

帶電粒子平行於雙層系統運動之激發電位及阻擋本領

Wake potential and stopping power for charged particles moving parallel to an overlayer system

計劃編號：NCS 90-2218-E-009-042

執行期間：90/08/01-91/07/31

主持人：桂正楣 交通大學電子工程系教授

一、中文摘要（關鍵詞：激發電位，阻擋力，雙層系統）

本計劃探討帶電粒子平行於雙層系統運動之能量損失。

我們針對銅薄膜和半無窮大矽基質所構成之雙層系統加以研究。依據介電理論，配合邊界條件解帕松方程式，我們推導出感應電位公式。利用能量、動量守恆關係，及含非定域色散效應之延伸型德魯特介電函數，我們建立了阻擋力之公式。表面(真空及薄膜間)及介面(薄膜及基質間)之激發均包含入帶電粒子及雙層系統之交互作用模式內。我們計算了質子平行於此雙層系統運動之激發電位，並且研究了感應電位及阻擋力與薄膜厚度、質子距表面之距離、質子速度之相關性。

英文摘要：(keyword : wake potential, stopping force, overlayer system)

An energetic charged particle moving parallel to a solid surface experiences a wake potential arising from the interaction of this particle with surface electrons. The gradient of the wake potential will act back on the charged particle and cause it to lose energy. A number of theoretical works has been reported.¹⁻⁴ However, such works are restricted to semi-infinite solids.

The present proposal intends to extend theoretical studies to overlayer systems composed of thin films and semi-infinite substrates. Based on the dielectric theory⁵⁻¹¹, a formulation of surface (vacuum-film contact) excitations and interface (film- substrate contact) excitations will be developed by solving the Poisson equation and taking into account the boundary conditions.

Expressions for the excitation potential and the stopping power will be set up with the consideration of energy-momentum conservation laws. Full details of the wake potential as a function of space and time will be studied. The evaluation of stopping powers for charged particles with various energies will be performed. Non-local dispersion effects will be included. The dependence of stopping power on the film thickness, the distance of the particle from surface, and the velocity of the particle will be investigated.

二、計劃緣由與目的

有關快速帶電粒子及固體表面交互作用的現象非常重要。目前帶電粒子平行於固體表面運動之感應電位理論模式¹⁻⁵採用不同之近似介電函數⁶⁻⁸，但僅適用於半無限大固體之結構。對於雙層系統，感應電位模式的建立非常重要⁹⁻¹²，目前存在之理論模式¹³⁻²¹僅適用於穿越之電荷，因此本研究針對平行雙層系統運動電荷，利用延伸型德魯特介電函數¹⁵建立含表面及介面激發，且滿足能量、動量守恆之交互作用模式。

三、研究方法及成果

我們依據介電理論，並利用正確的邊界條件及像電荷法解帕松方程式，推出適用於電子平行於雙層系統運動之表面及介面激發交互作用公式。推導中採用了忽略垂直方向動量之介電函數^{20,22,23}，且模式中動量轉移之積分採用球座標，令其完全滿足動量、能量守恆定律，量子理論因此融入^{24,25}其中。而

介電函數採用了含離子極化效應²⁶之延伸型德魯特介電函數。

圖(一)及圖(二)分別顯示在光學極限下之表面(真空-銅)反應函數及介面(銅-矽)反應函數。可看出延伸型德魯特介電函數和實驗光學數據非常接近。圖(三)為質子平行於銅-矽雙層系統運動時，在質子位置之感應電位和質子速度之關係。感應電位絕對值之大小隨速度之增加而減小，最後趨於一定值。在速度略小於 1 a.u.處有一凹處，其深度隨質子距表面距離減小而增大。根據我們的計算，我們也發現此感應電位隨薄膜厚度之變化並不十分明顯。圖(四)為沿著質子運動軌跡，在銅表面投影各點之感應電位和質子位置投影之相對位置之關係。由圖可見，在質子後面各點之感應電荷有振盪之現象。由於介面效應，對不同厚度之銅膜，其振幅亦有所改變。圖(五)則表示沿著質子運動軌跡各點之感應電位及電場分量與質子相對位置之關係。同樣地，我們可見到振盪之現象。阻擋力和質子速度之關係則表示於圖(六)，我們發現阻擋力約在速度為 1.1 至 1.7 a.u.處有一極大值，同時在靜態極限時降為零，而且阻擋力隨質子離表面距離增加而減小。另外根據我們的計算，對不同厚度之銅膜阻擋力僅隨厚度漸漸變化。

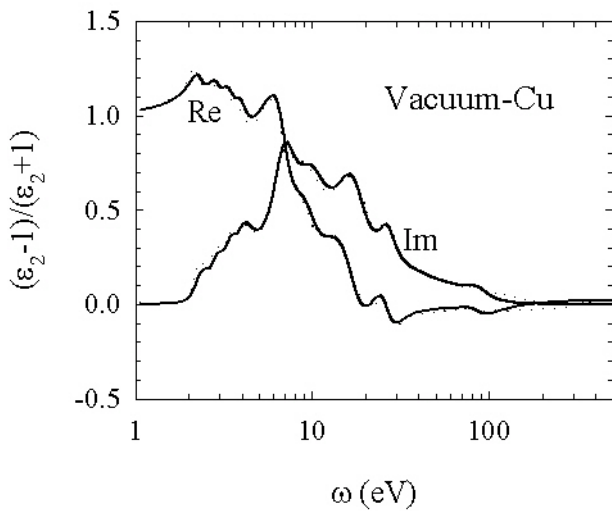
四、結果與討論

介電理論可用來描述平行運動帶電粒子和雙層系統之非彈性交互作用。我們的理論模式以薄膜及基質的介電函數來表示表面及介面之激發現象。應用能量、動量守恆定律，我們成功地將量子效應融入介電理論。我們所建立的阻擋力及感應電位公式可應用在任意電荷及雙層系統組合上。

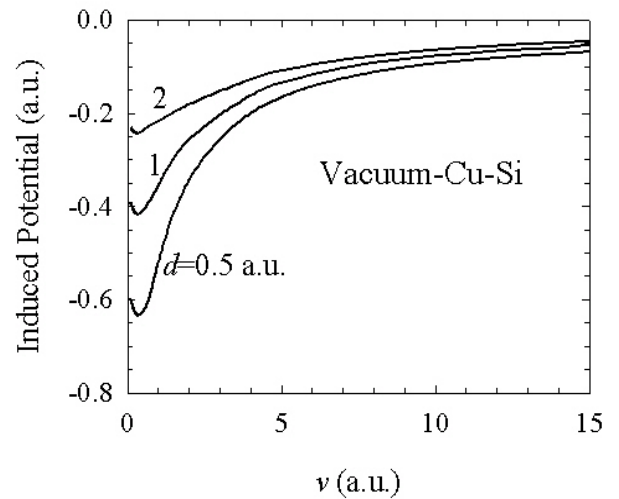
五、參考文獻

- [1] F. J. García de Abajo and P. M. Echenique, Phys. Rev. B **46**, 2663 (1992).
- [2] F. J. García de Abajo and P. M. Echenique, Phys. Rev. B **48**, 13399 (1993).
- [3] N. R. Arista, Phys. Rev. A **49**, 1885 (1994).
- [4] R. H. Ritchie, Phys. Rev. **106**, 874 (1957).
- [5] R. H. Ritchie and A. L. Marusak, Surf. Sci. **4**, 234 (1966).
- [6] F. Bloch, Z. Phys. **81**, 363 (1993).
- [7] B. I. Lundqvist, Phys. Status Solidi **32**, 273 (1969).
- [8] J. Lindhard, Dan. Mat. Fys. Medd. **28**, 1 (1954).
- [9] J. Burgdörfer, Nucl. Instrum. Methods B **67**, 1 (1992).
- [10] P. Focke, S. Suárez, R. Pregliasco and W. Meckbach, Nucl. Instrum. Methods B **67**, 1 (1992).
- [11] T. Iitaka, Y. H. Ohtsuki, A. Koyama and H. Ishikawa, Phys. Rev. Lett. **65**, 3160 (1990).
- [12] K. Kimura, M. Tsuji and M. Mannami, Phys. Rev. A **46**, 2618 (1992).
- [13] P. E. Batson, Ultramicroscopy **11**, 299 (1983).
- [14] A. Howie and R. H. Milne, Ultramicroscopy **18**, 427 (1985).
- [15] C. M. Kwei, Y. F. Chen, C. J. Tung and J. P. Wang, Surf. Sci. **293**, 202 (1993).
- [16] C. J. Tung, Y. F. Chen, C. M. Kwei and T. L. Chou, Phys. Rev. B **49**, 16684 (1994).
- [17] Y. F. Chen, P. Su, C. M. Kwei and C. J. Tung, Phys. Rev. B **50**, 17547 (1994).
- [18] Y. F. Chen, C. M. Kwei and P. Su, J. Phys. D: Appl. Phys. **28**, 2163 (1995).
- [19] C. M. Kwei, P. Su, Y. F. Chen and C. J. Tung, J. Phys. D: Appl. Phys. **30**, 13 (1997).
- [20] C. M. Kwei, S. Y. Chiou and Y. C. Li, J. Appl. Phys. **85**, 8247 (1999).
- [21] C. M. Kwei, S. S. Tsai and C. J. Tung, Surf. Sci. **473**, 50 (2001).
- [22] F. Yubero and S. Tougaard, Phys. Rev. B **46**, 2486 (1992).
- [23] F. Yubero, J. M. Sanz, B. Ramskov and S. Tougaard, Phys. Rev. B **53**, 9719 (1996).
- [24] R. H. Ritchie *et al.*, in *Physical and Chemical Mechanisms in Molecular Radiation Biology*, edited by W. A. Glass and N. V. Varma (Plenum Press, New York, New York, 1991), p. 99.
- [25] F. Flores, in *Interaction of Charged Particles with Solids and Surfaces*, edited by A. Gras-Marti, H. M. Urbassek, N. R. Arista and F. Flores (Plenum Press, New York, 1991), p. 3.
- [26] D. Y. Smith and E. Shiles, Phys. Rev. B **17**, 4689 (1978).
- [27] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids I* (Academic Press, New York, 1985).

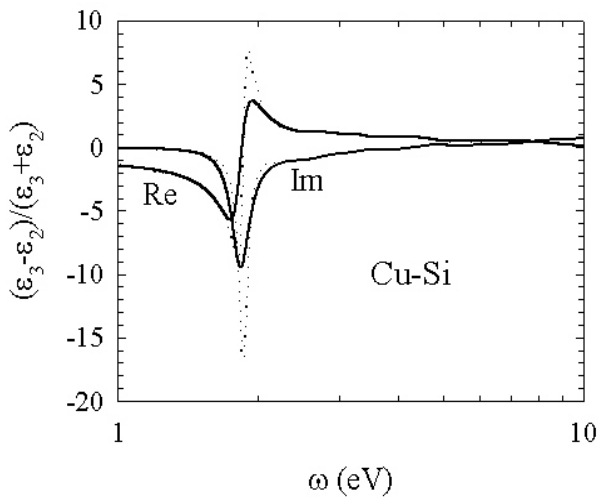
六、圖表



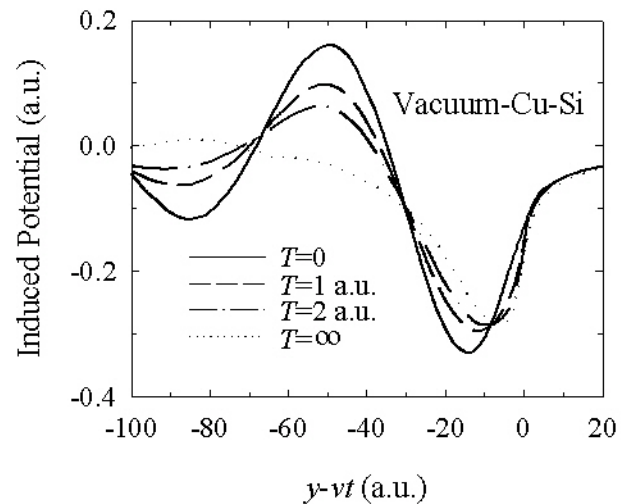
圖(一) 光學極限下，表面(真空-銅)反應函數之實部及虛部與能量轉移之關係圖。實線為本計劃採用之延伸型德魯特介電函數所計算之結果，虛線則為實驗所得之光學數據²⁷。



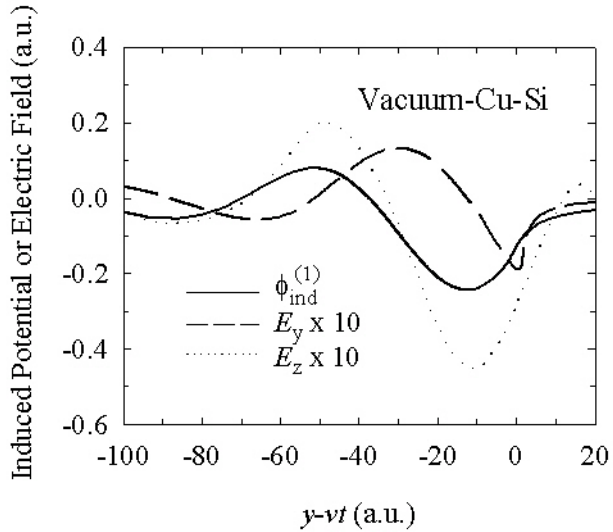
圖(三) 質子在真空中平行於銅-矽雙層系統(銅膜厚度為 2 a.u.)運動時，在質子所在位置感應電位和質子速度之關係圖。質子距銅表面分別為 0.5, 1 及 2 a.u.。



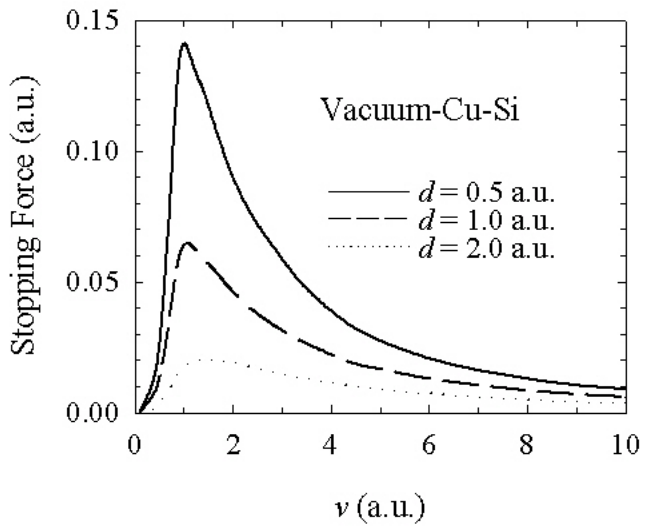
圖(二) 光學極限下，介面(銅-矽)反應函數之實部及虛部與能量轉移之關係圖。實線為本計劃採用之延伸型德魯特介電函數所計算之結果，虛線則為實驗所得之光學數據²⁷。



圖(四) 質子運動軌跡在表面的各投影點之感應電位和質子位置在表面投影點相對位置之關係圖。質子以 5 a.u. 速度在真空中平行於不同厚度銅薄膜之銅-矽雙層系統運動，與銅表面距離為 1 a.u.。



圖(五) 質子在運動軌跡上的感應電位及電場分量分布與質子相對位置之關係。質子以速度 5 a.u. 在真空中平行於銅-矽雙層系統運動，銅膜厚度為 1 a.u.，質子與銅表面相距 1 a.u.。



圖(六) 質子在真空中之不同位置平行於銅-矽雙層系統運動時，阻擋力與質子速度之關係。雙層系統之銅膜厚度為 0.5 a.u.。