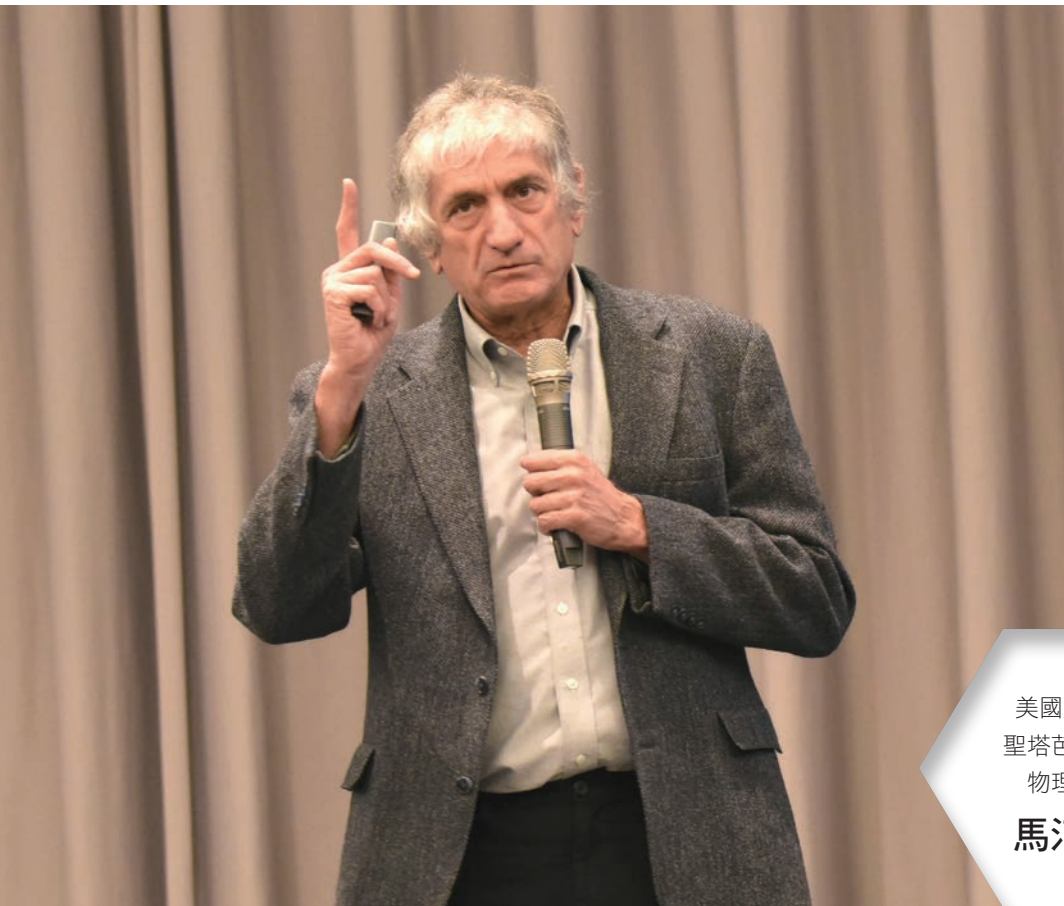




美國加州大學
聖塔芭芭拉分校
物理學教授
馬汀尼斯

借重半導體領域優勢

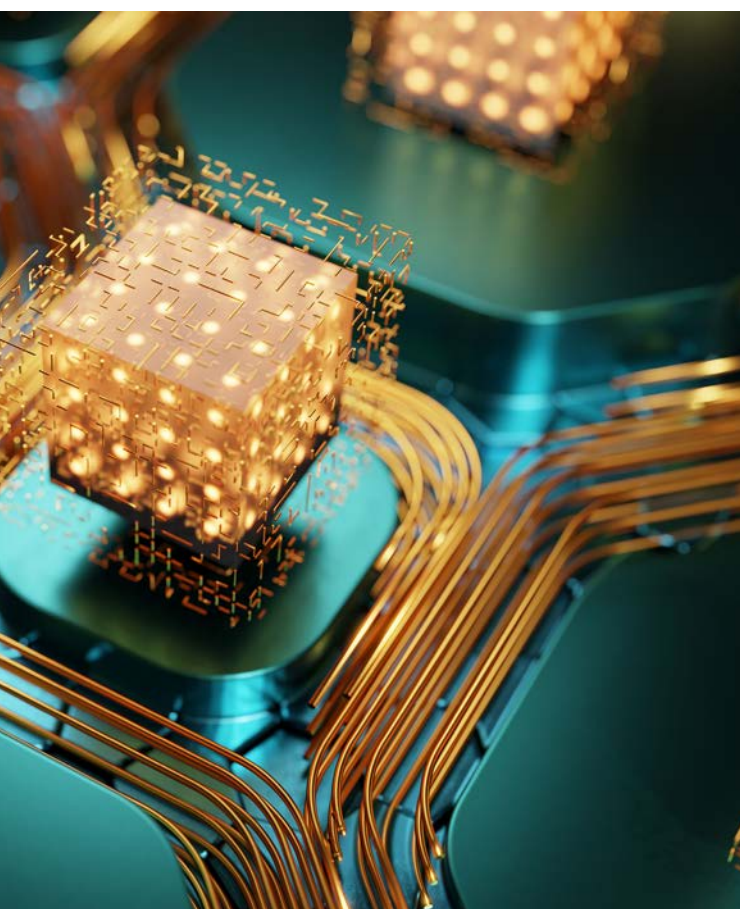
臺灣是打造量子電腦絕佳場域

為Google實現量子霸權的大師級人物、美國加州大學聖塔芭芭拉分校物理學教授馬汀尼斯（John Martinis）日前受邀在「國際超大型積體電路技術研討會」中擔任專題講者，分享量子運算的概念、潛力及未來應用。他認為，以臺灣在半導體領域優勢，透過製程的改善，突破量子位元的瓶頸，有機會打造具實用性的量子電腦。

口述／美國加州大學聖塔芭芭拉分校物理學教授馬汀尼斯 整理／林玉圓

非常高興來到臺灣，參加「國際超大型積體電路技術研討會」（VLSI）的盛會。超大型積體電路是很酷的技術，已經對世界帶來許多改變。多年以來，我和許多同儕一直想運用量子物理，來

進行更先進的運算，這個概念是1980年代Richard Feynman所發想，後人再持續發揚光大。我個人絕大部分職業生涯也投入了這個領域，有幸在美國加州大學聖塔芭芭拉分校進行研究，並於2014年加入



以半導體領域來看，量子運算可用來模擬矽原子的特性，找出奈米尺度下電晶體的運作方式，藉此解決半導體的材料及化學問題。

Google，打造一部具實用性的量子電腦。

量子運算 0與1同時存在

今天我們就來談談量子運算是什麼，它如何運作，其中的軟硬體組成，以及最重要的：為什麼我來到臺灣。大家在化學課或物理課都讀過氫原子，質子的正電拉住了帶負電的電子而形成氫原子；但在量子力學裡，電子不被吸引，而是以波形運動的狀態圍繞在原子核，這些波型的變化有許多組合，利用它的變化，就能進行運算，與目前主流的CMOS電子學的運算方式相同。

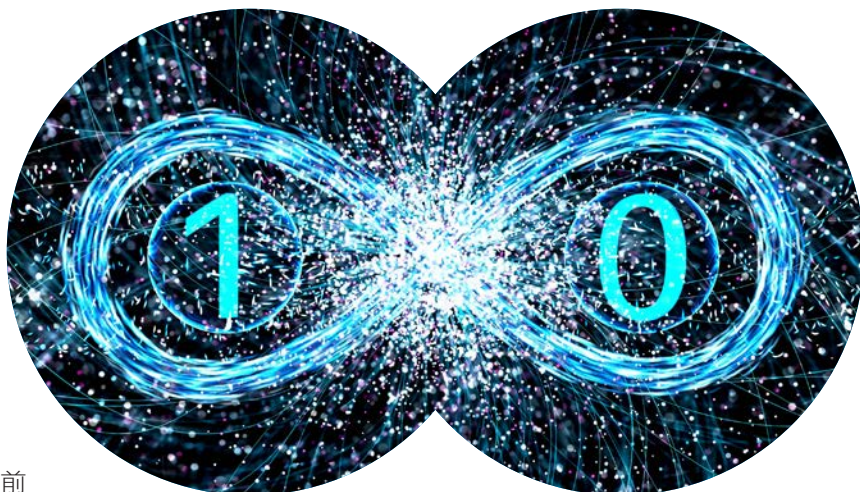
但量子運算和CMOS運算還是有相異之處，最基本的差異就是，傳統電腦僅有0與1的狀態，量子電腦除了0與1，還有第三種狀態：0與1同時存在，也就是量子力學提到的「量子疊加」。換言之，傳統邏輯運算是非0即1，但量子力學則可同時運算0與1。

量子位元倍增 算力指數型爆發

打個比方，把量子運算想成平行處理器，以多個量子位元（Qubits）進行同步運算，算力的提升十分驚人。比方說，量子位元的數量從1增至2，增加一倍聽起來不多，但實際上的平行運算效能是呈現指數型上升。兩個量子位元是4倍、3個量子位元是8倍，以此類推，當增加到50個量子位元時，就能挑戰當今最強超級電腦的算力，這也是我目前正在試驗的。如果再往上增加到300個量子位元，這部量子電腦可執行的運算次數，就會比目前宇宙所有的原子數量還多。如此等級的量子電腦，能做的事是傳統電腦所望塵莫及的。

訊息疊加易崩解 軟體演算法待改善

聽起來很美好，不過有但書。進行複雜的量子運算時，多重的平行運算，使得訊息在疊加時很容易崩解，只能透過非常特殊的演算法來解決，可



傳統邏輯運算是非0即1，但量子力學則可同時運算0與1。



量子電腦的發展充滿了各種不同的可能性，可從多元的角度來切入，且現階段的發展非常有趣也充滿活力。

惜目前已知的量子演算法的功能目前仍有限，無法達成量子加速。如果能解決這個問題，量子運算就能展現極佳潛力，比方說，最大的應用面會是在量子化學與量子材料領域；以半導體領域來說，量子運算可用來模擬矽原子的特性，找出奈米尺度下電晶體的運作方式，藉此解決半導體的材料及化學問題。

以上是從軟體的角度來看。不過我是物理學家，也是實驗主義者，想從硬體面來談談如何打造一部量子電腦。回到先前說的氫原子，有人會問，何不把一堆原子放在分子裡，操控它的運動就好了？量子理論發展的最初，確實有人試著這麼做，可惜問題出現了，原子實在太小，如果要置入控制訊號，即便微小如光波或磁場的訊號，原子彼此之間的距離還是太近，無法加以準確操控，也因此這個方法行不通。

打造量子電腦硬體 樂觀但深具挑戰

比較可行的是建立一個大型的人造量子運算

系統，已有很多專家投入研究，其中我認為比較好的方式是超導迴路（Superconductor），不過也有其他不同的嘗試，例如離子阱（Ion Trap）、集成電路（Component chip）、自旋量子位元（Spin system）等等。各方菁英都在努力開發，大型企業如Google、新創公司、國家實驗室；學校也扮演很重要的角色。換句話說，量子電腦的發展充滿了各種不同的可能性，可以從多元的角度來切入，我們可以說，現階段的發展非常有趣也充滿活力。

但它也是一個極為難解的課題，比大家想像得更難。人類究竟能不能打造出量子電腦？我們很樂觀；只不過，要找到其中所有的工程解方及科學密碼，是非常大的挑戰。例如量子位元增加時，會有龐大數量的不同組態，如何偵錯，以便確知整個系統是運作無誤？當位元數少的時候，只須一部筆電的算力就能偵錯，但位元數呈指數型增加，就須要資料中心等級的算力才能偵錯。

這也是我在Google做的計畫，我們已經有能

力透過演算法來模擬並算出資料量的正確與否，前提是量子閘的數量在幾百到數千個之間，這樣的數量已足以證明演算法運作無誤，但還不夠執行更有用的功能，也就是足以用來做學術研究，但若想要打造更複雜的系統，必須進一步改善。

與臺灣攜手 晶圓製程提升效能

這也是為什麼我離開Google後，成立了一間公司，並且與臺灣的研究機構合作，來改善量子運算的製程，從學術等級提升到工業等級，而臺灣就是做這件事的極佳場域。我們希望與臺灣合作，做出更好的量子電腦。舉例來說，製作這樣的設備時，不能使用非晶層絕緣體，否則會產生大量損耗。例如以氬焊機來清洗矽基板，會得到厚厚的非晶層，產生損耗（Dissipation）與阻尼（Damping），削弱量子位元的效能；比較好的作法是使用氫氟酸（HF）表面清洗，就可減少非晶層界面的生成，量子位元的運作就會很好。

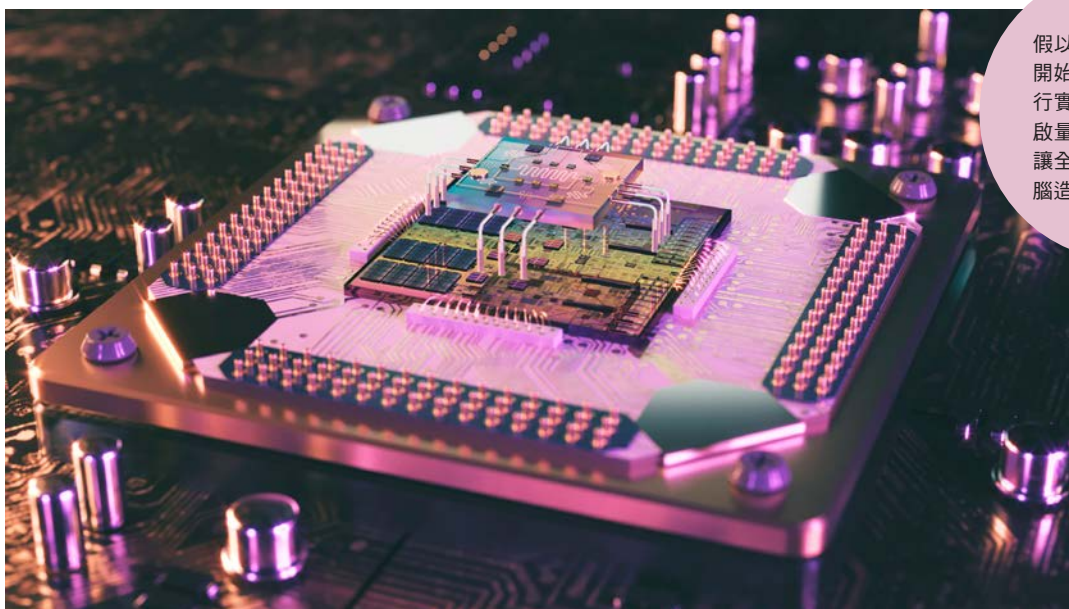
這正是我們與臺灣合作的方向，建立新的晶圓製程，將矽晶與鋁晶結合做為很好的介面，讓量子位元的效能更加發揮。這只是其中一個例子，還有很多其他面向要改善，運用極為複雜的

晶圓製程，將量子運算從學術研究階段，提升至專業製造的高良率製程。

量子運算學問深 培育人才最紮根

從培養理工人才的角度來看，量子運算也是一門很好的學科，因為要理解量子電腦，必須具備大量的科技知識，包括製程、物理、化學、材料科學、演算法、微波工程學等等，才能懂得量子位元運作的基礎，並打造出量子電腦。換言之，它須要培養多元化的技能，是很好的學習歷程，不論未來專業職涯朝什麼方向發展，都能受惠很大。

量子電腦已經證明有足夠的算力，至少從數學演算法的角度來看是可行的，量子運算及基本概念都沒問題，接下來要做的是，讓量子電腦能夠運行更好的演算法，有兩件事必須努力。一是硬體必須變得更好，二是演算法必須更簡單輕巧；這很類似1940至1960年代發生的運算產業革命，我們必須再複製一次。各界都在努力，大家也都很樂觀，假以時日，我們就能開始在量子電腦中進行實用的運算，並開啟量子產業的發展，讓全新等級的超級電腦來造福人類。■



假以時日，我們就能開始在量子電腦中進行實用的運算，並開啟量子產業的發展，讓全新等級的超級電腦造福人類。