

角解析光電子能譜學

鄭澄懋

國家同步輻射研究中心 凝態物理小組

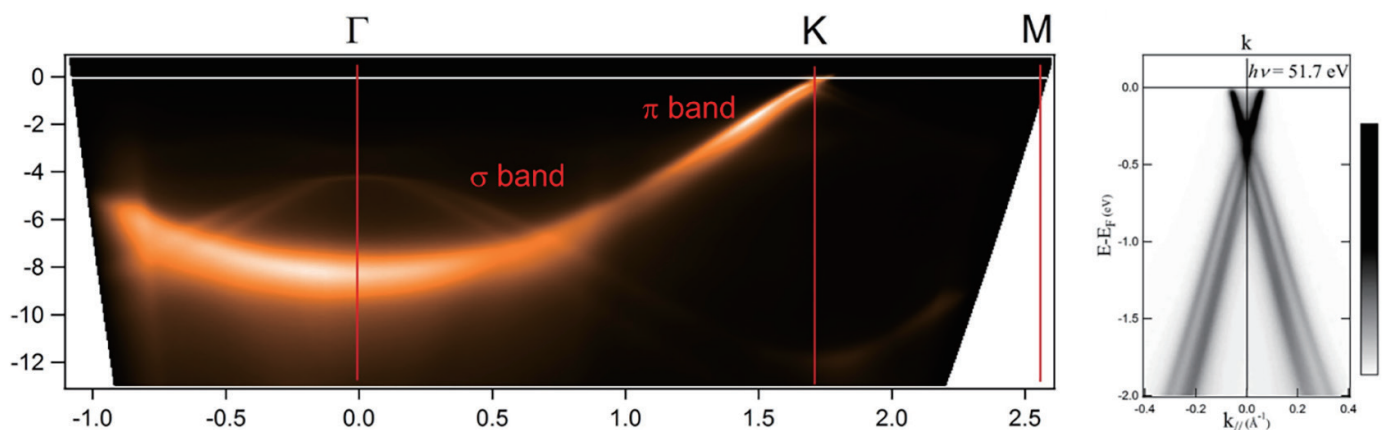
光電子能譜學的起源可以追溯到1887年由Heinrich Hertz所觀察到的光電現象—當光打到金屬表面會釋放出電子。而後1905年愛因斯坦提出光電效應的著名公式 $E_k = h\nu - E_b - \Phi$ ，其中 E_k 是光電子從樣品表面脫逃時具有的動能， $h\nu$ 是入射光能量， E_b 是電子在晶體內的束縛能， Φ 是樣品表面的功函數。光電效應公式一提出，大大的衝擊了之後科學的發展。其中包括貝爾實驗室發明的太陽能電池，利用太陽光打出電子，然後將電能儲存起來；以及X光光電子能譜技術—利用元素的化學位移(chemical shift)現象，鑑定材料的細微差異。化學位移是指元素在不同材料環境產生的不同束縛能，這個發現對於材料科學發展的影響，悠久而深遠，時至今日，科學家仍舊持續利用這項技術，探測各種材料的原子鍵結狀態，為開發新穎材料做出貢獻。角解析光電子能譜(Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, ARPES)就是在光電子能譜技術上增加不同角度的資訊。ARPES之所以能成為現今材料研究的重要方法，一個重要的原因是它可以直接探測材料的能帶結構(band structure)，此外，更重要的一點是透過對測量能譜的分析，科學家可以了解到晶體內的許多交互作用的關聯，這些以ARPES獲得的能量、動量與電子自旋的相關聯資訊，在新材料的開發上，扮演舉足輕重的角色。

實驗技術

費米能階(Fermi Level)，也稱為「電化學電位」。在能帶理論中，費米能階可視為熱力學平衡時，電子最後所佔據的能態，也是材料的價電子帶。特別是費米能階附近

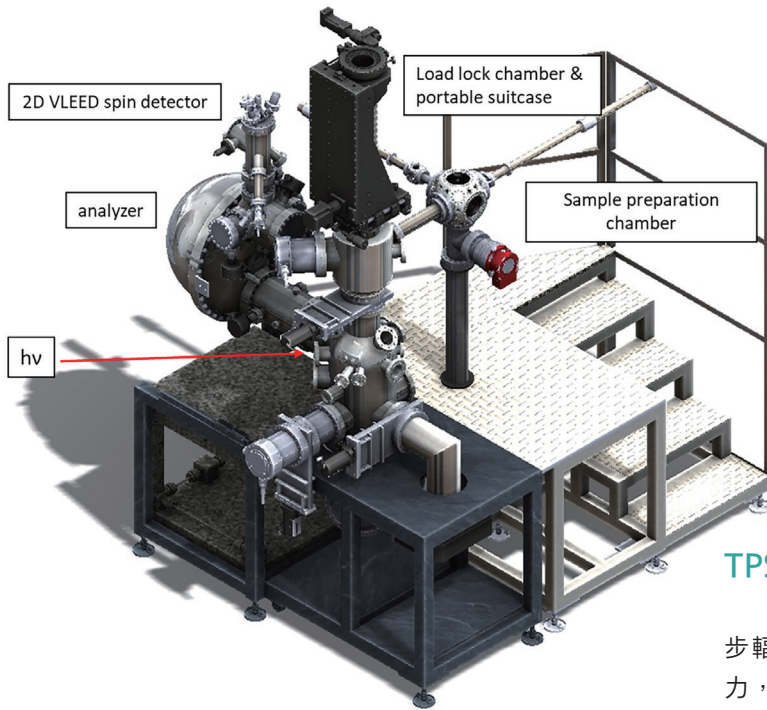
或是費米面的形狀，直接反映材料的電性行為。由於角解析光電子能譜可以直接探測材料本身的能帶結構，科學家用此分辨材料的金屬、半導體、或是超導體等行為特徵。為了得到比較高的動量解析度，大多使用能量介於10 - 100 eV 範圍的真空紫外光，同步輻射光源由於具備波長連續可調、高光通量與高能量解析度的特性，是進行ARPES的最佳選擇。一個相當容易了解，但卻又極度重要的材料，就是石墨烯的能帶結構。理論上預言單層石墨烯在二維的六角形布里淵區(Brillouin Zone)的六個轉角下，也就是K對稱點，其能量與動量的色散關係圖(E-k dispersion)，在費米能階附近，會呈現線性色散(linear dispersion)關係；而這個特別的能帶結構，正好可以利用ARPES直接觀察，就如圖一所示，我們可以直接探測石墨烯的能帶結構，在圖一的右側，我們對K點附近的能帶結構放大，可以清楚的看到線性的能量與動量的色散關係，這個例子顯現出ARPES在電子結構的探測上，可以快速又準確地給予科學家有用的資訊。

而過去二十幾年中，受益於探測器的進步，在新興量子材料的領域，角解析光電子能譜技術扮演著關鍵的角色。傳統上進行角解析光電子能譜實驗的光斑大小多在數十至一百微米，但是在新材料開發初期，樣品的均勻度多在微米以下，因此對於能提供奈米空間解析能力的Nano-ARPES的建置，益顯重要。



圖一 (左圖) 雙層石墨烯的電子結構。

(右圖) K點附近的放大圖，由於樣品銅是具有單層和雙層石墨烯的覆蓋層，可以很明顯同時觀測到單雙層共存的電子結構。



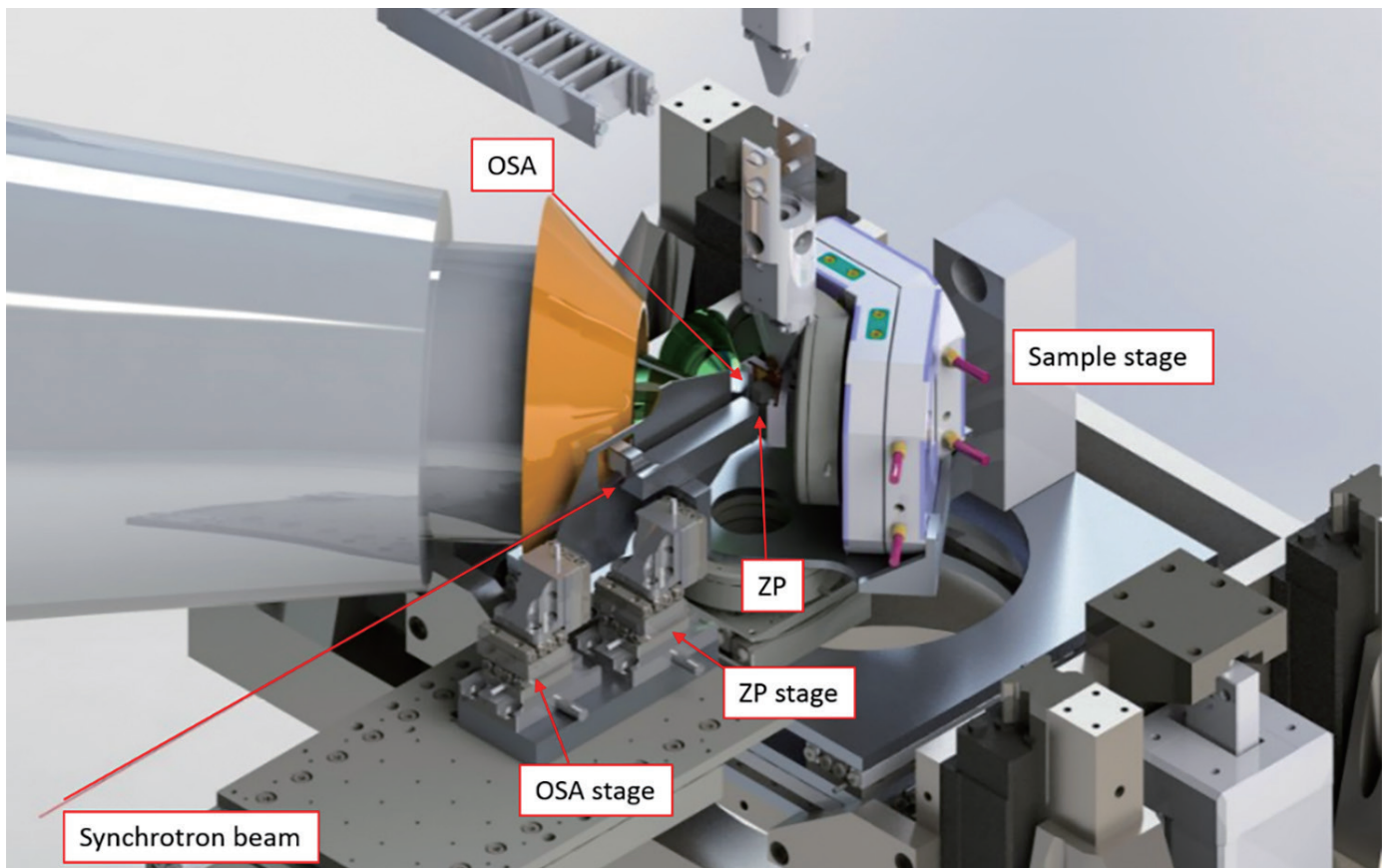
圖二 TPS 39A微米聚焦實驗站分支

TPS 39A奈米角解析光電子能譜光束線

此光束線的建構在於能夠提供微米到數百奈米級的同步輻射光斑以提高空間解析力，並同時兼顧高能量解析力，以滿足各種科學課題的需求。使用特殊插件磁鐵以提供20 eV到 650 eV的光，如表一所示，因此用戶可以同時進行ARPES與一般X光光電子能譜實驗。實驗站有兩個分支，一是微米聚焦實驗站，如圖二所示，可以提供10微米左右的光斑，並且具備自旋探測器，可以用來探測磁性材料；另外一個分支是奈米聚焦實驗站，如圖三所示，利用特別的聚焦方式(波帶片)將光斑聚焦至100奈米左右，以進行空間解析的光電子能譜實驗。用戶可以依據需求選擇適合的實驗站，對於材料的電子結構，包括能量、動量、自旋以及空間上的關聯資訊，進行深入的探討。

表一 TPS 39A基本參數

能量範圍	20 - 650 eV
光斑大小	微米聚焦實驗站：10 微米 奈米聚焦實驗站：100 奈米
能量解析力	100,000 ($E/\Delta E$)



圖三 奈米聚焦實驗站掃描機構，包括了波帶片(ZP)、繞射選擇光圈(OSA)和能量分析儀。