


## 第二章 電熱絲粒子偵測器

### 2-1 動機與原理

要進行鉈原子雷射冷卻實驗除了需要雷射光源進行冷卻外，還需有方法量測鉈原子速度或空間分佈才能確定冷卻效果的好壞。利用電熱絲粒子偵測器

(hot-wire ionization detector) 是其中的一種方法。其原理是利用電熱絲通電加熱後放出電子，這些放出的電子再去撞擊原子使原子的外層電子被撞出而形成離子，最後再量測離子產生之電流通過電阻的電壓值得到信號。如果可以將此偵測器與馬達結合使此偵測器可以具備空間掃描功能，則可以量測原子在不同空間點的數量多寡，進而確認雷射冷卻的效果。

離子流的電流值與電子能量、原子束密度與原子遊離特性有關，可以用下列式子表示：


$$i_+ = -n \cdot P_I \cdot i_- \quad (2-1 \text{ 式}), \quad \text{單位: } i_+, i_- \rightarrow \text{Ampere}, \quad n \rightarrow 1/\text{m}^3, \quad P_I \rightarrow \text{m}^3$$

$i_+$  為離子流電流值， $n$  為原子束密度， $P_I$  為離子化機率， $i_-$  為加熱絲射出的電子電流值。離子化機率  $P_I$  跟離子化截面 (ionization cross section) 與電熱絲的幾何性質有關。圖 2.1 與 圖 2.2 為鉈原子 (thallium) 與鋰原子 (lithium) 離子化截面積與撞擊電子之能量的關係圖 [14,15]，可以發現隨著電子能量增加離子化截面積會達到一個最大值，之後再增加電子能量則離子化截面積反而會變小。鉈原子的離子化截面最大值約為  $12 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ，位在 100 eV。鋰原子的離子化截面最大值約為  $5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ，位在 20eV 附近。

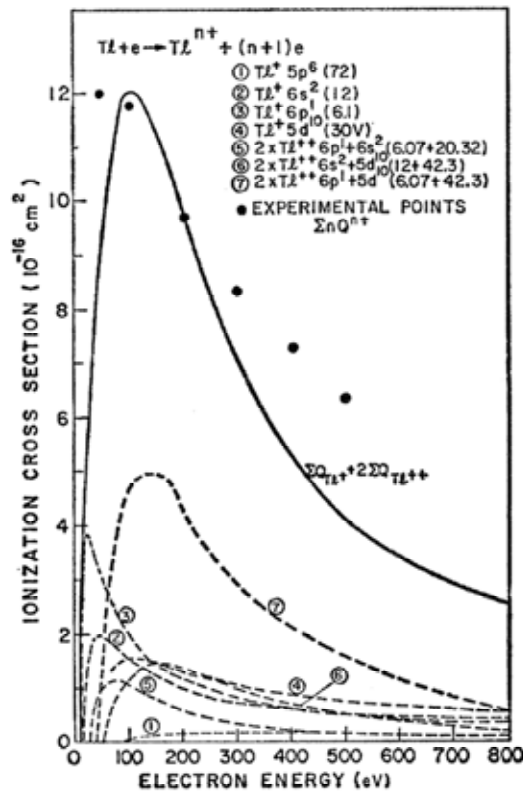


圖2.1 Total ionization cross section for thallium versus electron energy [11]

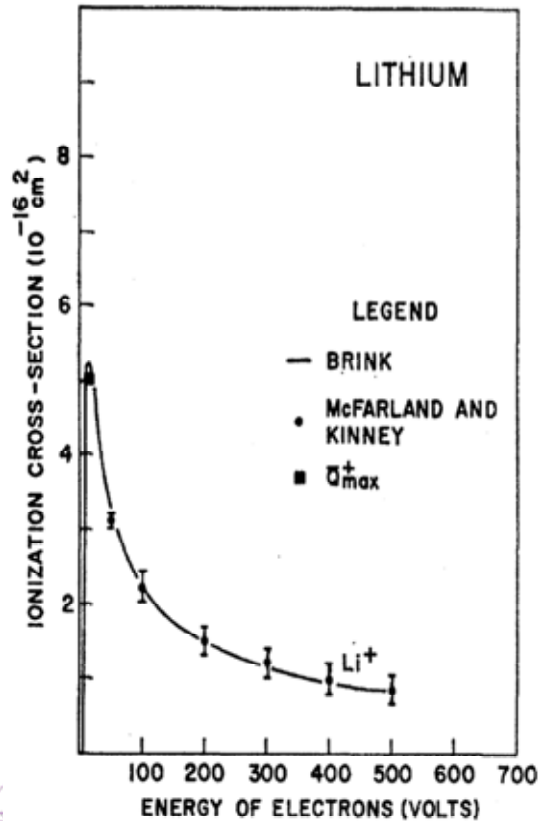


圖2.2 Ionization cross section of lithium versus electron energy [12]

在設計電熱絲粒子偵測器要考慮如何降低背景氣體造成的雜訊，通常注意到以下幾點：

- (a) 產生離子化的作用面積盡可能地小，並且作用區域能與原子束重合。
- (b) 盡量避免原子束與電熱絲碰撞，因為可能會產生背景氣體造成雜訊。
- (c) 保持離子化區域為高真空狀態，可避免某些特定材質的電子源因氧化損毀。

電熱絲粒子偵測器普遍有以下性質：

- (1) 原子游離化的效率與原子速度成反比，通常游離化效率在  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  之間。
- (2) 離子源的反應時間受限於離子化區域的長度與原子速度。
- (3) 偵測器的靈敏度受限於游離效率與背景氣體的干擾。

電熱絲放出電子的多寡與電熱絲材質特性、功函數與加熱溫度有關。對一乾淨的金屬而言，其單位面積所發射的最多電子數可以用 Richardson-Dushman 方程式表示：

$$j_{-} = A \cdot T^2 \cdot \exp[-\phi / (K_B \cdot T)] \quad (2-2 \text{ 式}) \quad , \text{單位：} j_{-} \rightarrow \text{A/m}^2$$

式子中的 A 是 Richardson constant（與金屬特性有關）， $\phi$  為金屬功函數，T 為溫度。由上式可以看出電子的發射量與溫度的關係密切。電熱絲的溫度選擇需考慮下列兩點：

- (a) 增加溫度可以增加電子的發射量。
- (b) 溫度太高會燒毀電熱絲。
- (c) 放出電子的密度過高會使已游離的原子因再次撞擊電子回復成中性原子。

通常作為電熱絲的材質有鎢（tungsten）、銦（rhenium）與參雜氧化鈦（thorium oxide）的銱（iridium），其中鎢是最為普遍的一種選擇，因為鎢便宜、蒸汽壓低與處理方便。鎢的功函數  $\phi = 4.25 \text{ eV}$ ，Richardson constant  $A = 8 \times 10^5 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ 。鎢在高真空的環境下可以運作良好，但是如果環境中有氧、水或碳氫化合物的話，容易與其發生化學反應揮發出氣體。

## 2-2 電熱絲粒子偵測器的構造

本實驗室製作的電熱絲粒子偵測器之構造如圖 2.3 所示，原子束方向與偵測器電極板垂直。

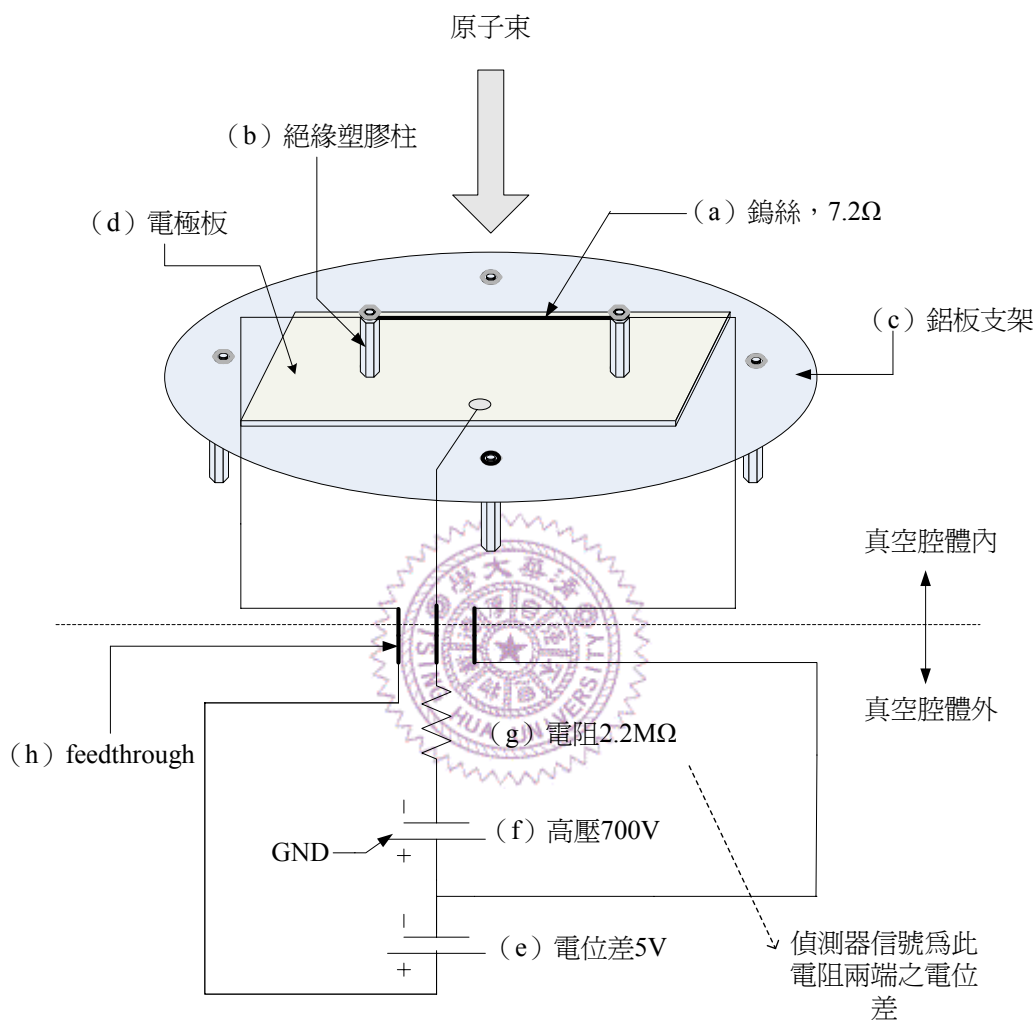


圖2.3 電熱絲粒子偵測器構造圖

- (a) 鎢絲：從 PHILIPS 40W 蠟燭燈泡裡取出取出約 4cm 的鎢絲作電熱絲用。
- (b) 絕緣塑膠柱：避免鎢絲與高壓電源短路。
- (c) 鋁板支架：架在 CF 轉 QF 的 Flange 上。
- (d) 電極板：上層為銅箔電極板以接收離子，下層絕緣避免與鋁板短路。
- (e) 電位差 5 V：提供鎢絲電流來加熱鎢絲以放出電子撞擊原子束。

- (f) 高壓 700 V：提供鎢絲與電極板間高電位差，用以吸引離子，排斥電子。
- (g) 電阻 2.2 M $\Omega$ ：離子撞擊電極板後產生之電流經此電阻轉成電壓信號。
- (h) Feedthrough：連接真空腔內外電路。

## 2-3 電熱絲粒子偵測器的測試結果

以鋰原子束測試之結果：

高壓：700 V

流過鎢絲電流：0.7 A

電極板與高壓電源間之電阻（圖 2.3 之 g）：1 M $\Omega$

溫度 (°C)	496	486	445	409	400	386	323
電壓 (V)	0.2	0.13	0.1	0.06	0.04	0.02	0.005
粒子數 (10 <sup>10</sup> 個/秒)	1250	812.5	625	375	250	125	31.25

表 2-1 偵測到之鋰原子流量與溫度關係

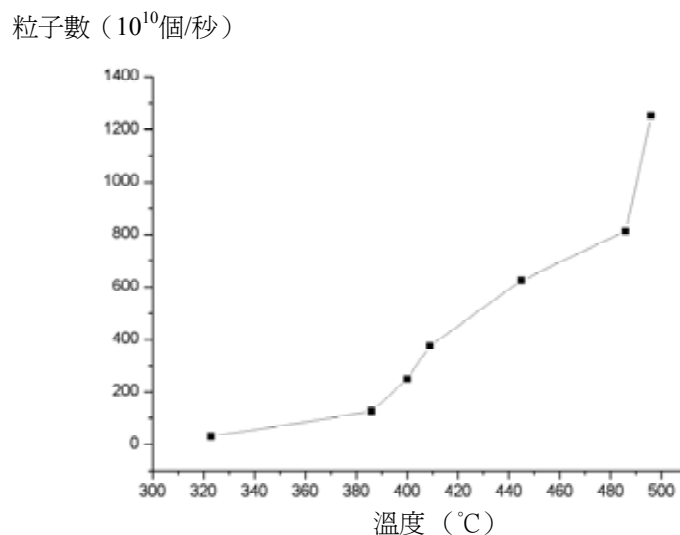


圖2.4 溫度對粒子數關係圖

每 0.001 V 的信號表示每秒有  $6.25 \times 10^{10}$  個鋰原子被電極板收集。

為確認電壓信號確實由鋰原子而來，實驗進行中曾短暫關閉原子束觀察是否還有信號。以鋰原子測試發現，一旦關閉鋰原子束則電壓信號立刻會大幅下降，因此可確定電壓信號確實由鋰原子而來。

以鉈原子束測試之結果：

鉈原子束在同樣的實驗架設下測試發現與鋰原子的表現有所差異，其信號對於鉈原子束的開關並沒有即時的反應。當鉈原子加熱爐加熱到有氣體鉈原子噴出後同樣可以量得信號，但是在關閉原子束的同時信號並不會立刻降低，會經過一段時間後才降下來（可長達 30 秒以上）。之後再打開鉈原子束後電壓信號並不會回到原先的電壓信號狀況，而是持續維持在信號降下後的低信號值。因為信號並不具即時性，因此未來還需進一步測試與改良才能確定偵測器可用來量測鉈原子束。

