

極紫外光的感測與成像：螢光奈米鑽石的新應用

Sensing and Imaging of Extreme Ultraviolet Radiations: A New Application of Fluorescent Nanodiamonds

吳沛婕、張煥正、楊騰毅

Pei Jie Wu, Huan-Cheng Chang, Teng-I Yang

當今半導體業有賴摩爾定律來提升電晶體的性能，為了實現此一目標，極紫外 (EUV) 光刻是一項關鍵技術。EUV 輻射的波長短，介於10–121 nm 之間，製造商因此能夠在晶片上繪製奈米尺寸的電路圖案，推動半導體技術的革新，並確保摩爾定律的延續。隨著各種 EUV 輻射光源的產生，EUV 光束線的診斷變得至關重要，也成為熱門議題。本文探討了一項創新的 EUV 檢測器，使用螢光奈米鑽石 (FND) 薄膜作為閃爍體，將 EUV 光轉換為可見光，獲取影像。此裝置不易被高能量輻射損壞，非常適用於光束品質的評估和空間位置的監測，能夠提供全方位的資料以進行深入分析，並具備廣泛的應用潛力。

The semiconductor industry relies on Moore's Law to drive the advancement of transistor performance. Extreme ultraviolet (EUV) lithography is a key technology in achieving this goal. EUV radiations have short wavelengths (10–121 nm), allowing manufacturers to etch nanoscale circuit patterns on chips, thus advancing semiconductor technology and ensuring the continued relevance of Moore's Law. With the availability of various types of EUV light sources, beam diagnostics of the radiations has become critical, rendering the detector a crucial component. This article discusses an innovative EUV sensing and imaging device that uses fluorescent nanodiamond (FND) films as a scintillator to convert EUV light into visible light and produce images. The diamond-based scintillator is not damaged by high-energy radiations and is useful for assessing beam quality and monitoring its spatial positions, providing comprehensive information for in-depth analysis and wide-range applications.

一、前言

摩爾定律是半導體業中最為人熟知的準則，描述集成電路 (integrated circuit, IC) 可容納的電晶體數量每隔大約 18 至 24 個月便會翻倍，同時價格也會降低的發展趨勢⁽¹⁾。當今半導體製造業中，極紫外光光刻 (extreme ultraviolet lithography, EUVL) 正是為了實現摩爾定律的延續而成為一項至關重要的技術⁽²⁾。隨著電晶體尺寸的不斷縮小，傳統的技術 (例如 193 nm 光刻) 逐漸達到極限，無法再進一步提高解析度。EUVL 技術則以其極短的波長 (約 13.5 nm) 和高能量密度，突破了傳統光刻技術的限制，能夠製作出比以往更小、更複雜的晶片結構。使用 EUV 光源不僅僅拓寬了摩爾定律的實現範圍，還大幅提升了晶片的性能和耗能的降低，使得半導體產品能夠擁有更高的整合度、更低的能量消耗以及更快的運算速度。因此，EUVL 技術是半導體製造業的一次革命性進步，是繼續實現摩爾定律和推動科技進步的關鍵工具。其在半導體製程業中的應用，不僅僅擴展了現有技術的極限，還為未來的創新奠定了堅實的基礎。

為了實現摩爾定律所要求的在同一面積內增加電晶體數量和密度的目標，我們需要減小電晶體的線寬。線寬的縮小會直接增加了晶片上可以容納的電晶體數量，但同時也會影響整體晶片的尺寸大小，進而改變其運行速度和功率消耗。這項工程涉及光刻技術的改良和製程的控制，克服這項挑戰的方法包括提升光學系統的數值孔徑 (numerical aperture, NA) 及使用波長更短的曝光光源，使光能更精確地聚焦晶片表面上，並有更高的光學解析度，因此能夠製造尺寸更小、密度更高的電晶體結構。

現今大家耳熟能詳的半導體設備製造商—艾司摩爾 (ASML) 已經開發出一款最新的光刻機 Twinscan EXE:5000 (圖 1)⁽³⁾，其 13.5 nm 的波長和 NA 0.55 的數值孔徑成為了關注焦點。他們正在研發使用波長更短 (如 8 nm) 的光源，並搭配數值孔徑更大的透鏡，以實現小至埃米級 (如 0.8 nm) 的光刻製程。其他像是尼康 (Nikon) 和佳能 (Canon) 公司也有進一步拓展業務至 EUV 光刻機領域，由此可見 EUV 技術的前瞻性及其在半導體產業中所佔有的重要地位。

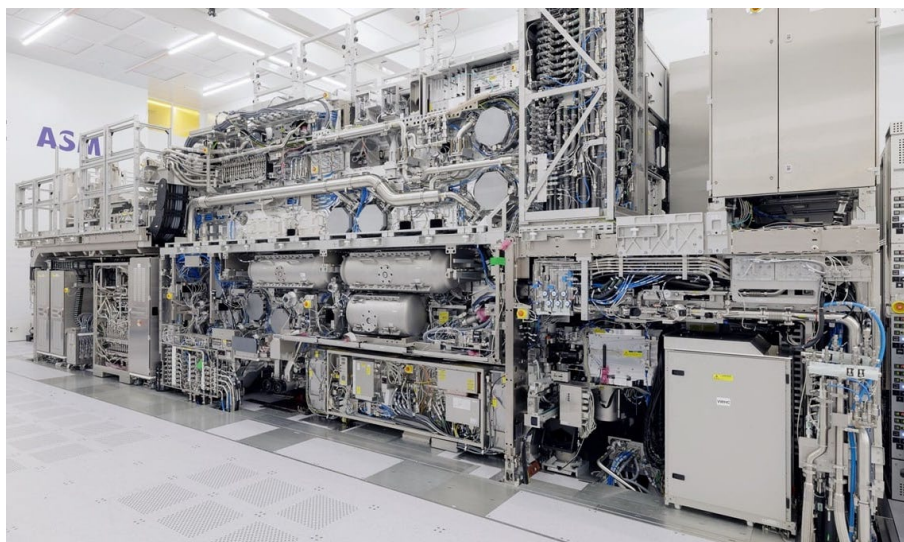


圖 1. 一台由 ASML 公司組裝完成的 EUV 光刻機，TWINSKAN EXE:5000⁽³⁾。

二、EUV 光源的產生

當今的半導體製造中，EUV 光源是推動半導體製程前進的最關鍵技術之一。目前產生 EUV 光源的方法有四：(1) 同步輻射光源 (synchrotron radiation facility, SRF)、(2) 放電激發電漿 (discharge-produced plasma, DPP)、(3) 雷射激發電漿 (laser-produced plasma, LPP)、(4) 高次諧波產生 (high harmonic generation, HHG)。

(1) 同步輻射光源 (SRF) 是一種當帶電粒子在高能加速器中經過強大的磁場加速與偏轉時所產生的電磁輻射現象。這種輻射涵蓋了遠紅外線至 X 射線範圍，EUV 光是其中之一⁽⁴⁾。常用的帶電粒子為電子，其強度和頻譜特性取決於該電子的能量、運動軌跡以及磁場的強度和結構。

磁鐵系統是同步輻射光源的核心元件之一，種類包括彎曲磁鐵 (bending magnet) 和聚頻磁鐵 (undulator)。彎曲磁鐵是利用強烈的彎曲磁場使帶電粒子偏轉，從而產生寬廣的輻射頻譜，這對光譜學研究和原子分子結構分析的應用至關重要。聚頻磁鐵則是一種設計精密的磁場結構，由許多個二極磁鐵重複排列而成，磁鐵方向交替變換，使得帶電粒子能在磁場中進行週期性橫向擺動和震盪，產生輻射 (圖 2)⁽⁵⁾。這種輻射的頻譜窄和方向性高，非常適用於高解析度光譜和微細結構分析方面的研究。

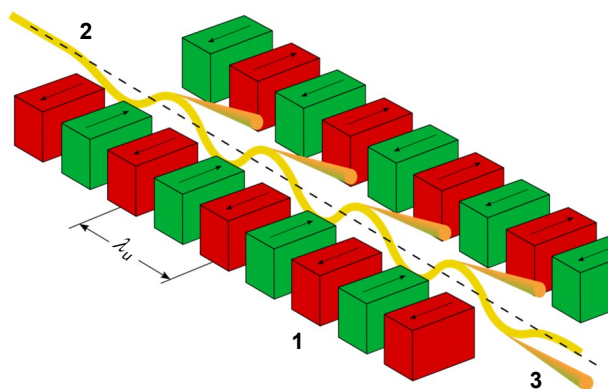


圖 2. 聚頻磁鐵的工作原理。1：磁鐵，2：從左上角進入的電子束，3：從右下角出射的同步加速器輻射⁽⁵⁾。

自由電子雷射 (free electron lasers, FEL) 是一種由同步輻射產生光源的方式之一，利用自由電子束在聚頻磁鐵中來回震盪，快速的橫向運動導致電子束輻射出同步輻射光。當電子束的能量和聚頻磁鐵的磁場強度相當時，輻射出的光在一定波長範圍內形成建設性干涉，產生高強度的光束。FEL 的特點是可以通過調節電子束的能量和聚頻磁鐵的參數，實現從紫外光到 X 射線的可調波長輻射。這使得 FEL 成為產生 EUV 光的理想工具，特別是對於需要精細控制和高亮度光源的應用，如半導體光刻。

在四種 EUV 光源中，SRF 技術展示了其獨特的應用價值，特別是它能產生高能量及極短波長的光源 (如 soft X-ray, SXR)，在開發尖端半導體製程中具有關鍵意義。此外，隨著技術的進步，FEL 系統在穩定性和效率方面不斷提升，為 EUV 光源的應用提供了更多可能性。未來，FEL 技術有望在高精度製造、材料科學和醫學成像等領域發揮更加重要的作用。

(2)放電激發電漿 (DPP) 是一種通過電弧或脈衝放電在氣體中所產生電漿，從中能發射出 EUV 光。在這個過程中，通過施加強大的電場，氣體或金屬蒸氣中的原子會被電離，形成高溫、高密度的等離子體。這些電漿中的電子和離子彼此經由激烈碰撞後會導致內層電子激發，並在返回基態時發射出 EUV 光子⁽⁶⁾。

常用的目標材料包括氙 (Xe) 或錫 (Sn) 金屬蒸氣，因其在 13.5 nm 波長範圍內會產生高亮度的 EUV 光而被廣泛應用。然而，DPP 技術仍面臨著一些挑戰，如有效管理高溫和控制雜質產生，需要嚴格的冷卻和雜質控制來保證系統穩定運行和光源純度。透過改良電極設計、提高放電穩定性、和改進冷卻技術，現代 DPP 系統的性能和效率已經獲得了顯著的提升。

(3)雷射激發電漿 (LPP) 是產生 EUV 光源的重要技術之一，它是利用高功率脈衝雷射打在標靶材料上 (通常是液態錫滴)，產生電漿。當雷射聚焦在這些錫滴上時，大量的能量吸收會迅速地加熱材料，使其溫度達到幾萬到數十萬度。在這種極端高溫下，蒸發後的錫原子會被電離，形成了高密度的電漿，再經由電漿中電子和離子之間的碰撞，產生大量的 EUV 光子。

LPP 技術也面臨如何有效收集和利用 EUV 光的挑戰，因此需要使用專門設計的多層反射鏡和濾波技術，來提升 EUV 光的使用效率。最終，這些收集到的 EUV 光會被引導並聚焦到光刻機中的目標位置，用於半導體晶片的製造。這些技術的進步使得 LPP 成為現代半導體製造中不可或缺的技术之一，特別是在高精度晶片製造中，LPP 所產生的短波長 EUV 光能夠實現極細微圖案的製造，推動半導體製程技術的不斷進步和創新。

(4)高次諧波產生 (HHG) 是一種尖端的非線性光學技術，它是利用非線性光學效應，將雷射激發光源的基頻轉換為高次諧波頻率，產生一系列短波長與極短波長的輻射光 (如 EUV)，常用的 HHG 介質為惰性氣體，如氬 (Ar)、氙 (Xe)、和氦 (He) 等⁽⁷⁾。

高次諧波產生的核心技術是一束高強度、飛秒 (femtosecond) 級的激發光脈衝，這種激發光脈衝擁有極高的瞬時功率和極短的脈衝寬度，常見的激發光波長為 800 nm。當這束雷射光被精確地聚焦到這些氣體介質中，在激發光脈衝的強電場作用下，氣體中的原子或分子會被光電離，釋放出自由電子。這些被釋放出的自由電子在激發光光場中被加速，隨著激發光電場的正負周期往返運動，獲得極高的動能，過程釋放出高能光子，即高階諧波光子，這些光子的頻率是激發光基頻的整數倍。因此，這些高次諧波光子的波長比基頻光子要短得多，可以落在 EUV 的範圍內。

雖然 HHG 本身不會直接「產生」新的激發光，但此技術能夠提供極短的脈衝寬度和高頻輻射，對於研究原子和分子尺度上的超快過程以及高分辨率成像有重要意義。高次諧波生成技術的應用擴展了我們對微觀世界的探測能力，並推動了雷射光技術和光子科學的進步。

三、EUV 的偵測方式

在討論 EUV 偵測器及其與 EUV 微影技術的關係時，我們不僅需要關注 EUV 偵測器的類型和性能，還需要探討它們在 EUV 微影過程中的重要性和應用性。特別的是，EUV 成像裝置扮演著關鍵的角色，能同時捕捉到 EUV 光場型和測量到 EUV 光通量，這些測量有助於實現現代半導體工業中更高解析度和更高密度晶片的需求。

EUV 的偵測方式有兩種：直接偵測和間接偵測。直接偵測是指 EUV 光子直接與偵測器元件 (如結構特殊的矽晶片) 反應，產生電流，通常透過半導體材料吸收光子並生成電子—

電洞對的方式來實現。此方法具有高效能和高精確度的優點，但是成像裝置的價格不菲，還有可能因為長期暴露於 EUV 照射下而損壞。

另一方面，間接偵測則是通過閃爍體 (scintillator) 來吸收 EUV 光子，並將其轉換為較容易測量的次級輻射，例如可見光。這種方法能有效降低對偵測器的直接輻射損壞，通過選擇合適的材料來調整對不同波長的響應，且能夠在較長時間內保持偵測器的性能穩定，因此選擇適用於高能量輻射照射的閃爍體作為材料就非常重要。

雖然兩者相比之下，直接型的偵測器具有相對高的量子轉換效率，但是在不同光子能量變化下，極有可能會影響檢測精度，且價格通常較間接型昂貴，故間接型量測的偵測器更加通用，可以適應各種裝置，並具有較高的成本效益。

要製作一個間接型的 EUV 成像裝置，關鍵在於選擇和優化閃爍體材料。閃爍體需要具備高量子轉換效率、極短的衰退時間、低殘影現象 (無光源激發仍能看到光)、高空間解析度、與真空環境相容、和不受高輻射損害等條件，而本研究團隊所發明的螢光奈米鑽石高度符合這些條件，故選用此奈米材料作為純碳材的閃爍體，開發一套適用 EUV/SXR 的成像裝置。

四、FND 的起源與特性

2005 年，本研究團隊率先開發一種新穎的奈米碳材：螢光奈米鑽石 (fluorescent nanodiamond, FND)，為全球首創⁽⁸⁾。2008 年，進行量產，其中最困難的一項工作是要在鑽石晶格中產生「氮－空缺中心 (nitrogen-vacancy center, NV)」，為達成此目標，我們自行建造了一台四萬電子伏特 (40 keV) 的離子加速器來轟擊奈米鑽石顆粒，產生氮－空缺中心，首次證明 FND 大量製作的可行性⁽⁹⁾。

經過多年的研發，FND 目前最佳的製作方式如下：(1) 使用高溫高壓合成的鑽石粉末為初始材料，經過 10 MeV 電子照射以產生碳空缺；(2) 在 800 °C 的真空中進行高溫淬火，這些空缺會移動到不同位置產生氮－空缺中心，並形成穩定的缺陷結構；(3) 在空氣中 450 °C 下氧化，去除鑽石表面在製程上產生的石墨類結構，最後製得高亮度的 FND。

FND 是一種具有 sp^3 結構的奈米材料，含有高密度的氮－空缺中心 (~10 ppm)，每個缺陷中心是由鑽石晶格中最接近的氮原子和碳空位所組成 (圖 3 中的插圖)。依據鑽石內部氮

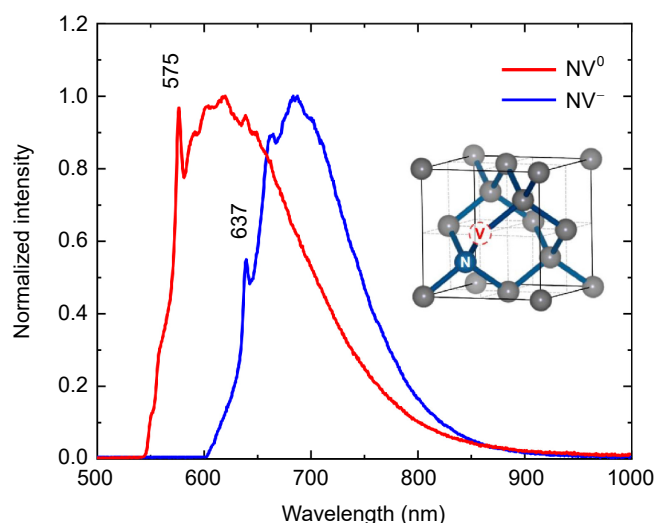


圖 3. 鑽石晶格中氮－空缺中心 (NV⁰、NV⁻) 的螢光光譜。插圖：鑽石晶格中氮－空缺中心的原子結構⁽¹⁰⁾。

含量的多寡，會形成兩種缺陷中心： NV^0 和 NV^- 。含有較高氮濃度 (> 100 ppm) 的鑽石主要生成帶負電的 NV^- 中心，其螢光光譜的零聲子線位置為 637 nm ，而低氮濃度 (< 10 ppm) 的樣品則會生成不帶電的 NV^0 中心，其螢光光譜的零聲子線位於 575 nm (圖 3)⁽¹⁰⁾。最特別的是，當受到 EUV/SXR 光照射時，FND 也會發出紅色的螢光，螢光光譜非常穩定，不會隨著激發光的波長改變而改變，完全來自於 NV^0 中心 (圖 4)⁽¹¹⁾。

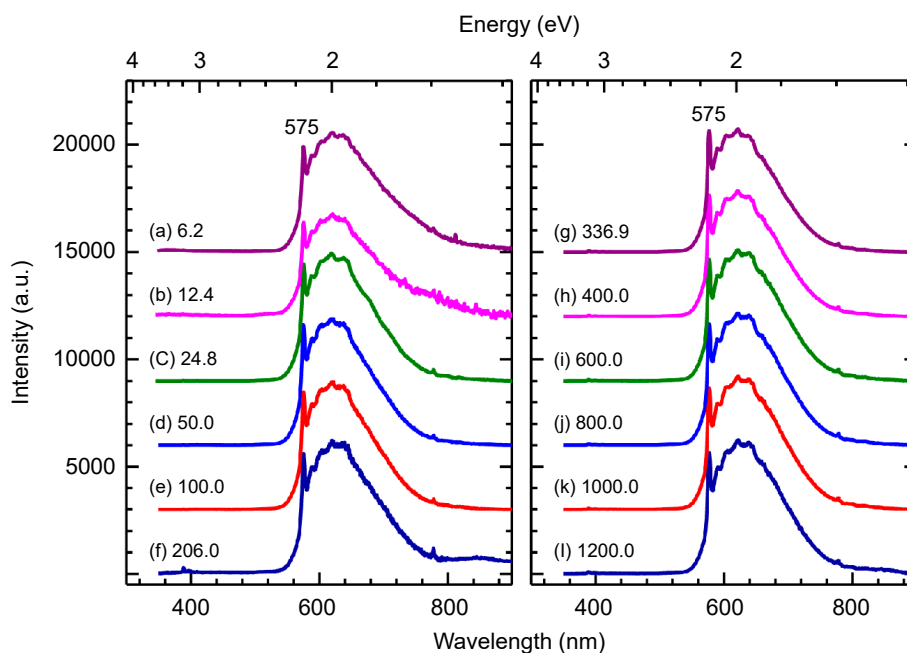


圖 4. 受到同步輻射光激發時，FND 產生的螢光光譜。同步輻射光束涵蓋的能量 (或波長) 範圍從 6.2 eV (或 200 nm) 至 1200.0 eV (或 1.0 nm)⁽¹¹⁾。

FND 主要的光學與物理特性有⁽¹⁰⁻¹³⁾：(1) 寬廣的紫外光吸收範圍，波長 $1-225\text{ nm}$ ，其波段包含 EUV 輻射範圍，甚至到 SXR，是一種適用於游離輻射偵測的閃爍體；(2) 強烈的螢光放射光譜，波長範圍為 $500-800\text{ nm}$ ，與常見的可見光感測元件作完美的搭配；(3) 極紫外-可見光量子轉換效率高，在 13.5 nm 波段處，有良好的量子轉換效率；(4) 線性的響應率 (responsivity)，動態範圍廣，光學穩定度高；(5) 螢光放射時間短 ($\sim 20\text{ ns}$)，與市售常用的 Ce-YAG 閃爍體比較，FND 的反應較快，同時殘影的狀況幾乎可以忽略；(6) 堅固且能抵抗高輻射損壞，相較於市售昂貴的偵測器，FND 製成的成像裝置是透過間接測量 EUV 光，感光元件的輻射損傷率低。

五、電噴灑塗佈技術

2023 年，本研究團隊使用自行研發的技術－電噴灑塗佈 (electrospray deposition)，成功地製造出均勻的 FND 薄膜⁽¹³⁾。由於 EUV 光源穿透鑽石的深度非常有限 ($< 100\text{ nm}$)，因此製作厚度約 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 FND 薄膜就能夠適用於所有 EUV 波段的感測與成像。本研究團隊積極優化實驗條件，以確保塗佈過程均勻且高效，從而提高此薄膜生產技術的可靠性和精準度。

FND 薄膜的形成主要透過施加高電壓，使含有 FND 的液滴能夠快速在空氣中分散成為多顆極微小的粒子，然後均勻地塗佈在導電基材 (如氧化銦錫，ITO) 上。此方法的優點在於塗佈的材料帶有電荷，會彼此排斥，因此會在空氣中自行分散，並且可以通過調整噴灑時間和流速來精確控制沉積的厚度和面積。這樣可以輕鬆地製備厚度超過 300 nm、面積超過 10 mm × 10 mm 的均勻薄膜。

圖 5 展示了電噴灑塗佈的過程與結果⁽¹³⁾。首先，將配置好的 FND 溶液注入針頭。在操作時，將高電壓 (+4 kV) 施加在針頭上，同時將 ITO 通過其支架接地。接著，透過噴灑形成帶電的霧狀液滴，這些液滴會沉積在 ITO 上。最終形成的薄膜呈圓盤狀，直徑約為 10 mm，厚度約為 1 μm ，對可見光具有約 50% 的透光率，表面平整度為 100 nm 左右。

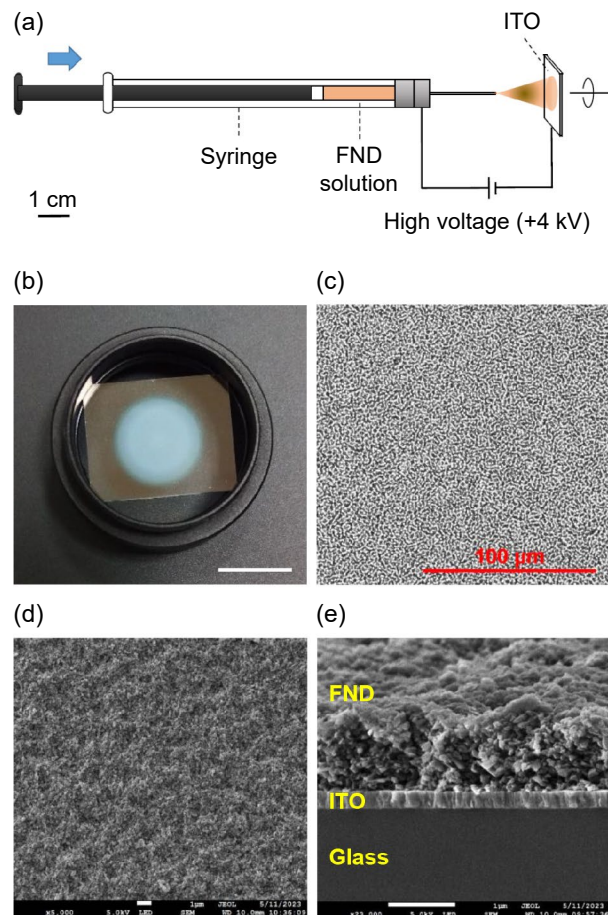


圖 5. (a) 電噴灑塗佈實驗裝置示意圖，(b) FND 薄膜塗佈在 ITO 玻璃上的照片，(c) 光學顯微鏡影像，(d,e) 掃描式電子顯微鏡影像 (d, 正面；e, 截面)，FND 薄膜的厚度約 1 μm ⁽¹³⁾。

電噴灑技術在生物醫學領域中有廣泛的應用價值，特別是在製造生物感測器和醫用影像設備方面。通過精確控制材料的沉積過程，此技術可以製造出符合醫療要求的薄膜，具有良好的生物相容性和穩定性，不僅僅能夠更新傳統的材料製造方法，還能開啟新的應用領域，在半導體和其他高科技領域中亦扮演著重要角色。未來的研究將不斷深化及擴展其應用範疇，促進更多創新和實用技術的發展。

六、FND-EUV 成像裝置

在現今的半導體工業中，EUV 光刻技術因其在尖端製程中的應用而引起廣泛關注。然而，由傳統矽晶片製成的 EUV 偵測器面臨著高能輻射損害和成本昂貴的問題，限制了其在實際應用中的普遍性。本研究團隊開發了一種 EUV 成像裝置，結合了先進的奈米材料和光學技術，克服這項挑戰。具體的說，我們利用含有高密度氮－空缺中心的 FND 作為閃爍體，將 EUV 光轉換為可見光，再用常見的感光元件探測之。這一創新使我們能夠在不同波長範圍內進行高解析度的 EUV 成像，適用於多種實際應用場景，如學術研究、醫學影像、和工業檢測等方面。

此 FND-EUV 成像裝置的原型機已經完成，如圖 6 所示。裝置中包括一個能固定於真空法蘭 (flange) 上的支架及 FND/ITO 玻片，一套精心設計的光學系統 (兩個具有不同焦距的透鏡)，用於接收和聚焦 FND 所發出的螢光，以及一個敏感的可見光偵測器 (如 CMOS)。經由這些元件的共同作用，我們能夠精確地捕捉並轉換 EUV 光束的能量，將其轉為適用於成像分析的電子信號。



圖 6. FND-EUV 成像裝置圖⁽¹³⁾。

使用國家同步輻射中心 (National Synchrotron Radiation Research Center, NSRRC) 的光束線 TLS21B2，我們對本 FND-EUV 成像裝置進行了全面的性能測試與評估。我們成功地測得波長為 13.5 nm 的同步輻射光束特徵，包括位置、尺寸、強度分佈、發散度、和指向穩定度等，空間解析度為 30 μm (圖 7)⁽¹³⁾。

此外，我們也量測了此成像裝置的效率，確定 FND 閃爍體的量子產率，同時評估在成像過程中的空間解析度和影像品質。雖然空間解析度可能不足以達到高精度成像的要求，但此裝置足以滿足即時對光束線位置的監測和準直需求，表現出卓越的靈敏度。

相較於市面上昂貴的 EUV 偵測器，本裝置體積小，成本低，同時能夠提供高效的成像功能。不僅能夠在空氣中輕鬆調整光束的偏移和進行自動對焦，以獲得準確的場型和成像效果，還具有出色的抗高能輻射損害能力。這得益於新型材料的使用和精心設計的光學系統，使得我們的裝置能夠長期穩定地工作，並在高能量環境中保持高效能，它不僅僅可作為用於對準目的的光束位置監視器，而且還可作為用於即時光譜研究的靈敏探測器。綜合這些優點，本 FND-EUV 成像技術在商業化應用方面具有顯著的競爭優勢。

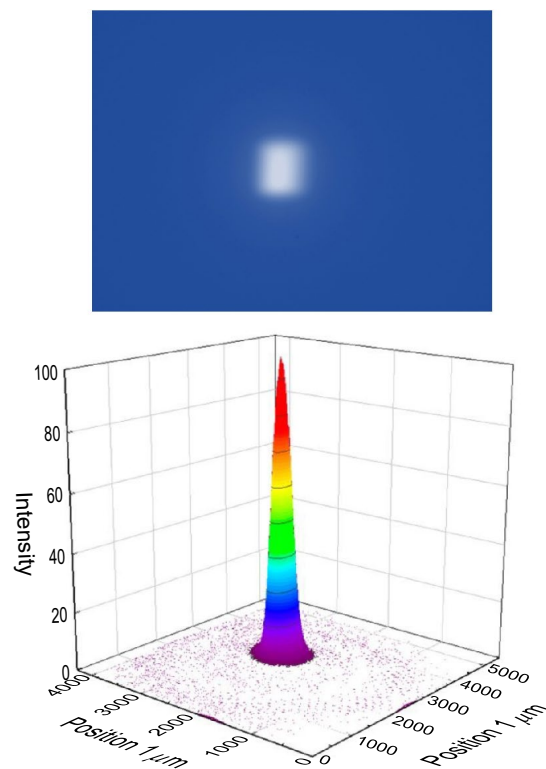


圖 7. 以 FND-EUV 成像裝置檢測同步輻射 (13.5 nm) 的光場型與光強度分布⁽¹³⁾。

七、結論

本研究所開發的 FND-EUV 成像裝置，通過其新穎的工業設計、高效的光子轉換能力、抗輻射損害能力以及高成本效益，展現了在科學研究和工程實踐方面的廣泛應用潛力，有極高的商品化價值。

本研究首創以鑽石材料作為閃爍體，不僅僅推動了 EUV 成像技術的前沿創新發展，還有助於開發新一代、更尖端的半導體晶片製程。

參考文獻

1. Moore's law, please refer to the website:
https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law
2. Bakshi, V. ed. EUV Lithography, Second Edition. Wiley, New York, (2018).
3. 5 things you should know about High NA EUV lithography, please refer to the website:
<https://semiwiki.com/forum/index.php?threads/5-things-you-should-know-about-high-na-euv-lithography.20056/>
4. Dattoli, G., Doria, A., Gallerano, G. P., Giannessi, L., Hesch, K., Moser, H. O., Ottaviani, P. L., Pellegrin, E., Rossmanith, R., Steininger, R., Saile, V., Wust, J., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, **474**, 259 (2001).
5. Undulator, please refer to the website:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Undulator>
6. Banine, V., Moors, R., *Journal of Physics D: Applied Physics*, **37**, 3207 (2004).
7. Goulielmakis, E., Brabec, T., *Nature Photonics*, **16**, 411 (2022).
8. Yu, S.-J., Kang, M.-W., Chang, H.-C., Chen, K.-M., Yu, Y.-C., *Journal of the American Chemical Society*, **127**, 17604 (2005).

9. Chang, Y.-R., Lee, H.-Y., Chen, K., Chang, C.-C., Tsai, D.-S., Fu, C.-C., Lim, T.-S., Tzeng, Y.-K., Fang, C.-Y., Han, C.-C., Chang, H.-C., Fann, W., *Nature Nanotechnology*, **3**, 284 (2008).
10. Yang, T.-I., Azuma, T., Huang, Y.-W., Hui, Y.-Y., Chiang, C.-T., Chang, H.-C., *Journal of the Chinese Chemical Society*, **70**, 451 (2023).
11. Lu, H.-C., Lo, J.-I., Peng, Y.-C., Chou, S.-L., Cheng, B.-M., Chang, H.-C., *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 3847 (2019).
12. Lu, H.-C., Peng, Y.-C., Chou, S.-L., Lo, J.-I., Cheng, B.-M., Chang, H.-C., *Angewandte Chemie International Edition*, **56**, 14469 (2017).
13. Yang, T.-I., Hui, Y.-Y., Lo, J.-I., Huang, Y.-W., Lee, Y.-Y., Cheng, B.-M., Chang, H.-C., *Nano Letters*, **23**, 9811 (2023).

作者簡介

吳沛婕女士現為國立台灣師範大學化學所碩士生。

Pei-Jie Wu is currently a M.S. student in the Department of Chemistry at National Taiwan Normal University.

張煥正先生為美國印地安那大學化學所博士，現為中央研究院原子與分子科學研究所特聘研究員。

Huan-Cheng Chang received his Ph.D. in Chemistry from Indiana University at Bloomington, USA. He is currently a Distinguished Research Fellow in the Institute of Atomic and Molecular Sciences at Academia Sinica.

楊騰毅先生為台灣大學光電工程所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Teng-I Yang received his Ph.D. in Photonics and Optoelectronics from National Taiwan University. He is currently an Assistant Researcher of Taiwan Instrument Research Institute, Narlabs.