

# 知識天地

## 金屬薄膜的量子局限效應

蘇維彬副研究員(物理研究所)

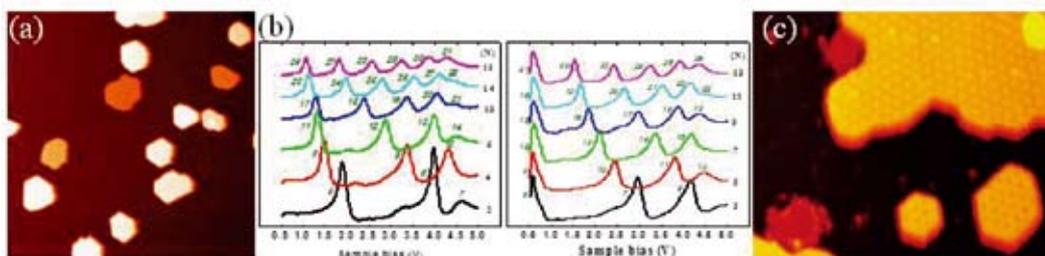
電子在一些金屬中像自由電子，當這些金屬的厚度可以薄到奈米尺度時，電子會因厚度的局限而顯現波動性質，進而在金屬中形成駐波與分離的量子態，此稱為量子局限效應。利用掃描穿隧顯微儀與能譜術，我們可以觀察到量子態並以量子力學中一維方形位能井模型來解釋。實驗上可以觀察到金屬薄膜的物理性質會影響量子態，而量子態的形成也會反過來影響金屬薄膜的成長行為，顯現兩者相互影響的現象。

量子力學是二十世紀物質科學中的重要基石。物理學理論如原子物理學、固態物理學、核物理學和粒子物理學都是以量子力學為基礎。薛丁格波動方程式是量子力學中的重要方程式，物理學家透過此方程式得以了解物質在微觀世界中的行為，例如薛丁格方程式可以精確描述氫原子光譜，使得電子在氫原子中的行為可以被清楚了解。薛丁格方程式中的位能形式會決定最後解出的波動函數與量子態。電子在氫原子中與原子核之間的位能是庫倫位能，但在一些金屬中，電子所處的位能則十分接近方形井，因此電子在氫原子與在這些金屬中的波動函數和量子態截然不同。由於金屬的尺寸遠大於電子的波長，因此電子在金屬中的波動函數是行進波而量子態是連續的。若將金屬製備成厚度只有奈米尺寸的薄膜，電子在厚度方向會顯現波動性質，於是會形成駐波與分離的量子態。藉由控制薄膜厚度以改變一維方形井的寬度，並利用掃描穿隧顯微儀與能譜術，可觀察到量子態以及其與金屬薄膜厚度的關連性。

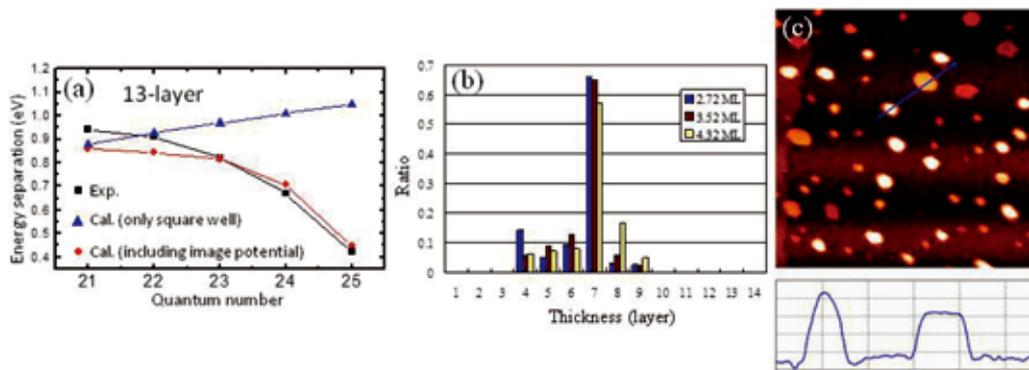
鉛是具有自由電子性質的金屬，電子在鉛中的位能接近方形井。若將鉛蒸鍍到矽或銅的表面，如圖一(a)所示，鉛可以形成表面平坦且邊緣陡峭的島嶼結構。因此藉由控制蒸鍍量可製備出等同於薄膜的不同厚度島嶼。圖一(b)是在不同厚度

的鉛島嶼所量測到的能譜。在每一條能譜右端的數字代表島嶼厚度(以多少原子層表示)，能譜則根據

原子層數分成偶數和奇數群。每一條能譜中都出現明顯的尖峰特徵，而且尖峰的數目會隨厚度的增加而增加，這代表尖峰特徵就是量子態。此外，大部分量子態的位置會隨厚度而改變，但在奇數群能譜中可觀察到一量子態其位置不隨位置而



圖一 (a)在低溫矽(111)7×7表面所成長的鉛島嶼結構。(b)在不同厚度鉛島嶼所量測的能譜。(c)在低溫矽(111)1×1表面所成長的鉛島嶼結構。島嶼表面具有週期性圖案。



圖二 (a)方形標示：實驗量測的相鄰量子態的間距。三角形標示：方形位能井模型預測的間距。圓形標示：在方形井模型中引入鏡像位能效應所得的計算結果。(b)不同厚度島嶼的比例。(c)原子團與島嶼共存的影像。

改變(虛線所示)。從鉛的能帶結構分析可得知此態的波向量是 $3\pi/2d$ ，其中 $d$ 是一個原子層的厚度。由於知道這態的波向量，就可進而知道所有態的量子數(標示在尖峰附近的數字)，於是態之間的間距就可用相位累積模型來分析。相位累積模型與薛丁格方程式都可用於分析量子態，但相位累積模型直接從波的相位入手，比解薛丁格方程式相對簡單。

這些量子態出現在鉛島嶼中，因此其行為會受到鉛的物理性質的影響。例如將鉛蒸鍍到矽(111) $1\times 1$ 表面，由於鉛和矽的晶格常數並不匹配，與矽接觸的鉛原子層會顯現規則起伏結構，造成所成長出的鉛島嶼表面也會有規則起伏，於是產生如圖一(c)所示的規則圖案。因為規則起伏來自最底部的鉛原子層，所以鉛島嶼中會存在週期性晶格扭曲。我們發現量子態的強度會隨幾何結構的高低起伏而變化，其原因在於晶格扭曲會改變帶正電的鉛離子核之間的相對位置，造成在起伏結構較高位置的鉛離子核彼此遠離，而在較低位置的鉛離子核則彼此靠近。為了維持電中性，較低位置的電子密度會比較高位置多，因此晶格扭曲會引發電子的屏蔽效應，使得量子態的強度隨晶格扭曲而改變。

此外，當電子在金屬外面時，電子與金屬表面會建立鏡像位能。我們發現在真空中的鏡像位能會影響鉛島嶼中的量子態。圖二(a)中的方形標示是量測圖一(b)中13-層能譜中相鄰量子態的間距的數據。可看出態間距會隨量子數的增加而減少，而且這現象普遍存在於其他厚度的能譜中。然而根據方形位能井模型，能量間距應隨量子數的增加而變寬，如圖二(a)中的三角形標示，因此與實驗量測數據相去甚遠。但這並非表示厚度方向的位能無法用方形井描述，而是必須考慮鏡像位能會對電子波提供額外的相位。此相位會隨能量的增加而增加，當能量等於真空能階時相位會變成無窮大。由於鏡像位能的相位貢獻，造成能量間距會逐漸遞減。我們利用相位累積模型將電子在方形井與鏡像位能的相位相加並重新計算態間距，所得的結果也顯示遞減趨勢並且與實驗數據十分接近，如圖二(a)的圓形標示，這表示鏡像位能確實會影響量子態。此外，從鏡像位能的相位方程式可得知，只有比費米能階以上1.2電子伏特高的量子態才會受到鏡像位能的影響，比此能量低的量子態只用方形井模型就可解釋。

我們需要製備平坦金屬薄膜以觀察量子態，但實驗也發現量子態的形成卻會反過來影響金屬薄膜的成長行為。圖一(a)是將鉛蒸鍍到低溫的矽(111) $7\times 7$ 表面所長出的島嶼結構。從圖的對比可知島嶼的厚度不同。為了分析島嶼的厚度分佈，我們對三種不同的蒸鍍量，分別量測數百個島嶼的厚度以得到如圖二(b)的厚度比例圖。從圖可得知島嶼的厚度分佈在4到9個原子層之間，其中以7層佔有最高的比例，而且比例分佈不隨蒸鍍量有明顯變化。在一般金屬薄膜的成長模式，即使以平坦島嶼方式成長，島嶼厚度總會從1個原子層逐漸往上增厚。但圖二(b)卻顯示1、2、3層厚的島嶼不會出現，所以這種厚度分佈與一般的成長行為截然不同。目前普遍認為這是一種由量子局限效應所引發的成長模式，並且有理論模型可以解釋，此模型稱為“電子式磊晶成長”。在這模型中主要考慮兩個因素。一是分離量子態的形成，也就是量子局限效應。另一是金屬與半導體之間的電荷轉移。這兩者在能量上是處於競爭的狀態，於是造成只有某些厚度的薄膜的能量最低，所以這些厚度的薄膜才能出現。因此電子集體的量子局限效應會影響金屬原子在成長過程中的運動與排列，進而產生有別於一般的成長模式。我們發現只有4到9個原子層厚度的鉛島嶼才能成長，因此可將此歸類於電子式磊晶成長模式。由於島嶼的厚度因量子局限效應而固定不變，所以當蒸鍍量增加時，只會增加島嶼的面積，島嶼因此呈現二維成長行為。所以量子局限效應不僅影響厚度，也會伴隨影響島嶼面積。此外，實驗上亦發現島嶼的平均面積幾乎不隨厚度而改變，這代表愈厚的島嶼可吸收愈多蒸鍍到表面的原子。

然而島嶼要如何成長才能有多原子層的厚度與平坦的表面?如果是一層一層往上長，無法解釋為何觀察不到1

至3層厚的島嶼。為了清楚了解島嶼的成長過程，我們降低溫度與蒸鍍量。在這實驗條件下，如圖二(c)所示，除了島嶼形成外，還有原子團的結構出現，因此島嶼是從原子團轉變而來。實驗上可以直接去觀察原子團的成長，的確發現原子團會轉變成島嶼。我們也發現較厚的島嶼是從較高的原子團轉變而來，而較低的原子團會轉變成較薄的島嶼，顯示不同厚度的島嶼有獨立的轉變路徑。從機率上分析，原子團轉變成7層厚島嶼的機率最高，所以7層厚島嶼佔有最高的比例。原子團轉變成1至3層厚島嶼的機率是零，因此解釋為何觀察不到這些厚度的島嶼。此外，原子團在未轉變成島嶼之前是以三維成長增加其高度與基底直徑。變成島嶼後，會以二維成長增加其面積。因此在島嶼成長過程中存在一種三維成長轉變二維成長的機制，使得島嶼具有多原子層的厚度與平坦的表面。

## 結語

量子力學中一維方形井模型所預測的量子態可以顯現在金屬薄膜中，因此金屬薄膜的物理性質可以透過觀察量子態而了解。我們利用掃描穿隧顯微儀與能譜術量測鉛島嶼中的量子態，得以知道成長在Si(111)1×1表面的鉛島嶼中具有結構的週期性扭曲並且因此引發電子的屏蔽效應，以及金屬外部存在鏡像位能和其作用的能量範圍。另一方面，鉛島嶼中量子態的形成所引發的量子局限效應也會反過來影響鉛的磊晶成長，使得鉛島嶼具有平坦表面、陡峭邊緣、適合的成長厚度等特徵，並且在成長過程中顯現三維轉二維的成長轉變與獨立的轉變路徑。

## 參考文獻

1. A. R. Smith, K.-J. Chao, Q. Niu, and C.-K. Shih, *Science* 273, 226 (1996).
2. W. B. Su, S. H. Chang, W. B. Jian, C. S. Chang, L. J. Chen, and T. T. Tsong, *Phys. Rev. Lett.* 86, 5116 (2001).
3. M. C. Yang, C. L. Lin, W. B. Su, S. P. Lin, S. M. Lu, H.Y. Lin, C. S. Chang, W. K. Hsu, and Tien T. Tsong, *Phys. Rev. Lett.* 102, 196102 (2009)