

- [93] Du R R , Stormer H L , Tsui D C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1993 ,70 :2944 ; Pan W , Stormer H L , Tsui D C *et al.* Phys. Rev. Lett. 2003 ,90 :D16801
- [94] Kashaev R M. Russian Math. Surbey ,1997 ,52 - 61 :1191 ; Annals of Physics ,1997 ,303 :2 ; Mod. Phys. Lett. A ,1995 ,10 :1409 ; Kashaev R M. Lett. Math. Phys. ,1997 ,39 :269
- [95] Moore G , Read N. Nucl. Phys. B ,1991 ,360 :362 ; Greiter M , Wen X G , Wilczek F. Nucl. Phys. B ,1992 ,374 :567
- [96] Freedman M H. Found. Comput. Math. 2001 ,1 :383 ; Freedman M , Kitaev A , Larsen M *et al.* Comm. Math. Phys. 2002 ,227 :587
- [97] Zudov M A , Du R R , Simmons J A *et al.* Phys. Rev. B 2001 ,64 :201311 ; Zudov M A , Du R R , Pfeiffer L N *et al.* Phys. Rev. Lett. 2003 ,90 :D46807
- [98] Mani R G , Smet J H , von Klitzing K *et al.* Nature (London) , 2002 ,420 :646 ; Phys. Rev. Lett. 2004 ,92 :146801
- [99] Dmitriev I A , Mirlin A D , Polyakov D G. Phys. Rev. Lett. , 2003 ,91 :226802
- [100] Ryzhii V I. Sov. Phys. Solid State ,1969 ,10 :2286
- [101] Shi J R , Xie C. Phys. Rev. Lett. 2003 ,91 :D86801 ; Durst A C , Sachdev S , Read N *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91 :086803 ; Lei X L , Liu S Y. Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91 :226805
- [102] Andreev A V , Aleiner I L , Millis A J. Phys. Rev. Lett. , 2003 ,91 :D56803 ; Auerbach A , Finkler I , Halperin B I *et al.* Phys. Rev. Lett. 2005 ,94 :196801 ; Ng T K , Dai L X. Phys. Rev. B 2005 ,72 :235333
- [103] Wallace P R. Phys. Rev. ,1947 ,71 :622
- [104] Novoselov K S , Geim A K , Morozov S V *et al.* Science 2004 ,306 :666
- [105] Novoselov K S , Geim A K , Morozov S V *et al.* Nature 2005 ,438 :197
- [106] Zhang Y , Tan Y - W , Stormer H *et al.* Nature 2005 ,438 :201

电子相位相干时间*

林志忠

本期《物理双月刊》的“介观物理”专集中,马中水教授的《介观物理基础和近期发展几个方面的简单介绍》是一篇力作.该文对介观系统、介观物理的基础概念、介观物理发展的来龙去脉,以及近几年来介观物理领域因结合纳米科技而发展出来的新课题,做了非常全面性的介绍.这篇文章值得想要进入介观物理领域的研究生、博士后研究,以及已经在该领域从事某些课题研究的学者,仔细研读.马教授的文章,集中于讨论介观体系的(低温量子)电子传输性质.

在对介观体系的研究中,导电电子的相位相干长度(phase coherence length 或 dephasing length)可以说是最关键的一个物理量.近二十年来,低温实验物理学家藉由对低维金属和半导体样品中的几种量子干涉传输(quantum-interference transport)现象,包括弱局域效应(weak localization)、普适电导涨落(universal conductance fluctuations)和 Aharonov - Bohm oscillations 的量测,已经对于真实材料中的电子相位相干长度以及电子相位相干时间(phase coherence time 或 dephasing time)有了非常具体的理解.

大致说来,在较高的温度(几度 K 或更高)时,电子-声子散射常是最主要的退相干(dephasing)机制.在较低温(几度 K 以下)时,则退相干的机制与系统的维度有关.在三维介观金属系统中,电子-声子散射仍是最主要的退相干机制.但是在低维

(准一维和二维)的介观样品中,电子-电子散射(Nyquist electron-electron scattering)则成为最主要的退相干机制^[1].

图 1 显示实验所量测到的两片不同厚度之铟膜的电子退相干时间对温度的关系^[2].这两片铟膜的制作(溅镀)条件相同,唯一的差别只在一片膜的厚度镀成 3000 Å(因此表现出三维的量子干涉传输特性),另外一片膜的厚度镀成 175 Å(因此表现出准二维的量子干涉传输特性).从图中可以清楚看到,在较高温时,两者的退相干时间重合,且温度变化强烈,这即是电子-声子散射造成的结果.一般导体中的电子-声子散射时间可以写成: $\tau_{e-ph} \propto T^{-p}$, 通常温度指数 $2 \leq p \leq 4$.

当温度降低时,图 1 显示,厚膜中的电子-声子散射持续作用到较低的温度(低到 2 K 时,退相干时间对温度的依赖关系仍然不变,与高温时相同,如虚线所示).但是在薄膜中,到了 6 K 以下,退相干时间的温度变化就明显地改变了(变得较弱).图中实线的斜率为 -1,即表示 $\tau_e \propto T^{-1}$.这正是准二维导

* 经作者和出版者同意,本文转载自《物理双月刊》2006 年 28 卷 5 期(10 月)750 页. <http://psroc.phys.ntu.edu.tw/bimonth/index.php>

† 现任交通大学物理研究所及电子物理系合聘教授,研究领域为介观物理、低温物理、凝聚态物理及纳米科技.

Email : jilin@mail.nctu.edu.tw

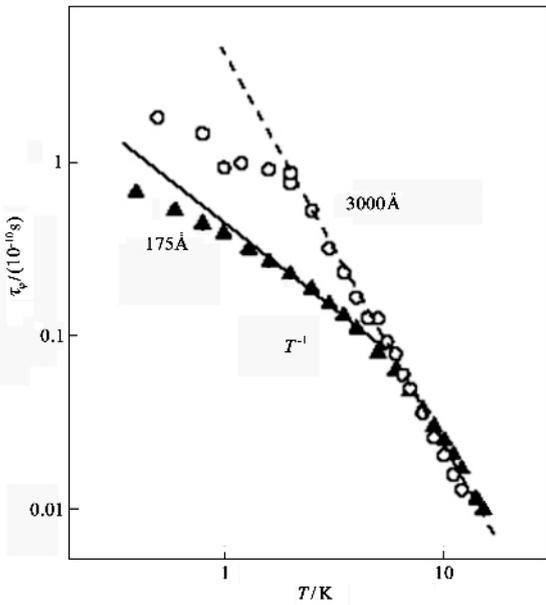


图1 铟膜的退相位相干时间对温度的变化(空心圆表示 3000 Å 的厚膜, 实心三角形表示 175 Å 的薄膜. 实线的斜率为 -1, 即 $\tau_\varphi \propto T^{-1}$)^[2]

体中的电子-电子散射造成的结果^[1]. 同一种材料, 同一种制程, 只是制作得厚一点或薄一点, 就表现出退相干时间的不同机制和维度效应, 这是介观物理的美妙之一.

图2 显示准一维细银及细金线中的电子退相干时间对温度的关系^[3]. 银线与金线的截面积都约为 $450 \times 1000 \text{ \AA}^2$. 从图中可以清楚看到, 在 1 K 以下时, $\tau_\varphi \propto T^{-2/3}$. 这正是准一维无序导体中的电子-电子散射时间造成的结果^[1]. 同样是电子-电子散射, 但是在不同的维度中, 就会表现出不同的温度变化关系.

实验往往发现, 在更低温时 (< 1 K 时), 许多样品中的退相干时间表现出非常弱的温度关系, 甚至有饱和的现象, 如马教授文章中图9所示(检视图1中的两个样品, 也可以发现在最低测量温度时, 退相干时间的温度关系有持续减弱的迹象). 当温度趋近于绝对零度时(导电电子的量子态趋近于时间反演对称而且唯一的基态), 所观测到的退相干时间的饱和, 到底是一个介观电子气的本征特性, 或者是因为样品中的导电电子与其他动力学自由度(如微量磁性杂质之磁矩)耦合的结果, 是最近几年来介观物理的一个非常重大的争议课题^[4].

与介观金属样品类似, 在低维半导体电子气中, 退相干时间也是由电子-电子散射时间所控制, 并且有着与图1及图2相同的温度与维度变化关系.

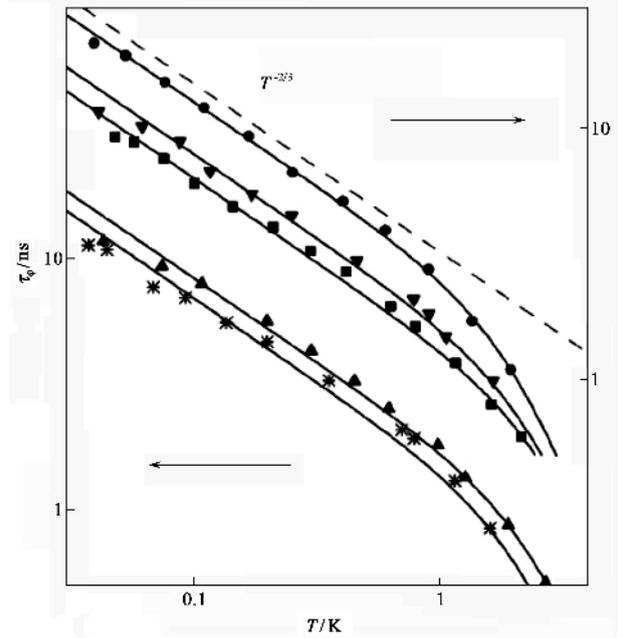


图2 准一维细银及细金线的退相位相干时间对温度的变化^[3]. 最下方的样品(*)表示金线, 其余都表示银线. 虚线的斜率为 -2/3, 即 $\tau_\varphi \propto T^{-2/3}$ (此图中的样品因为电子平均自由程较长, 因此只有低到 1 K 以下时, 电子-电子散射率才大过电子-声子散射率)

有关介观体系中的电子相位相干时间的详尽讨论, 可以参考文献[5].

参 考 文 献

- [1] Altshuler B L, Aronov A G, Khmel'nitzkii D E. J. Phys. C, 1982, 15 7367
- [2] Lin J J, Li T J, Zhong Y L. J. Phys. Soc. Jpn. 2003, 72: 7. Suppl. A
- [3] Pierre F, Gougam A B, Anthore A et al. Phys. Rev. B, 2003, 68 085413
- [4] 绝对零度时, 本征的退相干时间的饱和行为隐喻费米液体图像不能解释低温介观电子气的行为, 也表示著名的 scaling theory of localization (Abrahams E, Anderson P W, Licciardello D C et al. Phys. Rev. Lett., 1979, 42 573) 的预测不再成立(自发表迄今, Abrahams 等人的论文已经被引用了 2900 多次, 是凝聚态物理学的最重要文献之一)
- [5] Lin J J, Bird J P. J. Phys.: Condens. Matter, 2002, 14: R501