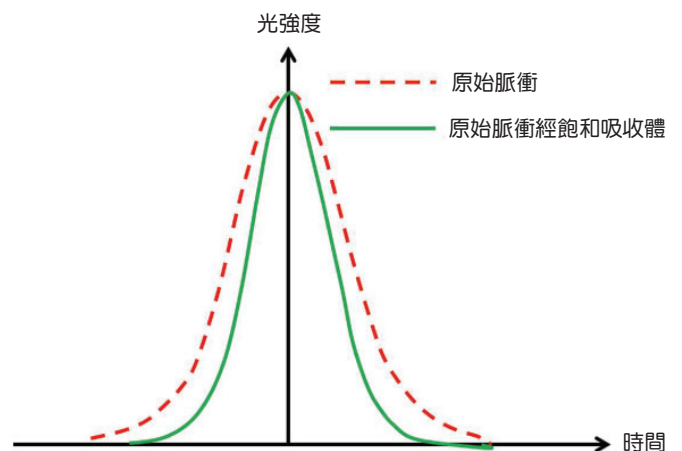


圖 5. 飽和吸收體脈衝整形示意圖。

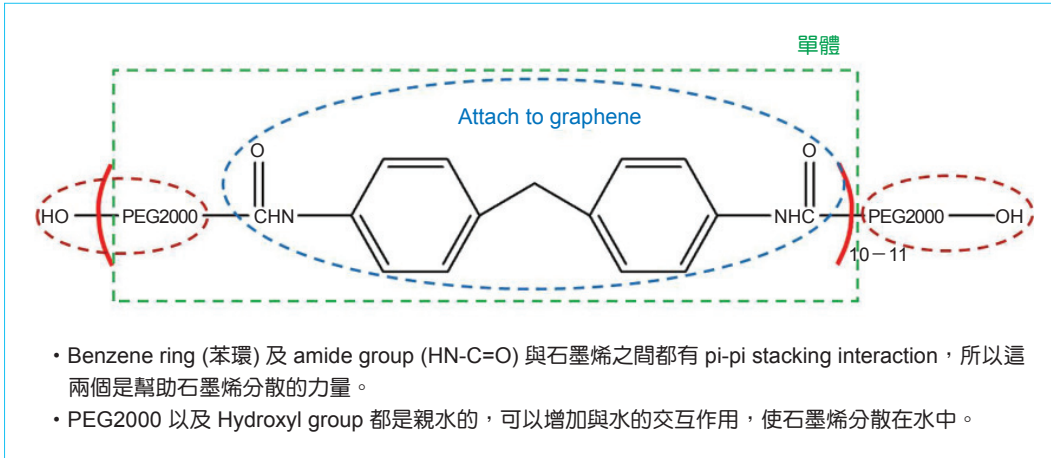


圖 6. 分散劑 polyurethane (PU) 之化學結構與分散機制^(13, 14)。

得瓦力 (van der Waals force) 連接。因為石墨烯結構完整、化學穩定性高、與溶劑間的作用力弱，且石墨烯片與片間有較強的凡得瓦力，因此容易產生聚集現象，使其難以分散於水及常見的有機溶劑中。本研究利用 polyurethane 做為分散劑，polyurethane 為一種界面活性劑，其化學式如圖 6 所示^(13, 14)。當 polyurethane 與石墨烯一起溶於水中時，polyurethane 中間的苯環部分可吸附石墨烯表面，兩邊親水端與水作用，使石墨烯薄片可以均勻分散於水中。相較於石墨烯化學改質的分散方式，利用這種界面活性劑的方式來分散石墨烯薄片較不會造成石墨烯表面結構的破壞。

以溶液混合 (solution blending) 方式製備石墨烯飽和吸收體薄膜分兩步驟。首先準備前置液，利用 polyurethane 將石墨烯均勻分散於去離子水中，再加入聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 形成前置液。PVA 為水溶性高分子材料，具有良好的造膜性，耐磨、伸張強度佳，對溶劑、氧氣阻絕性高，PVA 同時擁有親水性及疏水性兩種官能基，因此提供水溶性及界面活性的性質。其次為飽和吸收體薄膜試片製程，利用旋轉塗佈法 (spin coating) 來製作飽和吸收體薄膜。首先將玻璃基板固定於旋轉塗佈機的真空吸嘴上方，將石墨烯-PVA 前置液滴於玻璃基板上，以不同的轉速來控制薄膜的厚度，之後在室溫下乾燥。利用此方法製作的飽和吸收體中石墨烯的排列是隨機而沒有方向性的。

2. 結晶層狀石墨烯

我們也利用結晶狀的石墨烯做為飽和吸收體。利用 CVD 方式可以有效控制及製備石墨烯，製備的流程如圖 7 所示，將金屬基板 (鎳或銅) 置於高溫可分解的含碳氣體中 (如甲烷、乙烯等)，通過高溫退火使碳原子沉積在基板表面形成石墨烯，最後利用化學蝕刻方式去除金屬基板即可得到石墨烯薄片。透過選擇基板的種類、生長的溫度、前驅氣體的流量等參數可控制石墨烯的生長速率、厚度及面積。利用 CVD 方式成長的結晶狀石墨烯缺陷少，其堆疊的方式大部分為近似 A-A 堆疊 (A-A stacking)，與一般的機械方式剝離得到之石墨烯中的 A-B 堆疊方式不同，可保持單層石墨烯的電子特性也可以成長出大面積單層或多層石墨烯⁽¹⁵⁻¹⁸⁾。

四、石墨烯飽和吸收體的光學特性量測

1. 飽和吸收體線性吸收特性

圖 8 為石墨烯飽和吸收體線性吸收頻譜之量測，試片為濃度 6.25 wt%、厚度 18 μm 與濃度 3.125 wt%、厚度 22 μm 之石墨烯-PVA 薄膜。圖 9 為結晶層狀石墨烯試片之線性吸收頻譜，石墨烯層數為 21 層。根據石墨烯的電子結構，其特性為寬波段的吸收，兩種飽和吸收體試片由圖可顯示出從波長 1000 nm 到 2000 nm 並無特定的吸收波段，如同理論所預測，可做為試片中石墨烯濃度之依據⁽¹⁹⁾。

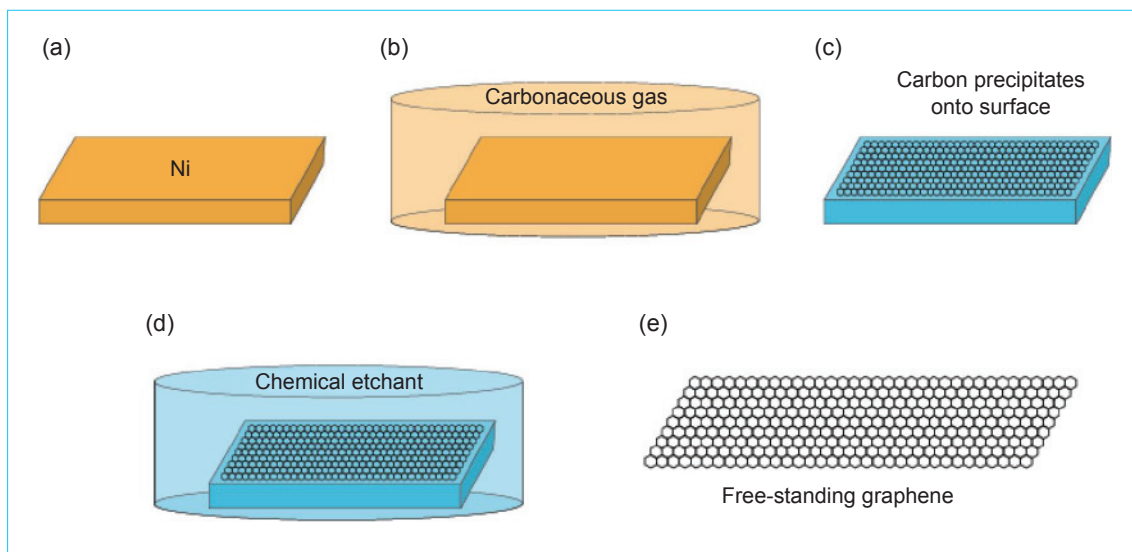


圖 7. CVD 法成長石墨烯示意圖⁽¹⁶⁾。

2. 飽和吸收體非線性穿透特性

圖 10 為濃度 6.25 wt%、厚度 18 μm 石墨烯-PVA 薄膜之非線性穿透率量測結果，我們可計算出其調制深度約為 1.6%，本質損耗為 88%。圖 11 為 21 層結晶石墨烯飽和吸收體之非線性穿透率量測，調制深度為 2.93%，本質損耗約為 53.05%⁽²⁰⁾。

五、全光纖超快雷射架構

1. 雷射系統架構

圖 12 為本實驗中被動式鎖模光纖雷射架構，腔長約 7.6 公尺，包含光纖元件：摻鉍光纖 (Liekki

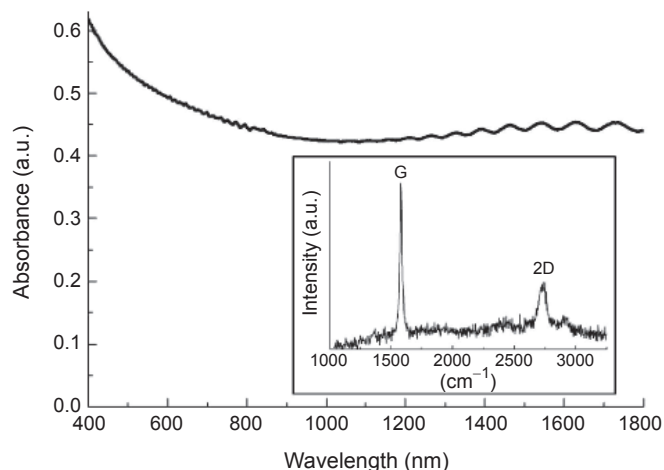


圖 9. 結晶層狀石墨烯飽和吸收體線性吸收頻譜及拉曼光譜圖(內圖)。

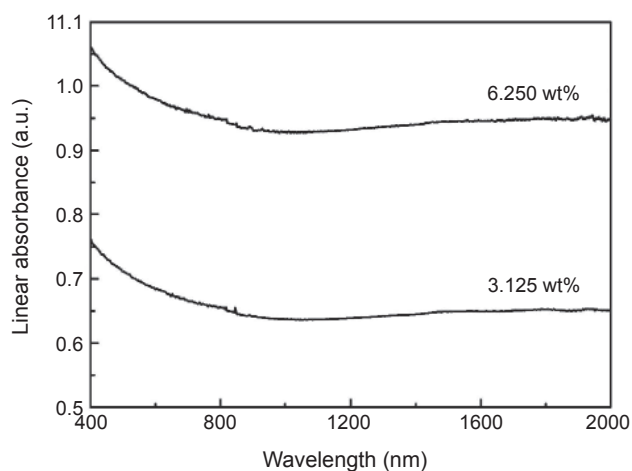


圖 8. 石墨烯-PVA 飽和吸收體線性吸收頻譜。

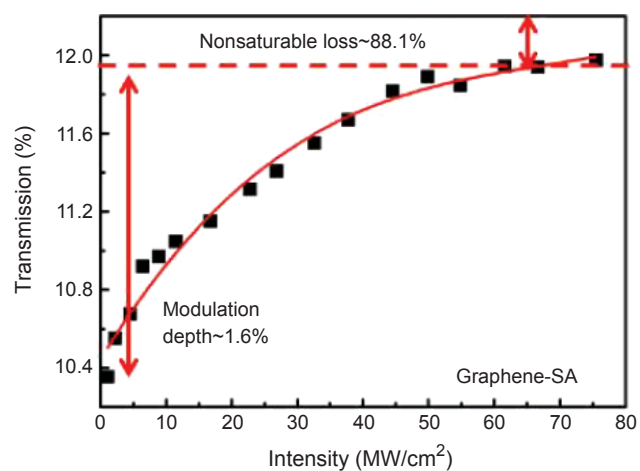


圖 10. 石墨烯-PVA 飽和吸收體之非線性量測。

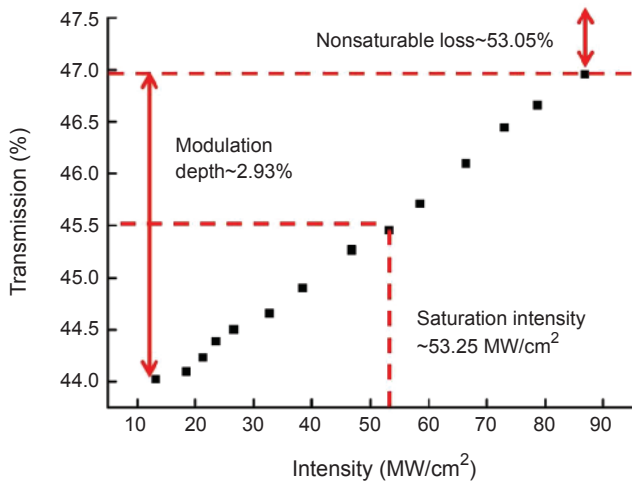


圖 11. 結晶層狀石墨烯飽和吸收體之非線性量測。

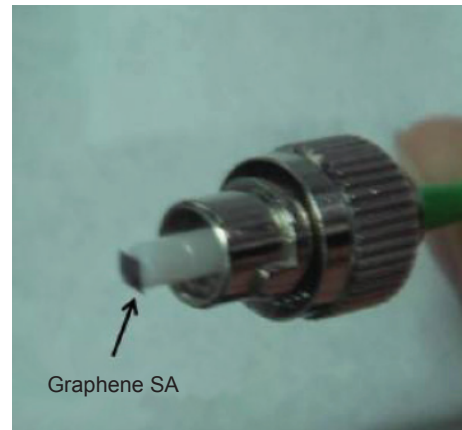


圖 13. 石墨烯飽和吸收體置於光纖接頭中。

Er80-4/125)、分波多工器 (wavelength-division multiplexing, WDM)、極化控制器 (polarization controller, PC)、光隔離器 (isolator) 及光耦合器。激發光源為波長 980 nm 的半導體雷射，通過摻鉕光纖後會激發鉕離子產生 1550 nm 的光，之後再通過飽和吸收體產生脈衝整形作用，最後由光纖耦合器部分回授至共振腔內，部分由輸出端接到示波器、光譜儀及自相關儀做雷射脈衝之特性量測。腔內的光隔離器主要用來防止反射，確保共振腔中光的單向傳輸，極化控制片則用來微調雷射光的極化方向。我們將石墨烯飽和吸收體薄膜裁成 1 mm^2 之小片，置入兩 FC/APC 光纖連接器中間，如圖 13 所示。

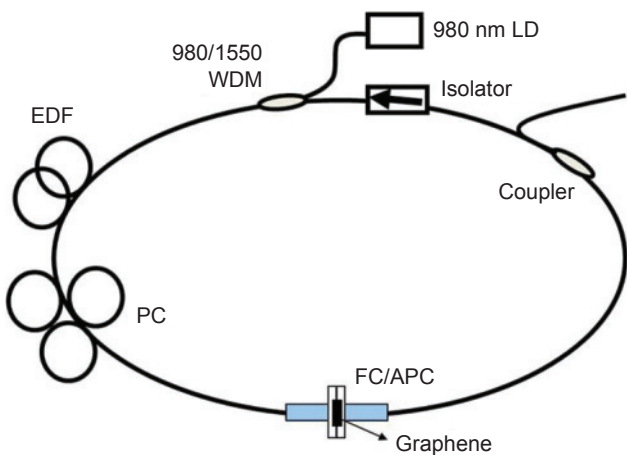


圖 12. 環型共振腔架構。

2. 雷射量測結果

我們可利用量測到的光譜及脈衝寬度求得脈衝時間寬度－頻寬乘積 $\Delta\tau\Delta\omega$ (time-bandwidth product, TBP)，來解釋脈衝壓縮的結果，TBP 值是否接近轉換極限的最小值，可以判斷脈衝是否有啾頻 (chirping) 存在，hyperbolic secant squared (sech^2) 脈衝的 TBP 最小值為 0.315，若 TBP 接近此最小值，則此脈衝無啾頻存在 (chirp-free)。

以石墨烯－PVA 薄膜做飽和吸收體的量測結果其光譜及脈衝大小如圖 14 與圖 15 所示，起始鎖模功率為 70 mW 時，光譜寬度為 5.76 nm，脈衝 463 fs；當提高功率到 78 mW，光譜寬度為 6.32 nm，脈衝縮短到約 403 fs，平均輸出功率為 1.71

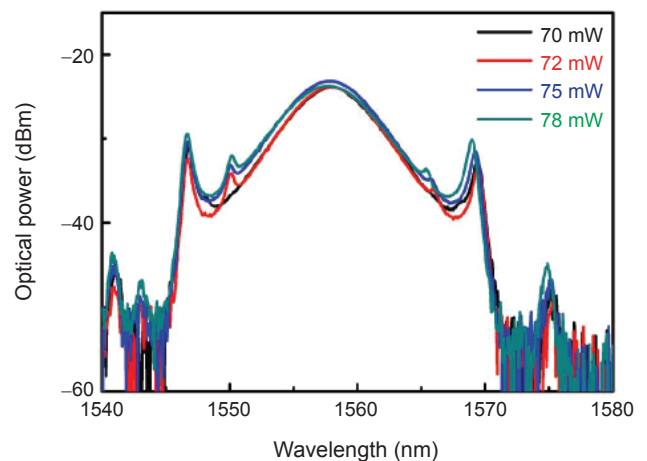


圖 14. 濃度 6.25 wt% 厚度 $18 \mu\text{m}$ 石墨烯－PVA 試片之光譜圖形。

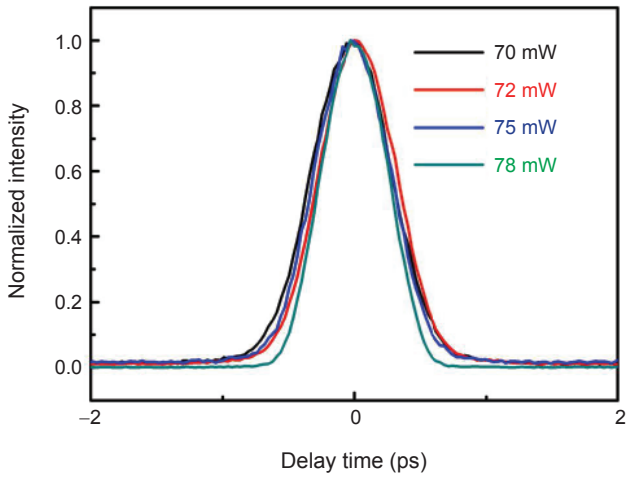


圖 15. 濃度 6.25 wt% 厚度 18 μm 石墨烯-PVA 試片之鎖模脈衝波形。

mW，計算得 TBP 值接近 0.315 理論的最小值，顯示脈衝壓縮達到極限。

以 21 層結晶狀石墨烯做飽和吸收體置於雷射環腔中，在激發功率 53 mW 時出現鎖模現象 (fundamental mode locking, FML)，圖 16 為鎖模雷射輸出在示波器觀察到之脈衝序列輸出，脈衝間隔約為 41 ns，重複頻率 (repetition rate) 為 24.15 MHz。

圖 17 為鎖模狀態下，不同幫浦功率下所量測到的光譜圖形。其光譜圖形為穩定的光孤子鎖模 (soliton-like) 光譜。孤立子現象是指共振腔中色散與非線性效應作用抵銷，造成脈衝無啾頻存在，所以在非線性 SPM 與負的 GVD 補償下可以得到最

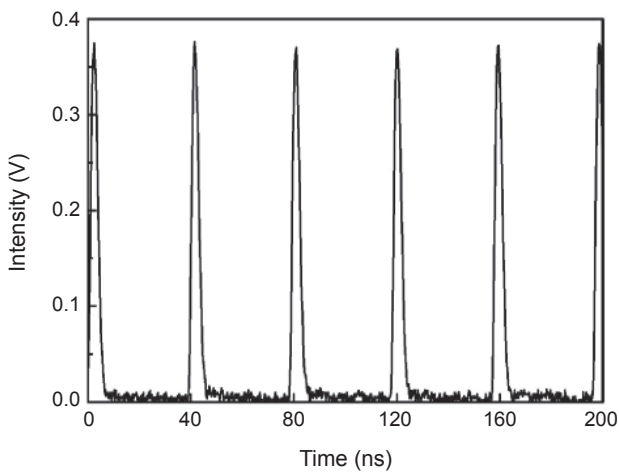


圖 16. FML 鎖模雷射輸出之時域脈衝序列。

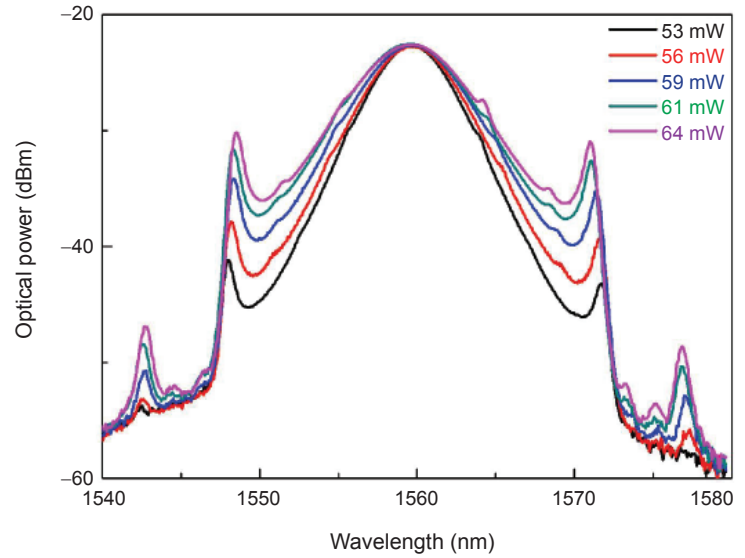


圖 17. 結晶層狀石墨烯試片 (層數 21) FML 之光譜圖形。

短的脈衝。在光孤子鎖模操作下，脈衝在行進時可維持波形，為較穩定的鎖模狀態。當幫浦功率增加到 64 mW 時，光譜頻寬從 4.64 nm 展開到 6.16 nm。對應的脈衝寬度如圖 18 所示，脈衝寬度由 564 fs 縮短到 432 fs，平均輸出功率為 2.01 mW。

當進一步增加幫浦功率達到諧波鎖模 (harmonic mode lock, HML) 之起始功率，幫浦功率約 74 mW 時，會產生諧波鎖模之現象，此時脈衝會分裂，一個週期中有兩個脈衝存在，脈衝重複率變成原本的兩倍，約 50 MHz，如圖 19 所示。

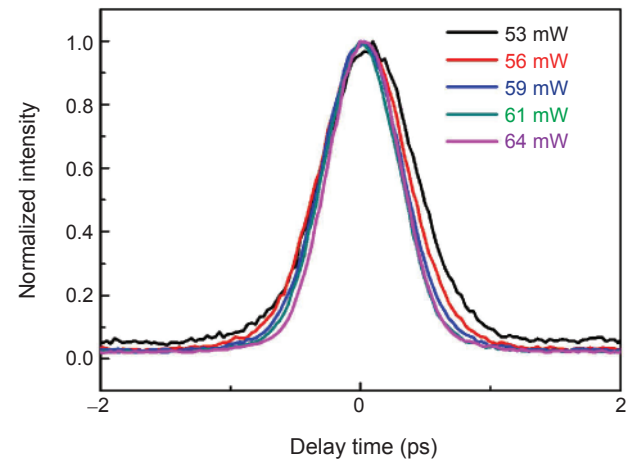


圖 18. 結晶層狀石墨烯試片 (層數 21) FML 之鎖模脈衝波形。

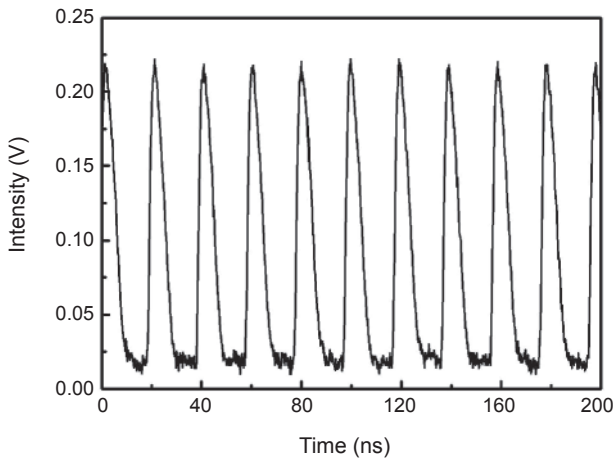


圖 19. HML 鎖模雷射輸出之時域脈衝序列。

六、結論

本文討論摻雜石墨烯飽和吸收體應用於被動鎖模雷射之脈衝特性，石墨烯薄片分散於高分子基材中製成的薄膜及不同層數的結晶狀石墨烯皆可當作飽和吸收體，用來產生超短脈衝輸出。利用腔外線性吸收及非線性穿透量測可了解飽和吸收體試片之材料光學特性，從量測結果可知石墨烯-PVA 薄膜之製備過程受分散性影響大，試片之線性損耗較大，且調制深度較小，而結晶層狀石墨烯為較完整的結構，穿透率較高，調制深度較大，顯示結晶狀石墨烯的脈衝塑形能力較好，為較理想的飽和吸收體材料^(21, 22)。

在摻錒光纖雷射架構中，可藉由比較不同試片之光譜及脈衝圖形來了解試片之結構對於鎖模脈衝之影響。經由控制石墨烯-PVA 薄膜的濃度、厚度以及選擇結晶狀石墨烯之層數得到特性較佳的飽和吸收體。量測結果為 6.25 wt%、厚度約為 18 μm 的石墨烯-PVA 薄膜有最佳脈衝寬度約 403 fs；21 層結晶狀石墨烯可得到輸出脈衝寬度約 432 fs，TBP 計算兩者皆很接近理論的最小值，顯示脈衝壓縮達到極限。

相對於半導體鎖模元件 SESAM 雖可精確控制參數，但因需要複雜的半導體製程且只能應用於反射的方式，因此限制其發展的普遍性。繼而發展出的奈米碳管飽和吸收體製程簡單、成本低且可產生

超短脈衝，但卻有熱效應 (thermal damage) 的問題產生。而最近石墨烯飽和吸收體成為研究重點，如果選取結晶狀石墨烯做鎖模元件則熱傳導不成問題，加上其寬波段的吸收及較大的調制深度，使得石墨烯可望成為更有潛力的飽和吸收體材料。

參考文獻

1. 葉昭永, 劉懿修, 台灣雷射科技應用季刊, **10**, 2 (2010).
2. M. E. Fermann, *Ultrafast fiber oscillators*, New York: Marcel Dekker, Ch. 3 (2003).
3. N. J. Doran and D. Wood, *Opt. Lett.*, **13**, 56 (1988).
4. M. I. Katsnelson, *Materials Today*, **10**, 20 (2007).
5. *Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2010 Graphene*, Physics of the Royal Swedish Academy of Science (2010).
6. <http://cmnst.ncku.edu.tw/files/16-1023-65829.php>
7. A. H. C. Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, *Reviews of Modern Physics*, **81**, 109 (2009).
8. Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z. X. Shen, K. P. Loh, and D. Y. Tang, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 3077 (2009).
9. Y. W. Song, S. Y. Jang, W. S. Han, and M. K. Bae, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 051122 (2010).
10. E. Garmire, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 1094 (2000).
11. C. Rulliere, *Femtosecond Laser Pulses: Principles and Experiments*, New York: Springer (1998).
12. 邱金城, 奈米碳管飽和吸收體增強鎖模雷射非線性自相位調變之研究, 國立中山大學博士論文 (2010).
13. M. Xu, T. Zhang, B. Gu, J. L. Wu, and Q. Chen, *Macromolecules*, **39**, 3540 (2006).
14. L. T. Z. Korley, S. M. Liff, N. Kumar, G. H. McKinley, and P. T. Hammond, *Macromolecules*, **39**, 7030 (2006).
15. Y. J. Hu, J. Jin, H. Zhang, P. Wu, and C. X. Cai, *Phys. Chim. Sin.*, **26**, 2073 (2010).
16. A. N. obratsov, *Nat. Nanotechnol.*, **4**, 212 (2009).
17. P. Lauffer, K. V. Emtsev, R. Graupner, Th. Seyller, and L. Ley, *Physica Review B*, **77**, 155426 (2008).
18. J. Hecht, *Laser focus world*, May 1st (2012).
19. R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, and A. K. Geim, *Science*, **320**, 1308 (2008).
20. F. Wang, A. G. Rozhin, Z. Sun, V. Scardaci, R. V. Pentyl, I. H. White, and A. C. Ferrari, *Int. J. Mater. Form.*, **1**, 107 (2008).
21. 林紹晴, 飽和吸收體摻雜石墨烯被動鎖模之研究, 國立中山大學碩士論文 (2011).
22. P. L. Huang, S. C. Lin, C. Y. Yeh, H. H. Kuo, S. H. Huang, G. R. Lin, L. J. Li, C. Y. Su, and W. H. Cheng, *Optics Express*, **20**, 24690 (2012).



黃碧鈴為中山大學光電工程研究所博士，現任中山大學光電系博士後研究員。

Pi Ling Huang received her Ph.D. in electro-optical engineering from National Sun Yat-sen University. She is currently the postdoctoral researcher in the Department of Photonics at National Sun Yat-sen University.



葉昭永先生為美國新墨西哥州大學光學科學研究所博士，現任金屬工業研究發展中心光學與雷射顧問。

Chao-Yung Yeh received his Ph.D. in optical science from the University of New Mexico, Albuquerque, USA. He is currently an optics and lasers consultant at Metal Industries Research and Development Center (MIRDC).



鄭木海先生為美國奧克拉荷馬州立大學物理博士，現任中山大學光電系教授。

Wood-Hi Cheng received his Ph.D. in physics from Oklahoma State University, Stillwater, USA. He is currently a professor in the Department of Photonics at National Sun Yat-sen University.