

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

延遲效應對固體表面附近運動的相對論性帶電粒子能量損失影響

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-009-040-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學電子工程學系暨電子研究所

計畫主持人：桂正楣

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 94 年 8 月 18 日

延遲效應對固體表面附近運動的相對論性帶電粒子能量損失影響
Retardation effects in energy losses of relativistic charged particles near solid surfaces

計劃編號：NSC 93-2215-E-009-040

執行期間：93/08/01-94/07/31

主持人：桂正楣 交通大學電子工程學系教授

一、中文摘要（關鍵詞：延遲效應；激發電位；阻擋本領）

當一個帶電粒子，以平行於固體表面做運動時，會因為受到來自粒子與固體表面電子的交互作用產生之激發電位，而使其所帶能量造成損失。過往之研究結果適合應用在沒有電磁延遲效應的情況下，但是當帶電粒子以極高的速度平行經過表面時，其與固體表面電子的交互作用激發電位，將會受到電磁延遲效應的影響。所以本計畫目的在探討，當帶電粒子平行經過固體表面時，電磁延遲效應對電子阻擋本領、非彈性微分倒數平均自由行徑、以及非彈性平均自由行徑的影響。在本計畫中，利用介電理論，並遵守邊界條件及使用勞倫茲規範，去解馬克斯威爾方程式，從而推導了包含延遲之電子阻擋本領、非彈性微分倒數平均自由行徑、以及非彈性平均自由行徑的理論模式。除此之外，並比較不包含及包含延遲效應理論模式所計算之移動電子非彈性平均自由行徑的差異；也計算不同能量電子受到的阻擋本領，比較不包含及包含延遲效應理論模式計算結果的差異，並證明包含延遲效應理論模式在電子速度較小時，會回到不包含延遲效應理論模式所計算的結果。

英文摘要（關鍵詞：Retardation Effect, Induced Potential, Stopping Power）

When a charged particle moves parallel and close to a solid surface, it suffers an energy loss arising from the induced potential caused by the interaction between the charged particle and surface electrons. Many previous studies are concerned only the non-retarded limit. However, when the charged particle moves very fast, the induced

potential could be affected by the electromagnetic retardation effect. Thus, the present proposal was to study the influence of the retardation effect on the stopping power, the differential inverse inelastic mean free path (DIIMFP) and the inelastic mean free path (IMFP) for an electron with very high speed moving parallel to the solid surface. Appropriate boundary conditions and the Lorentz gauge were employed to solve Maxwell equations using the dielectric response theory. Analytical formulas of the stopping power, the DIIMFPs and the IMFPs with retardation effect were derived. The calculated results of the stopping powers, the DIIMFPs and the IMFPs without and with retardation effect were compared. Besides, it was approved that the inelastic-scattering model with retardation effect can reduce to the inelastic-scattering model without retardation effect for electrons of low and intermediate speeds.

二、計劃緣由與目的

帶電粒子和固體之間的非彈性交互作用，對於固體的分析是非常重要的。在一些實驗當中 [1-4]，已針對極高速運動的電子，和固體之間的非彈性交互作用做出研究，在電子極高速的情況之下，電子和固體之間非彈性的交互作用，會顯現出電磁延遲效應。已經有理論模式透過介電理論 [5-8]，在遵守邊界條件之下，去解柏松方程式，而推導出用來計算，針對一個移動的帶電粒子，平行於一個半無限大固體表面做運動的時候，所引起激發電位的計算式 [8-11]。但這些理論模式，卻沒有包含，電子在極高速運動的時候，和固體之間產生非彈性交互作用，所顯現的電磁延遲效應。所以，我們在本計畫中的目的就是，去修正之前的理論模式 [5]，把理論模式延伸到相對論模式，可以

去處理極高速的電子，平行於固體表面移動時的非彈性交互作用，並且包含電磁延遲效應。

三、研究方法及成果

我們從介電理論出發，在遵守邊界條件之下，去解馬克斯威爾方程式，並且配合勞倫茲規範的使用 [12]，而得到在真空之中的激發向量電位及激發純量電位，再利用這些激發向量電位及激發純量電位，去求出激發電場，之後再配合阻擋本領和激發電場之間的關係式[13-15]，從而可以得到極高速電子受到的阻擋本領，然後再利用阻擋本領和非彈性微分倒數平均自由行徑的關係式 [16]，即可得到包含延遲效應的非彈性微分倒數平均自由行徑，進一步就可以再得出包含延遲效應的非彈性平均自由行徑。

在圖(一)中，我們比較了，針對電子帶有 1000eV 的能量，在距離銅固體表面 1 Å 的距離做平行運動時，用不包含及包含延遲效應理論模式所分別計算出的非彈性微分倒數平均自由行徑。在這張圖中可以看到，不包含及包含延遲效應理論模式的非彈性微分倒數平均自由行徑，兩者之間完全沒有差異，所以，當電子的能量不是極大，或者速度不是極高時，相對論模式可以回到非相對論模式。圖(二)則是比較了，針對電子帶有 10⁶eV 的能量，在距離銅固體表面 1 Å 的距離做平行運動時，用不包含及包含延遲效應理論模式所分別計算出的非彈性微分倒數平均自由行徑。這一張圖中顯示了，不包含及包含延遲效應理論模式之間的差異就明顯了，這個差異，就是電磁延遲效應所造成的。

圖(三)則是畫了，當電子距離銅固體表面 1 Å，以不同的能量平行於固體表面運動時，用不包含及包含延遲效應理論模式所分別計算出之非彈性平均自由行徑的比較圖。當電子的能量在 10⁵eV 以下時，兩條曲線是重合在一起的，代表包含延遲效應之理論模式，在較小的電子能量之下，可以回到不包含延遲效應理論模式；當電子能量超過 10⁵eV 時，由於電磁延遲效應的原因，而造成這兩條曲線有所差異。另外在圖中可以觀察到，當電子的能量大於

10⁶eV 時，非彈性平均自由行徑進入飽合狀態，這是因為，電子的能量大於 10⁶eV 時，電子的速度已經逼近於光速，但電子的速度不可能超越光速，也就是說，電子的能量雖然增加，其速度卻增加得很緩慢，所顯現出來的非彈性平均自由行徑，就變化得很緩慢，所以非彈性平均自由行徑即進入了飽合狀態。

圖(四)則是畫了，當電子距離銅固體表面 1 Å，以不同的能量平行於固體表面運動時，用不包含及包含延遲效應理論模式所分別計算出來的阻擋本領之比較圖。由於包含延遲效應理論模式在較小的電子能量之下，可以回到不包含延遲效應之理論模式，所以當電子的能量在 10⁵eV 以下時，不包含及包含延遲效應理論模式所計算出來的電子阻擋本領，兩者會重合在一起；當電子能量超過 10⁵eV 時，因為電磁延遲效應的影響，導致不包含及包含延遲效應理論模式所計算出的電子阻擋本領有所差異。另外，當電子的能量大於 10⁶eV 時，電子的速度已經逼近於光速，而電子的速度不可能超越光速，造成電子的能量雖然增加，其速度卻增加得很緩慢，所顯現出來的阻擋本領，就變化得很緩慢，換句話說，阻擋本領也進入飽合狀態。

四、結果與討論

我們透過介電理論，並配合邊界條件及勞倫茲規範的使用，去解馬克斯威爾方程式，從而推導出了，電子平行於固體運動的含延遲效應之非彈性交互作用模式，包括電子的阻擋本領、非彈性微分倒數平均自由行徑、以及非彈性平均自由行徑的計算式。此包含延遲效應的理論模式可以處理極高速電子運動時，所顯現出的電磁延遲效應；而對於非極高速運動的電子，包含延遲效應理論模式所計算的結果，可以回到不包含延遲效應理論模式所計算的結果。我們的理論推導，修正不包含延遲效應之非彈性交互作用理論模式，成功延伸到包含延遲效應之非彈性交互作用理論模式，以包含電子在極高速運動時，所顯現出來的電磁延遲效應。

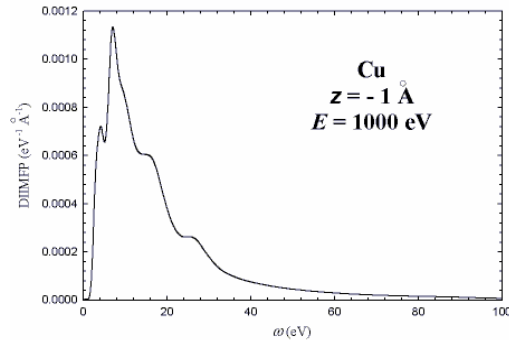
五、參考文獻

- [1] Marks L D 1982 *Solid State Commun.* **43** 727.
- [2] Cowley J M 1982 *Phys. Rev. B* **25** 1401.
- [3] Cowley J M 1982 *Surf. Sci.* **114** 587.
- [4] Moreau P, Brun N, Walsh C A, Colliex C and Howie A 1997 *Phys. Rev. B* **56** 6774.
- [5] Kwei C M, Hwang S J and Li Y C 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9130.
- [6] Chen Y F and Kwei C M 1996 *Surf. Sci.* **364** 131.
- [7] Kwei C M, Wang C Y and Tung C J 1998 *Surf. Interf. Anal.* **26** 682.
- [8] Kwei C M, Chiou S Y and Li Y C 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 8247.
- [9] García de Abajo F J and Echenique P M 1992 *Phys. Rev. B* **46** 2663.
- [10] García de Abajo F J and Echenique P M 1993 *Phys. Rev. B* **48** 13399.
- [11] Arista N R 1994 *Phys. Rev. A* **49** 1885.
- [12] Jackson J D 1975 *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. New York: Wiley.
- [13] Ritchie R H 1957 *Phys. Rev.* **106** 874.
- [14] Abril I, García-Molina R, Denton C D, Pérez-Pérez F J and Arista N R 1998 *Phys. Rev. A* **58** 357.
- [15] García-Molina R, Gras-Martí A, Howie A and Ritchie R H 1985 *J. Phys. C* **18** 5335.
- [16] Chen Y F and Kwei C M 1996 *Surf. Sci.* **364** 131.

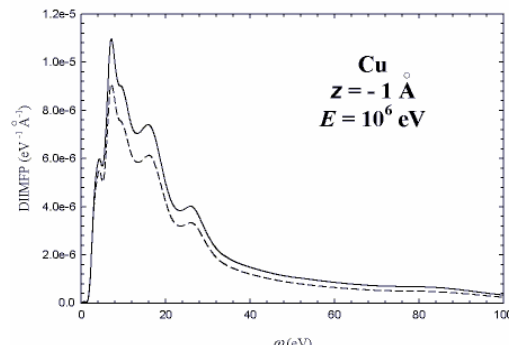
六、相關論文

1. 黎裕群，準彈性反射電子模擬與分析，國立交通大學電子工程學系電子研究所博士論文(九十四年六月)

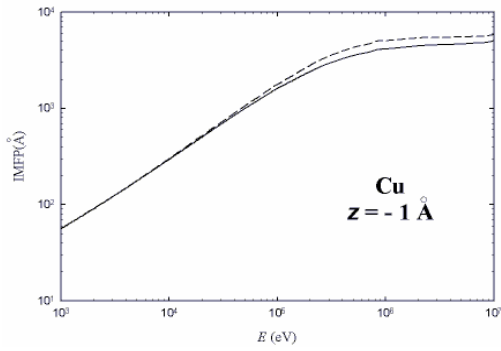
七、圖表



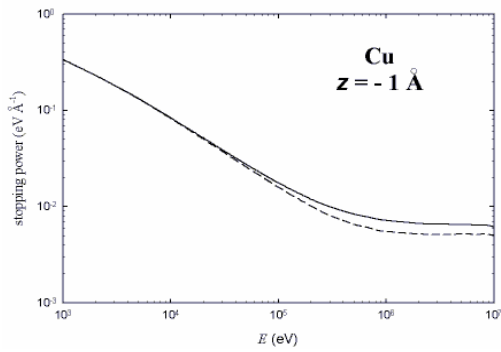
圖(一) 針對帶有 1000eV 能量的電子距離銅固體表面 1 Å 平行移動，比較不包含延遲效應理論模式(實線)及包含延遲效應理論模式(虛線)所計算出來的電子之非彈性微分倒數平均自由行徑。



圖(二) 針對帶有 10^6 eV 能量的電子距離銅固體表面 1 Å 平行移動，比較不包含延遲效應理論模式(實線)及包含延遲效應理論模式(虛線)所計算出來的電子之非彈性微分倒數平均自由行徑。



圖(三) 針對不同能量的電子距離銅固體表面 1 \AA 平行移動，比較不包含延遲效應理論模式(實線)及包含延遲效應理論模式(虛線)所計算出來的電子之非彈性平均自由行徑。



圖(四) 針對不同能量的電子距離銅固體表面 1 \AA 平行移動，比較不包含延遲效應理論模式(實線)及包含延遲效應理論模式(虛線)所計算出來的電子之阻擋本領。