



本刊取得美國麻省理工學院Technology Review 期刊圖文授權  
Technology Review,  
Published by MIT.  
TECHNOLOGY REVIEW  
internet URL: www.  
technologyreview.com

MIT  
Technology  
Review

這塊銑削過的鋁塊重達17噸，將製成艾司摩爾次世代EUV曝光機的上半部模組。

# 一窺全世界技術 最精密的機具

撰文／湯普森（Clive Thompson）  
攝影／潘恩（Christopher Payne）  
翻譯／連育德

摩爾定律原本就要成為過去式，直到荷蘭一家小公司打破物理極限，成功逆轉局勢。

魏倫（Patrick Whelan）穿著一身無塵室防護衣，透過面罩看著製程情況。

在他眼前是一塊發亮的玻璃，約莫烤箱大小，但為了減輕重量，許多部位已經被挖空，看起來彷彿外星圖騰。魏倫的工作團隊把玻璃黏貼到咖啡桌大小的鋁塊。玻璃和鋁塊經過幾星期的拋光，去除細微瑕疵，如今顯得異常光滑。接下來24小時，隨著黏著劑逐漸凝固，工作人員會幾近偏執地監測玻璃與鋁塊的位置，確保兩者密合。

「密合的精準度要到微米，」魏倫邊指著設備邊對我說。

此時附近的技術人員擔心他靠得太近，吆喝了一聲：「後退！」

「我沒碰到，我沒碰到！」魏倫笑著回應。

「精準度」在這裡並非兒戲。我來到荷蘭公司艾司摩爾（ASML）位於康乃狄克州威爾頓鎮（Wilton）的無塵室，這家公司生產全球最精密的微影製程（lithography）機台，是生產微晶片的電晶體、金屬線與其他關鍵零組件時，不可或缺的製程環節。這是眾家必爭的機台，一台要價高達1.8億美元，能夠迅速生產最小只有13奈米的微晶片元件。這般精準度很重要，因為客戶是英特爾或台積電等龍頭大廠，無不希望製造出全球速度最快的高階電腦處理器。機台最後會在荷蘭總公司組裝完成，有一輛小巴士的大小，裝有10萬個彼此連動的微型機制，其中一個系統以雷射光轟擊融化後的錫滴，每秒照射5萬次，藉此產生特定波長的高功率紫外線。整台機具需要動用到4架波音747飛機才有辦法運送給客戶。

「這是很高難度的技術，複雜度可比曼哈頓計畫（Manhattan Project；美國在二戰時的原子彈研發計畫），」英特爾微影製程主任史瓦庫馬（Sam Sivakumar）說。

在威爾頓廠，魏倫與團隊所打造的玻璃金屬模組尤為關鍵，接下來上面會有生產微晶片的必要圖案，快速反覆來回，由機具照射極紫外光（EUV）在上頭，照亮晶片圖案的不同部位。極紫外光接著反射到餐盤大小的晶圓，將線路圖案蝕刻到位。

魏倫走到一台視訊監視器前，從畫面可以看見一個玻璃金屬裝置來回移動，同時進行測試。該模組重達30公斤，但移動飛速。

「它加速的時間比戰鬥機更快，如果有東西鬆動了，會飛射出來，」短鬍子與眼睛都被防護衣遮住的魏倫表示，裝置還必須停在一個只有奈米大小的點上。「也就是說，全世界最快的設備之一要停在面積最小的一點。」

又快又準，正是維持摩爾定律（Moore's Law）不墜的關鍵所在。摩爾定律是指，隨著元件日益縮小，微晶片上的電晶體數量大約每2年增加1倍，連帶使得晶片的成本降低、性能增加。當電晶體裝得愈多，電信號在晶片移動的速度愈快。自1960年代以來，晶片廠大約每10年就改用波長更短的新光源，藉此微縮元件尺寸。但到了1990年代末，晶片廠的技術停留在波長193奈米的光源，對於未來要採何種技術亦爭論不休。在產業態勢日益嚴峻的背景下，晶片廠只好訴諸愈來愈複雜的設計與技術，才能維持摩爾定律，往後20年成功提升了晶片性能。

到了2017年，艾司摩爾推出立即可投入生產的EUV曝光機（又稱光刻機），使用波長只有13.5奈米的光源。有了這麼短的波長，晶片廠得以把更多電晶體塞在晶片裡，密度更勝以往技術。影響所及，中央處理器的運算速度更快、耗電量更低，或單純只是體積變小。第一代EUV微影技術的晶片已受到大公司如Google與Amazon的採用，用於改善語言翻譯、搜尋引擎結果、照片辨識，甚至是說話與書寫都異常有人性的人工智慧（例如GPT-3語言模型技術）。



玻璃夾鉗（圖中上的黑色長方形）夾住光罩；光罩上的圖案會轉印到晶圓。



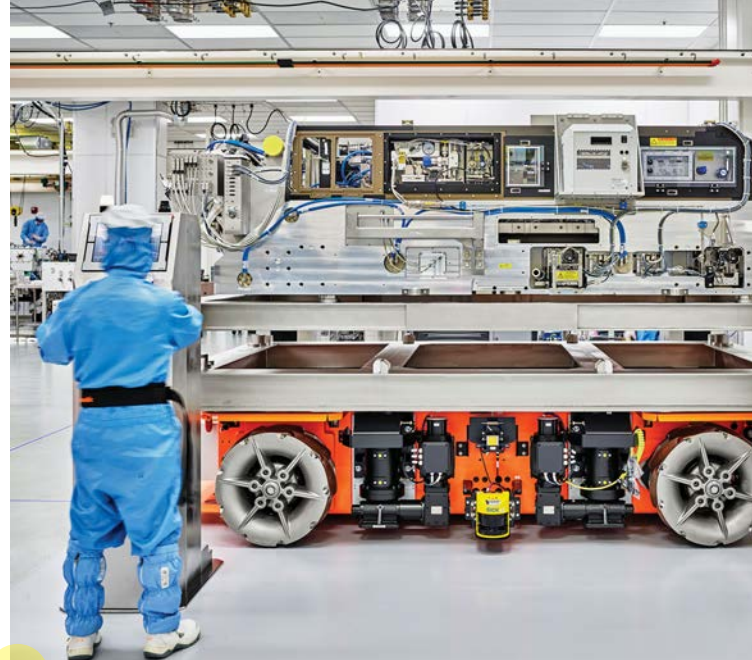
這場EUV革命也逐漸影響一般消費者。使用艾司摩爾機台所生產的晶片，產品應用多元，包括蘋果旗下幾款手機與Mac電腦、超微半導體（AMD）處理器、三星Note10+手機等。待EUV曝光機日後逐漸普及，日常裝置的性能會更加精進、電力需求也會降低。EUV技術亦有助於簡化晶片設計，晶片廠得以加快製程，在每片晶圓生產更多晶片，進而節省成本，消費者便能從中受惠。

EUV微影技術能否成功，原本還是未定之天。由於極紫外光非常難操控，多年來專家們一直預估艾司摩爾研發不出來；艾司摩爾的競爭對手——佳能（Canon）和尼康（Nikon）甚至在幾年前就已經棄守這項技術。如今，艾司摩爾站穩市場山頭，晶片廠想要生產先進處理器，就必須借重它的機台，而艾司摩爾每年只生產55台EUV曝光機，讓晶片大廠趨之若鶩，目前整體產業已安裝了千餘台。

「摩爾定律基本上正在瓦解，沒有這款機台就不存在了，」市調機構CCS觀點（CCS Insight）研究部主任林韋恩（Wayne Lam）直言：「沒有EUV技術，根本做不出先進處理器。」

微晶片製程的關鍵技術被一家公司所壟斷，已經極為少見，但研發這項技術的辛苦過程更讓人咋舌。艾司摩爾投入17年時間與90億美元研發，不斷重複著測試、微調、突破的過程，終於打造出EUV技術，並證實有效。然而，這項技術耗費無數時間心力又姍姍來遲，讓人不禁要問：EUV技術能夠讓摩爾定律維持多久時間？未來又有何發展？

曾在飛利浦（Phillips）服務多年的班夏普（Jos Benschop）於1997年加入艾司摩爾，正值晶片產業對未來惶惶不安的時刻。幾10年來，晶片製造工程師已經精通微影技術。這項技術的概念很簡單，設計好晶片元件（金屬線與半導體），再蝕刻在一系列光罩（Mask），道理就像轉印圖案到T恤上的模版。接著將每個光罩放在矽晶圓上方，照射光線（相當於在轉印模版上噴漆）。光線導致阻劑（Resist）硬化，亦即晶圓表面的化學層，然後其他化學物質再將圖案刻進矽晶圓。1960年代，晶

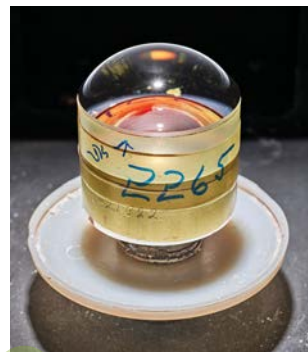


艾司摩爾使用這台由庫卡機器人（KUKA Robotics）公司所打造的橘色機器人，在無塵室移動厚重的EUV曝光機零件。

片廠運用可見光進行這個製程，波長最小達400奈米，後來改採波長為248奈米的紫外光，最終又降低到193奈米，也就是所謂的深紫外光。每次技術的升級，都讓摩爾定律再延續了幾年。

但到了1990年代末，晶片廠已經把深紫外光的波長縮到最小，不知如何進一步縮短，似乎有必要採取新的光源。此時的艾司摩爾還只是一家員工300人的小公司，銷售深紫外光曝光機有成，但它已體認到唯有深入研發，才有機會掌握市場脈動。

如今擔任主管職的班夏普身材高瘦，熱情又不失詼諧，是當初公司聘用的第一個研究人員。他出席1年2次的產業大型會議，來自晶片大廠與政府機關的專家正搓著下巴，爭論著未來應該使用哪一種光源。



這類經過拋光的光學元件是能量感測器的零組件，後者有助於控制曝光機內部的光源強度。



進一步細看拋光機。圖中的玻璃塊以特定角度放置，藉此達到正確的斜角。



艾司摩爾用這些拋光機研磨零組件，再裝進EUV曝光機。拋光過程分成好幾個階段，一個零組件可能要花上數週時間拋光，技術人員會檢驗平滑程度，達到奈米級的精準度。



幾個光學元件經過機械拋光。

「哪個才是新寵兒？」班夏普今年夏天接受本刊視訊訪問時說，與會產業專家考量幾種選項，每個都存在重大問題。像是噴灑離子，在晶片上畫出圖案，這項技術雖然可行，但沒有人知道如何大規模快速進行；發射電子束也是同樣的情況；有些專家主張使用波長很短的X光，但X光也不乏技術瓶頸；最後一個構想是極紫外光，波長最短可以達13.5奈米，接近X光波長，看起來最有望成真。

問題是，EUV光需要全新技術的曝光機。既有機台使用傳統玻璃透鏡，將光線聚焦在晶圓上，但EUV光會被玻璃吸收，完全無法作用。想要聚焦，就必須研發出類似用於太空望遠鏡的曲面鏡。更棘手的是，EUV光還會被空氣吸收，因此機台內部必須完全真空。此外，還要能穩定產生EUV光，但沒有人知道要怎麼做到這點。

英特爾（Intel）與美國能源部都曾經試探這個構想，但大多只停留在實驗階段。為了打造實際可行的曝光機，艾司摩爾必須研發出能夠迅速大量生產晶片的可靠技術。經過3年的深思熟慮後，艾司摩爾在2000年決定孤注一擲，專攻EUV技術。公司雖然小，但如果研發成功，就能轉型成產業領頭羊。

班夏普回憶道，當初有太多工程問題有待解決，「我們沒有全靠自己來的實力。」有鑑於此，艾司摩爾管理層先後致電給既有機台的零組件供應商，其中一通電話就是打給多年來為艾司摩爾生產

玻璃透鏡的德國光學技術業者蔡司（Zeiss）。

蔡司的工程師不乏EUV技術的經驗，包括生產X光望遠鏡用的高精準透鏡與反射鏡，但現在的技術難度在於如何在EUV反射鏡塗上矽與鉬交替的薄膜，每層厚度只有幾奈米。矽層與鉬層結合形成圖案，足以反射高達7成的EUV光。

更大的問題是如何拋光。曝光機最終需要11個鏡面反射EUV光，聚焦在晶片上，就好比有11個人打乒乓球，輪流傳球，最後打在一個目標點。由於目標是要蝕刻出以奈米為單位的元件，每個反射鏡必須要光滑到令人匪夷所思的地步，只要一丁點的瑕疵，EUV光子就會走偏。

舉例說明瑕疵的比例，如果把浴室鏡子放大到德國面積大小，鏡面可以看到大約5公尺高的突起物。拿蔡司當時既有最平滑的EUV反射鏡比較，要是同樣把它放大到德國大小，突起物只有2公分高。而艾司摩爾的鏡面光滑度必須高出更多，如果鏡片有德國面積大小，最大的瑕疵不到1公釐高，「這些是全世界最精準的鏡面，」在蔡司負責研發次世代EUV光學元件的克茲（Peter Kürz）說。

蔡司的工作有很大一部分在檢查鏡片有無瑕疵，接著使用離子束敲下個別分子，逐漸形成平滑表面，過程費時數月。

當蔡司還在反射鏡研發階段時，班夏普與其他艾司摩爾供應商則在設法克服另一個重大挑戰：研



發出能夠穩定生成EUV光的光源，而這個挑戰多年來讓他們百思不得其解。

要產生EUV光，必須先產生電漿，這是種只存在於極高溫的物質狀態。他們在早期實驗中以雷射脈衝轟擊鋰，藉此產生EUV光，後來因為鋰有更大的爆裂量，又改用錫。

到了2000年代初，艾司摩爾陸續與聖地牙哥公司西蒙科技（Cymer）和德國雷射公司創浦（Trumpf）合作，打造出機關重重的裝置。其中有個加熱容器，讓錫維持在液態。容器連接到噴嘴，射出錫滴，「直徑只有頭髮粗細的三分之一，」艾司摩爾的澳洲籍技術研發部副總裁布朗（Danny Brown）表示，當錫滴被射到機台底部，攝影系統會追蹤進度。錫滴到達發光槽的中心時，會被雷射脈衝轟擊，產生克氏（K）50萬度的高溫，氣化成發出EUV光的電漿。艾司摩爾的機台重複這個過程，射出並轟擊錫滴，每秒5萬次。

「只能說不簡單，」布朗淡淡地說。

儘管能夠產生EUV光了，布朗和團隊很快又發現新的問題：錫滴氣化後的離子會阻塞光學元件。他們發現，可以把氫氣打進發光槽，讓氫氣與錫離子產生反應，就能把離子清乾淨。

即便如此，他們的工作進度大幅落後。班夏普原本預估2006年前就能「大量」製造出EUV曝光機，但那時只做出2台原型機，雖然運作順暢，蝕刻圖案的精細度高出傳統微影機台，但速度卻牛步般緩慢。光源還是太微弱；每一顆光子在微影製程中都很重要。光子濃度愈高，圖案蝕刻到矽晶圓的速度就愈快。

在此同時，機台結構愈來愈複雜。有機器手臂移動晶圓；有馬達以32倍重力加速度移動光罩（亦即有圖案的大片玻璃）；有10萬個零件、3,000條電線、40,000個螺栓；有2公里長的軟管。更麻煩的是，所有零件彼此關聯，這個零件動起來，另一個零件可能出問題。比方說，EUV光產生的熱氣會改變反射鏡的尺寸，變化極其細微，於是蔡司與艾司摩爾只好研發出能夠檢測任何變動的感



近距離看固定光罩的玻璃夾鉗。

測器，一有變動就開啟軟體，使用高精準制動器調整反射鏡位置。

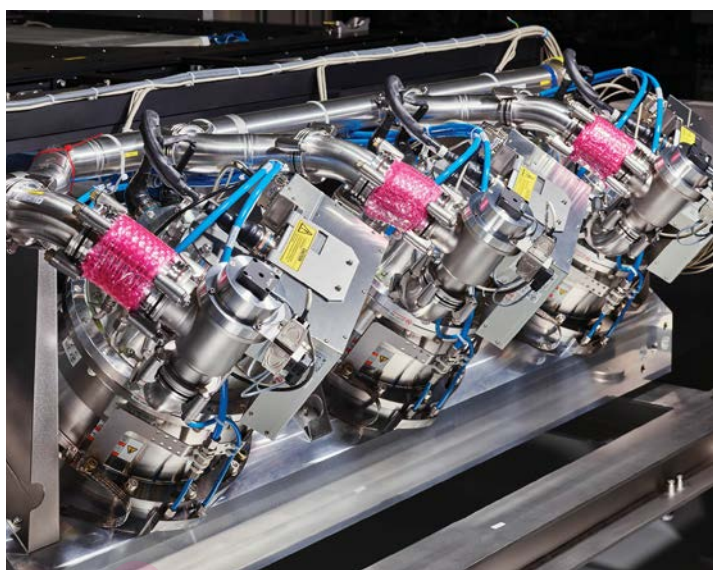
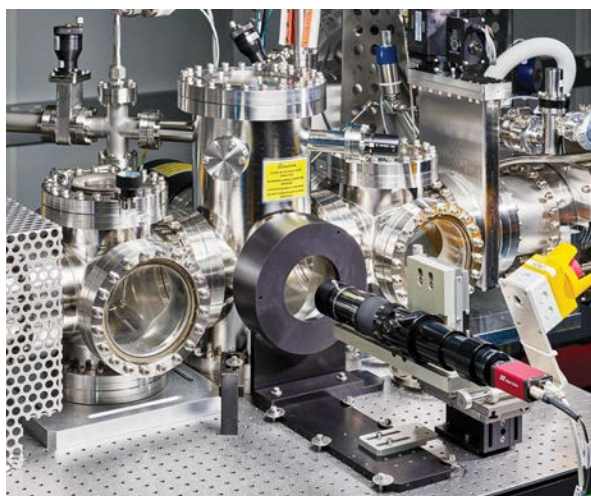
「我們解決完一個問題，又繼續處理另一個問題，」班夏普形容：「爬過一個山頭後，發現下一座山更高。」

微晶片產業有許多人看到艾司摩爾的進度一再落後，以為他們做不成了。「有95%的投資人覺得EUV技術絕對不可能成功，」任職於投資顧問公司Evercore的半導體產業分析師姆斯（C.J. Muse）說。

努力改良EUV技術的同時，艾司摩爾與同業也持續琢磨既有技術，希望盡量延長深紫外光的效能，把更多電晶體塞進晶片裡。像是有項技術稱為浸潤式（Immersion）微影，把一層純水放置在晶片表面，藉此將入射光線折射，讓光線聚焦在更小的圖案。微影技術工程師還研發出稱為「多重圖案化」（multiple patterning）的新技術，能夠多次轉印圖案到晶片層，並加以蝕刻，藉此形成更精密的細節。拜這些技術之賜，晶片元件成功縮小到20奈米。

然而，這些稀奇古怪的創新技術也導致晶片製程更加繁複。浸潤式微影需要在精細製程控制水量，並不容易；晶片設計人員為了配合多重圖案化技術，必須辛苦改變設計。深紫外光技術已經走到尾聲，大家心知肚明。

但到了2010年代中期，逐漸有跡象顯示，EUV終於可能扮演起拯救產業的角色。布朗與團隊深入研究科學文獻，希望能找到讓錫滴發揮更多作用的



上：這個位於艾司摩爾聖地牙哥廠的桌上型實驗裝置，主要用於測試鋁滴生成器；後者是EUV曝光機的光源零組件。

下：EUV光會被空氣吸收，因此需要這些渦輪分子泵抽除空氣與其他氣體，讓EUV曝光機形成真空狀態。分子泵每分鐘轉速達3萬轉，將氣體分子一個一個抽出去。

方法。曾在大學研究電漿物理學的布朗，在艾司摩爾內部是出了名地喜歡提出艱深的科學問題。公司技術長還曾經開玩笑地送他一個名牌，上頭寫著「科學上精準，實際上沒用」。

但這一次不同，鑽研科學文獻還是有用的。研究指出，可以用雷射轟擊每顆錫滴2次，第一次把錫滴打平成薄餅形狀，百萬分之一秒後轟擊第二次，產生更多EUV光。布朗的團隊於是研究出大規模轟擊的方法。

其他發現則是純屬巧合。隨著轟擊錫滴的技術逐漸改善，過程產生愈來愈多碎片，氫氣來不及清除，反射鏡的性能亦逐漸降低。但他們有天發現一件好笑的事：打開機台維修時，反射鏡的衰退速度反而變慢，原來空氣中的氧氣有助於逆轉汙染現象。艾司摩爾於是調整設計，讓機台偶爾加進小量氧氣。

到了2017年年中，艾司摩爾終於打造出展示原型，蝕刻晶片的的速度符合產業需求：每小時125片晶圓。布朗坐在聖地牙哥辦公室裡，看著荷蘭總公司的展示，他心情大好，已事先換上夏威夷襯衫，宣布說他終於可以度假了。

「機台發出滋、滋、滋的聲響，」他模仿起光罩迅速移動的狀況，機械手臂大約每30秒就送進1片新品圓，「當時它就像最後一塊骨牌，讓大家相信EUV微影技術終於要成真了。」

同年，艾司摩爾的機台終於開始出貨，踏出改造晶片製程的第一步。當市場意識到艾司摩爾在這項尖端設備占有壟斷地位，它的股價開始飆漲，一度高達549美元，公司市值直逼英特爾。

如果各位跟本文作者一樣同是機器迷，看到這座機台肯定目不轉睛，讚嘆它有如工程奇蹟。造訪威爾頓廠時，他們帶作者去看一個銑削過的超大型鋁塊，8呎長、6呎寬、2呎厚，是曝光機的上半部。它閃閃發光，彷彿太空船底座，有玻璃光罩，上頭還安裝了幾個龐大的桶狀分子泵。每個分子泵內建微型葉片，每分鐘轉速達3萬轉，抽出機具內所有氣體，形成真空狀態。「這些分子泵把氣體一

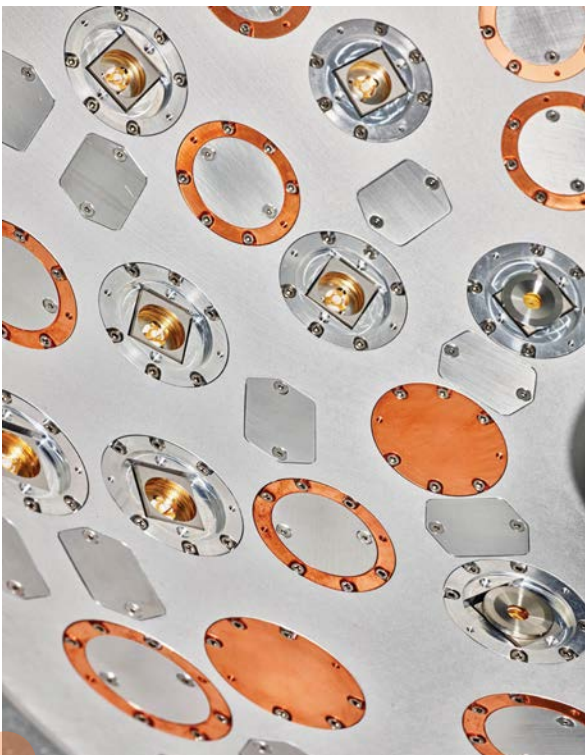


個分子、一個分子地打出去，」魏倫說。

有人會說，艾司摩爾之所以成功，主因不在於製造機台，而是測量機台的堅強實力。脫下防護衣後，本文作者前去參觀機械工廠，看到一大塊、一大塊玻璃經過切割，準備製成光罩。每片玻璃經過銑削後，再放置於拋光機，進行長達幾週、幾百個小時的拋光過程。該工廠主任卡波里諾（Guido Capolino）說，他們會不斷測量玻璃，監測去除了多少瑕疵，先從相對粗糙的微米下手。

卡波里諾指向身後的拋光機，可以看到幾片玻璃在拋光混合液慢慢旋轉。「我們的製程可變性到達埃米和納米的細節，」他說。玻璃是光罩的關鍵零組件，受熱時不容易像金屬一樣變形。但玻璃極不容易切割，這為工程師再添一個必須慢慢解決的挑戰。

艾司摩爾研發EUV機台有成，贏得微晶片產業的高度敬重。目前在晶片軟體公司Fractilia擔任技術長的麥克（Chris Mack），在晶片微影技術的經



EUV光源會導致曝光機裡的反射鏡累積碎片。反射鏡經過清潔與拋光後，會以這台機器檢查。

驗長達40年，他認為，艾司摩爾與合作夥伴的成功之道在於「敢別人所不敢，然後努力不懈」。

「他們就像在剝洋蔥，剝了這一層，發現有下一層，就繼續剝下去。沒有人真的知道洋蔥心是爛的，還是好的，大家只是一直剝下去，從來不放棄，很了不起，」麥克說。

元件得以繼續微縮化之後，英特爾、台積電與三星等大廠如今可以生產更快、更節能的晶片。

「我們的設計人員可以鬆一口氣了，」英特爾的史瓦庫馬（Sam Sivakumar）說：「摩爾定律有救了。」

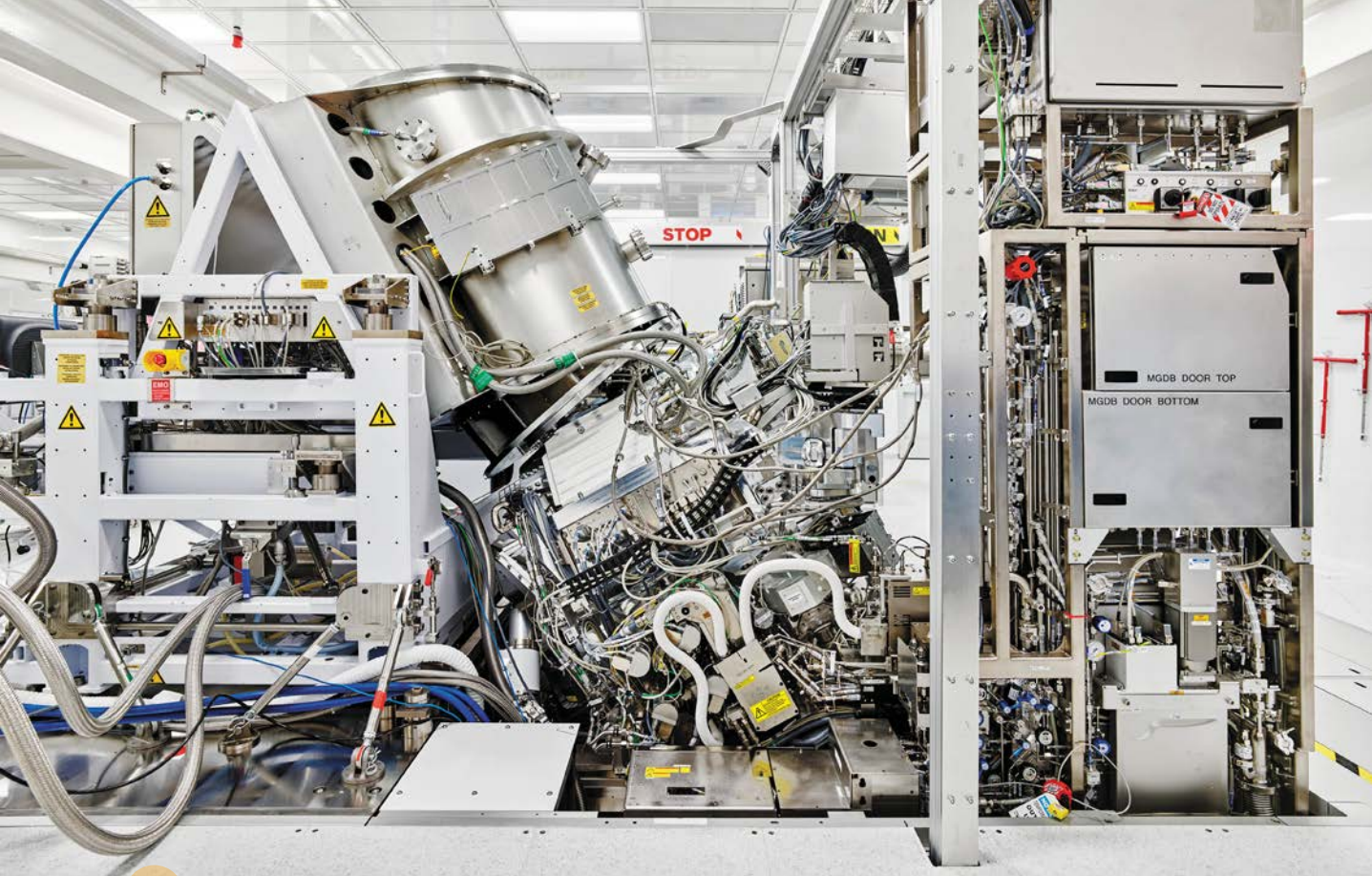
隨著更多EUV曝光機出貨、成本攤銷，這項技術的應用面將日益普及，出現在愈來愈多的日常裝置。中國大陸是唯一無法從EUV革命受惠的國家，至少短期是如此。

川普與拜登政府都擔心中國大陸的科技實力構成威脅，已成功施壓荷蘭政府，禁止艾司摩爾銷售EUV曝光機給中國大陸的客戶。

既然如此，中國大陸有辦法自己生產EUV曝光機嗎？有些產業觀察人士認為，答案是否定的。艾司摩爾之所以能成功研發出EUV曝光機，需要多家企業密切合作，這些企業來自德國、美國、日本等等，後者供應微影光罩的關鍵化學品。喬治城大學（Georgetown University）安全與新興科技中心（Center for Security and Emerging Technology）分析師杭特（Will Hunt）指出，中國大陸相對孤立，光靠自己的力量很難成功。「中國大陸沒辦法縮小技術差距，」他說。

其他觀察人士則表示，中國大陸有可能延後購買EUV曝光機。姆斯說，中國大陸晶片廠通常使用上世代設備，比起臺灣台積電、韓國三星與美國英特爾落後一步。幾年過後，等到艾司摩爾的第一代EUV曝光機不再先進，整體產業開始改採次世代機種，中國大陸才可能有機會採購第一代設備。

事實上，艾司摩爾已經在改良機台，新機種將採取高數值孔徑的技術，能以用更尖銳的角度聚焦EUV光，蝕刻出不到10奈米寬的元件。「高數



艾司摩爾的無塵室裡，EUV光源放置在測試區。

值孔徑」EUV曝光機的反射鏡更大，所以整台機具的體積也要更大。英特爾目前是次世代機型的第一家客戶，預計在2025年銷售使用這項技術生產的晶片。

艾司摩爾與多數觀察人士認為，EUV技術有助於推動晶片進展到至少2030年，甚至更久。畢竟，晶片設計廠之前想出一些技術延長深紫外光的應用，在EUV技術應該也能如法炮製。

然而，未來10年總有那麼一天，晶片產業會開始面臨比目前更難以突破的物理限制，無法再縮小元件，「量子問題」會首先浮現。其實現在當晶片廠使用艾司摩爾的EUV曝光機後，就面臨「隨機誤差」的問題，亦即EUV光自然會走偏，在晶片上形成錯誤圖案。目前問題雖然不大，但在晶片廠愈來愈走微型化路線的背景下，未來將成為隱憂。

假設「高數值孔徑」技術能讓摩爾定律持續到2030年，接下來哪種技術會成為主流呢？產業專家認為，艾司摩爾將繼續研發數值孔徑更高的設備，將EUV光聚焦在愈來愈小的點。同時，晶片設

計廠正在設法精進不需要進一步微型化的晶片，例如疊加晶片層，藉此向上延伸架構，達到晶片立體化。至於EUV會被哪一種微影技術所取代，沒有人知道。史瓦庫馬不願臆測；麥克則表明，除了高數值孔徑EUV技術之外，「沒有其他技術」正處於密集研發階段。

在威爾頓廠的無塵室裡，魏倫帶我一瞥高數值孔徑EUV曝光機的樣貌。他打開一個有如車庫門的大捲門，帶著我進到一間龐大的新無塵室，面積有一個足球場的大小。角落有一座發亮的鋁製光罩台，外觀就像先前那座EUV光罩機的光罩台，只是已經放不太進客廳大小的空間。它幾乎跟地鐵車廂一樣大，重量整整有17噸。他們在屋頂裝了起重機才有辦法安裝。

「這個機台……」魏倫說：「未來可以讓我們維持摩爾定律不墜。」■

---

湯普森是一名科技記者，居住於紐約市，著有《Coders: The Making of a New Tribe and the Remaking of the World》一書。

Copyright©2021, Technology Review. All Rights Reserved.