

執行單位：

中 華 民 國 91 年 4 月 24 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式說明

Preparation of NSC Project Reports

計畫編號：NSC 89-2112-M-009-033

執行期限：1999年8月1日至2001年10月31日

主持人：林志忠

執行機構及單位名稱：交大物理所

一、中文摘要

本計畫研究了介觀及無序系統中的量子傳輸現象和低溫電子相位相干時間，包含(1)溫度趨近於絕對零度時之介觀樣品中的電子相位相干時間，(2)無序金屬中的電子-聲子散射時間之對溫度和電子彈性平均自由徑的函數關係，以及(3)靠近安德生金屬-絕緣體轉變時之電子-電子散射時間之對溫度和電子彈性平均自由徑的函數關係。我們的實驗結果，促進了固態物理學家對電子相位破壞機制之微觀上的瞭解。

關鍵詞：電子相位相干時間、介觀系統、無序金屬、弱局域效應、巨大霍耳效應

Abstract

We have investigated the low temperature electron dephasing times in disordered metals. First, we have studied the behavior of the saturation of electron dephasing near zero temperatures. Secondly, we have investigated both the temperature electron elastic mean free path dependences of the electron-phonon scattering times. Thirdly, we have studied the "critical" electron-electron dephasing times near the mobility edge. Our results are helpful in shedding light on clarifying the origins and the microscopic mechanisms of electron dephasing processes.

Keywords: electron dephasing times, mesoscopic systems, disordered metals, weak localization.

二、緣由與目的

1. 介觀系統中飽和電子相位相干時間之量測：

自從1980年代初年起，低維度電子氣研究領域在物理上和應用技術上都益形重要。由於量子干涉效應的發現，固態物理學家們逐漸釐清，並建立起了電子波函數之相位相干的概念，並確立了實際固體中電子相位相干長度之尺寸，再配合以毫微(奈)米製作和蝕刻技術的日益進步，遂有了「介觀物理及元件」之新穎跨領域的出現。目前在這個研究領域中的一個相當重要而熱門的課題，是探究低維系統中之相位破壞之機制究竟為何？又當溫度趨近絕對零度時，電子相位相干時間究竟應為一有限值，抑或是一無限值？

緊跟隨著量子干涉效應的發現，一個低維電子氣樣品中的電子相位相干時間，已經可以從實驗上經由低溫磁阻的量測，很準確的被物理學家們決定出來了。並且，理論上也已經可以很定量的用電子-電子散射機制來解釋 [1]。然而物理學家又發現，當溫度非常低(比如小於1 K)時，許多二維及一維半導體或金屬樣品中的實驗結果顯示，電子相位相干時間有趨向於一個“有限值”的

趨勢，而非趨近於一個發散的“無限大”的值。物理上說，如果電子相位破壞之機制是由於與溫度有關的某種非彈性過程所造成的，則在溫度趨近於絕對零度時，因為非彈性散射效應減小而近乎消失了，則電子相位相干時間理應變為無限長。此點顯然與實驗結果不符，因此許多實驗及理論物理學家們認為，或許有一個非熱能之本徵的電子相位破壞機制存在，有待發覺與確認。到了最近三、四年來，這個問題更再度引起了廣泛的注意和討論。

這一個觀點，由 Webb 等人 [2] 提供了實驗方面的“證明”，而由 Zaikin 等人 [3] 提供了理論方面的“背景與支持”，一切看似都非常的合理與成功。然而最近 Altshuler 等人 [4] 卻提出另外一套理論，認為諸多實驗中所觀測到的電子相位相干時間之飽和值，應該是由於外在的高頻噪音所造成的。反之，Zawadowski [5]，Imry 及 Fukuyama [6] 等人則認為是由 two-level systems 所引起的。這個問題在可預見的數年內，應仍將是凝體物理中的一個重要的課題，也是本計畫所研究的一個主題。

2. 無序金屬中電子-聲子散射時間之量測：

「電子-聲子作用」是固體中非常重要的一個物理量。在有序的金屬中，電子-聲子作用的問題，在理論上以及實驗上，都早已獲得解決了。反之，在現階段中，物理學家對無序金屬中的電子-聲子作用，則瞭解仍然極為有限。事實上，迄今為止，理論固態物理學家仍然無法成功的預測在有亂度 (disorder) 存在時的電子-聲子散射時間。實驗方面，量測電子-聲子散射率亦非一件容易的工作。倘欲進一步的量測電子-聲子散射率對亂度 (電子彈性平均自由徑) 的函數依存性，則更是一件難度再高許多的工作。

自 1960 年代末起，隨著各式非晶態 (amorphous) 超導體的陸續在許多實驗室裏被成功的製作出來，理論物理學家也亟欲推展建構於晶態上的 BCS 理論，

以將之應用於解釋這種出現在無序系統中的超導現象。因此，當時即有許多理論群開始研究在有亂度存在時的電子-聲子作用的這一個問題。其後，無序金屬中電子-聲子作用的理論，仍持續被研究著。尤其到了 1986 年以後，Rammer-Schmid [7]，Reizer-Sergeev [8]，Belitz [9] 等人又分別對這個問題做了一個較為全面性的理論探討，並得到了一個相當一致的結論。

實驗技術上，藉由對電子弱局域效應所造成的低溫磁阻的量測 [9]，已可以相當準確的將一個導體中的電子-聲子散射時間抽離出來。目前的情況是，與溫度的平方、立方、或四次方成正比的電子-聲子散射率，都曾經在各種二維金屬薄膜、或三維非晶態合金中被量測到過 [10]。反之，由於在實驗技術上對於一個給定樣品系統的亂度，通常很難以做較大幅度的調控。因此，事實上是非常的難以尋找到並製作出一系列適當的無序樣品系統，以供進行探討電子-聲子散射率對亂度的函數依存性的實驗。基本上，在迄今為止的文獻中，大致只有本實驗室於 (a) 1995 年時，在一組仔細選擇製作的鈦-鋁合金 [11]，(b) 1998 年時，在一組仔細選擇製作的金-鈮厚膜 [12] 上的實驗，(c) 1999 年時，在一組仔細選擇製作的鈦-鋁-錫合金 [13]，和 (d) 2000 年時，在一組仔細選擇製作的碲厚膜 [14] 上的實驗，曾經成功、明確的決定出了一個電子-聲子散射率的亂度變化關係。

現在，這一個研究領域的問題在於，雖然我們已經成功的決定出了無序金屬中電子-聲子散射率對溫度、和對電子平均自由徑二者的函數依存性，但是我們的結果卻與 Rammer-Schmid, Reizer-Sergeyev, Belitz 等人的現代的理論完全不相吻合。我們的實驗結果，已經引起了理論學者的注意，Sergeev and Mitin [15]、吳玉書教授 [16] 並且已經提出了新的理論，可以解釋為何電子-聲子散射率會與溫度的平方成正比、而與電子的平均自由徑成反比。

參考文獻：

1. B.L. Altshuler, *et al.*, J. Phys. C 15, 7367 (1982).
2. P. Mohanty, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 78, 3366 (1997); P. Mohanty, Physica B 280, 446 (2000).
3. D.S. Golubev and A.D. Zaikin, Phys. Rev. Lett. 81, 1074 (1998); Phys. Rev. B 62, 14061 (2000).
4. I.L. Aleiner, *et al.*, Physica E 3, 58 (1998); Wave Random Media 9, 201 (1999).
5. A. Zawadowski, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83, 2632 (1999); O. Ujsaghy, G. Zarand, and A. Zawadowski, cond-mat/0007245.
6. Y. Imry, *et al.*, Europhys. Lett. 47, 608 (1999).
7. J. Rammer and A. Schmid, Phys. Rev. B 34, 1352 (1986).
8. M.Yu. Reizer and A.V. Sergeev, Sov. Phys. JETP 63, 616 (1986).
9. D. Belitz, Phys. Rev. B 36, 2513 (1987).
10. B.L. Altshuler, *et al.* Sov. Sci. Rev. A 9, 223 (1987).
11. J.J. Lin and C.Y. Wu, Europhys. Lett. 29, 141 (1995).
12. Y.L. Zhong and J.J. Lin, Phys. Rev. Lett. 80, 588 (1998).
13. S.Y. Hsu, P.J. Sheng, and J.J. Lin, Phys. Rev. B 60, 3940 (1999).
14. J.J. Lin, T.J. Li, and , T.M. Wu, Phys. Rev. B 61, 3170 (2000).
15. A. Sergeev and V. Mitin, Phys. Rev. B 61, 6041 (2000); Superlattice Microst. 27, 499 (2000); Europhys. Lett. 51, 641 (2000).
16. W. Jan, G.Y. Wu, and H.S. Wei, Phys. Rev. B, (accepted).

三、研究結果

1. 介觀系統中飽和電子相位相干時間之量測：

在本計畫中，我們製作了一系列之金屬薄膜、以及三維金屬厚膜，並量測

在極低溫下之飽和電子相位相干時間。

2. 無序金屬中電子-聲子散射時間之量測：

在本計畫中，我們採用了直流濺鍍法及熱蒸鍍法，製作了一系列的無序導體厚膜，以用來量測電子-聲子散射時間。最主要的，我們採用了非過渡性(即不含 d 電子的)金屬材料系統，一則此種金屬的電子結構相對上較為單純，因此有助於與理論預測做較直接的比較。

在物理方面的考量上，我們也從一個不同的、新的角度來探討無序系統中的電子-聲子作用的問題，即我們探討了在中間亂度時的電子-聲子散射時間，在這個亂度區域，電子的平均自由徑約與聲子的波長相等，而我們以前集中在 dirty limit 時則電子的平均自由徑遠較聲子的波長為短。本計畫的結果，可對無序固體中的電子-聲子作用的理論，做全面性的檢測。

我們亦對 A15 compounds (傳統上的非氧化物高溫超導體)中的電子-聲子散射時間和低溫電子相位相干時間進行了研究。這一方面的實驗結果，可以與典型金屬 (normal metals) 中的電子-聲子散射時間做比較研究。