

相互作用量子点系统中的场致自旋电流^{*}

张平¹ 薛其坤^{1,†} 谢心澄²

(1 中国科学院物理研究所 国际量子结构中心 北京 100080)

(2 Department of Physics, Oklahoma State University, USA)

摘要 从理论上研究了相互作用量子点在外部分旋转磁场下的非平衡自旋输运性质. 研究结果表明, 量子点中的相干自旋振荡可以导致自旋电流的产生. 当计入库仑关联相互作用后, 近藤共振效应受外部进动磁场的影响很强. 特别是当磁场的进动频率与塞曼能移满足共振条件时, 每个自旋近藤峰就会劈裂为两个自旋共振峰的叠加. 在低温强耦合区, 这种近藤型共隧穿过程对自旋电流带来重要贡献.

关键词 量子点, 近藤共振, 自旋电流, 自旋电子学, 量子计算

Spin current through a quantum dot in the presence of an oscillating magnetic field

ZHANG Ping¹ XUE Qi-Kun^{1,†} XIE Xin-Cheng²

(1 International Center for Quantum Structures, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 Department of Physics, Oklahoma State University, USA)

Abstract Non-equilibrium spin transport through an interacting quantum dot is discussed. The coherent spin oscillations in the dot provide a source for generating spin current. In the interaction regime, the Kondo effect is influenced significantly by the presence of a precessing magnetic field. In particular, when the precession frequency is tuned to resonance between the spin-up and spin-down states of the dot, the Kondo singularity for each spin splits into a superposition of two resonance peaks. The Kondo-type cotunneling contribution is manifested by a large enhancement of the pumped spin current in the strong coupling, low temperature regime.

Key words quantum dot, Kondo resonance, spin current, spintronics, quantum computation

电子有两个内禀特性, 一个是电荷, 一个是自旋. 微电子学主要利用了电子的电荷特性来携带和处理信息, 集成电路中所使用的半导体晶体管以及激光器等所涉及的材料都是非磁性的, 载流子的能量与自旋方向无关. 最近几年该领域的一个重要发展是电子的自旋性质有可能被开发利用, 这导致了“自旋电子学”这一新兴学科的出现. 低维半导体材料, 特别是量子点系统是目前深入研究的对象. 由于量子限制效应带来的库仑碰撞和电-声耦合作用的增强, 其电荷自由度的量子相干性很容易被耗散掉. 相反, 其自旋自由度(特别是核自旋)的退相干时间却变得很长^[1]. 自从量子纠错编码被发现以后, 固体物理学界的研究人员就一直希望利用半导体介观

系统的自旋自由度来实现最终的量子计算机^[2]. 由于自旋的量子力学属性, 自旋电子学和通常的半导体电子学有着本质的区别, 无论在实验上还是在理论上都极具有挑战性.

半导体量子点系统的自旋极化输运性质受到了特别的关注^[3]. 例如, 哈佛大学的研究组观测到了外部磁场耦合下的量子点系统中的自旋相干抽运现

* 国家自然科学基金(批准号: 60021403, 10134030, 10174089), 国家重点基础研究发展计划(批准号: G001CB3095, 2002CB613500)和美国 NSF(批准号: DMR-0110034)资助项目
2003-11-12 收到

† 通讯联系人. E-mail: qkxue@aphy.iphy.ac.cn

象^[4],荷兰的研究组接连在量子点接触器件^[5]和库仑阻塞区^[6]观测到自旋极化电流.在库仑阻塞区,量子输运通常可由单粒子共振隧穿理论来描述;在低温强耦合条件下,高阶隧穿过程不能忽略,描述高阶隧穿过程的近藤共振效应^[7]会对量子输运带来重要影响.尽管电荷自由度的近藤共振效应已在理论和实验上研究得非常清楚^[8],但近藤效应对自旋输运的影响还没有引起人们的注意.考虑到近藤共振提供了一种自旋翻转的机制,无论从理论上^[9]还是从实验上研究近藤效应对自旋输运的影响都是非常有意义的.

最近我们研究了相互作用量子点在旋转磁场驱动下的自旋输运和近藤共振效应^[10],得到了一些新结果.图1示意地表示局部磁场耦合下的量子点系统,它由一个单能级量子点和一个外部电极构成.磁场的静态成分 B_0 使得量子点中自旋简并的两个能级发生塞曼分裂,而磁场的进动成分($B_1 \cos \omega t$, $B_1 \sin \omega t$)落在与 B_0 垂直的平面内.在没有外部电极耦合的情况下,量子点中的电子将在两个自旋态 $|\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\rangle$ 之间振荡,振荡周期为 $T = \pi/\Omega$, $\Omega = \sqrt{\Delta^2 + 4(g\mu_B B_1)^2}$ 为通常的拉比频率, $\Delta = g\mu_B B_0 - \omega$ 代表共振失谐(定义 $\hbar = 1$) g 为电子的有效朗德因子, μ_B 为电子的玻尔磁子.为简单起见,我们完全忽略了磁场与电极的耦合.实验上完全消除磁场-电极耦合的有效方法有两种:一种方法是选择反铁磁体作为电极,因为反铁磁体对外部磁场的响应很弱;另外一种方法是通过外场的调制,使得电极和量子点的 g 因子有很大不同,这也可以有效消除电极和磁场间的耦合.

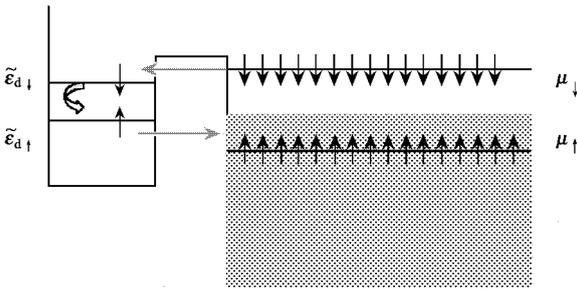


图1 量子点中自旋输运的理论模型

(由于自旋向上和向下态化学势的不同,电子可以通过量子点从自旋向上的通道隧穿到自旋向下的通道中去)

我们采用标准的安德森模型哈密顿量^[11]来描述该量子点系统.由于库仑关联相互作用以及电极-量子点间的轨道耦合作用,系统的磁场驱动动力

学性质与通常的磁偶极子的动力学性质完全不同.我们的分析表明,量子点系统具有复杂的自旋电流响应.量子点电子自旋共振吸收的能量通过电极-量子点耦合作用转移给电极,从而产生自旋电流.而量子点内的库仑强关联作用则会引起近藤型的高阶自旋共振隧穿过程,从而显著地影响了自旋电流.

为了对系统的自旋电流响应有一个物理的认识,我们引入了一个含时么正变换,该变换消去了进动磁场的含时因子,使得哈密顿量在旋转坐标系下与时间无关,量子点内的自旋能级 $\varepsilon_{d\sigma}$ 相应地被缀饰为 $\bar{\varepsilon}_{d\sigma(\downarrow)} = \varepsilon_{d\sigma(\downarrow)} \pm \omega/2$.同时,该变换使得电极内的自旋向上和自旋向下电子能级发生有效分裂,其自旋化学势 μ_{\uparrow} 与 μ_{\downarrow} 不再重合,而是满足关系 $\mu_{\downarrow} - \mu_{\uparrow} = \omega$ (见图1).因此自旋电流响应的物理图像为:当外加栅压 V_g (用来调制量子点能级)满足条件 $\mu_{\downarrow} > \bar{\varepsilon}_{d\downarrow}$ 时,电极中自旋向下的电子就会隧穿进入量子点内的自旋 $|\downarrow\rangle$ 态,并被磁场 B_1 翻转到 $|\uparrow\rangle$ 态.如果系统同时满足条件 $\bar{\varepsilon}_{d\uparrow} > \mu_{\uparrow}$,则该电子就会有一定的几率隧穿到电极中自旋向上的能态上.这种自旋翻转隧穿过程的结果就是形成了自旋电流(电荷流始终为零).

图2给出了无库仑相互作用时的自旋电流,其中图2(a)为不同温度下自旋电流与磁场进动频率的关系曲线.可以看到,低温时(图中实线)自旋电流峰并不位于电子自旋共振能量 $\omega = g\mu_B B_0$ 处,而是远离该共振能量.原因是当 $\omega = g\mu_B B_0$ 时,尽管 $\mu_{\downarrow} > \bar{\varepsilon}_{d\downarrow}$,然而由于 $\bar{\varepsilon}_{d\uparrow} < \mu_{\uparrow}$,自旋电流被抑制.继续增加旋转能量,由于量子点的两个自旋态发生结构交换[见图2(a)中的插图],因此在一定旋转频率下 $\bar{\varepsilon}_{d\uparrow}$ 就会超过 μ_{\uparrow} ,形成图中实线所示的自旋电流峰.当增加温度,使得条件 $k_B T \sim |\mu_{\uparrow} - \bar{\varepsilon}_{d\uparrow}|$ 满足时,热激发效应就会将自旋电流峰移至 $\omega = g\mu_B B_0$ 处.当进一步增加温度,使得 $k_B T > \omega$ 时,则热激发能量模糊了“自旋偏压”,使得自旋电流减小(见图中虚线).如果调节栅压,使得两个缀饰自旋能级同时处于 μ_{\uparrow} 和 μ_{\downarrow} 之间时,则自旋电流峰总是位于电子自旋共振能量处[见图2(b)].

当系统处于低温强耦合区时,库仑相互作用引起的强关联效应就会在自旋电流中体现出来.我们采用通常的运动方程方法在大 U 极限下求解了系统的非平衡格林函数,得到了推迟格林函数和推迟自能的高阶近似形式,分布格林函数可由相应的积分方程确定,由此我们得到了局域自旋态密度和自

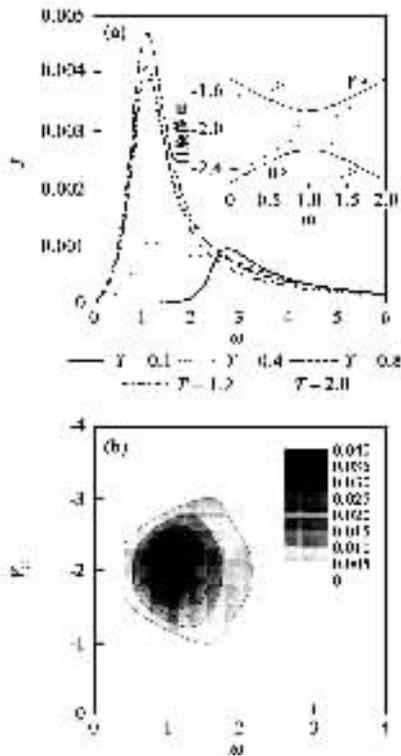


图2 (a) 无库仑相互作用时不同温度下的自旋电流随磁场进动频率的变化情况,自旋向上和向下的能级分别设置在 $-2.5(\bar{\epsilon}_{d\uparrow})$ 和 $-1.5(\epsilon_{d\downarrow})$ (b) 自旋电流随门电压和磁场进动频率的变化情况,自旋能级的电压调制函数为 $\epsilon_{d\sigma}(V_g) = \epsilon_{d\sigma} + eV_g(\bar{\epsilon}_{d\uparrow} = 1, \epsilon_{d\downarrow} = 2)$ 其他参数 $\Gamma = 0.1, g\mu_B B_1 = 0.2$

$\rho_o(\epsilon)$ 其中图 3(a) 显示了不加旋转磁场 ($B_1 = 0$) 时的量子点自旋态密度. 从图中可以看到, 由于静态磁场 B_0 带来的塞曼能移, $\rho_{\uparrow}(\epsilon)$ 被磁场显著增强, 而 $\rho_{\downarrow}(\epsilon)$ 则被磁场抑制. 同时两种自旋的近藤共振峰也相应地发生了劈裂, 分别位于能量 $\epsilon = -g\mu_B B_0$ (自旋向上) 和 $\epsilon = g\mu_B B_0$ (自旋向下) 处. 图 3(a) 中的插图显示了自旋向上近藤共振峰处的自旋共隧穿过程. 在该过程中, 一个自旋向下的电子从电极的费米能级处隧穿到量子点内的自旋能级 $\epsilon_{d\downarrow}$ 上, 同时另外一个电子从自旋能级 $\epsilon_{d\uparrow}$ 处隧穿到电极中费米能级以下 $g\mu_B B_0$ 处. 这样, 一次共隧穿事件的效果就是翻转了电极中一个电子的自旋. 事实上, $\epsilon = -g\mu_B B_0$ 处的近藤共振峰是所有这些共隧穿事件叠加的结果. 因此我们预料, 在非平衡条件下, 自旋电流可以通过近藤型自旋共隧穿过程产生. 当旋转磁场 $B_1 \neq 0$ 时, 由于自旋化学势的劈裂, 两个自旋近藤共振峰会发生相对移动 [见图 3(b)–(d)]. 特别是当系统参数满足自旋共振条件时 [见图 3(c)], 强烈的自旋混合效应使得每个自旋近藤共振峰都劈裂为两个峰, 并且两种自旋共振峰完全重合.

近藤共隧穿效应对自旋电流的影响如图 4 所示. 图中实线表示计入强关联作用后的自旋电流, 虚线表示无相互作用时的自旋电流. 可以看到, 自旋近藤共振效应给自旋电流带来了重要贡献. 应该指出的是, 目前理论和实验上都还没有对自旋共隧穿电流展开系统的研究, 因此这是一个值得深究的问题.

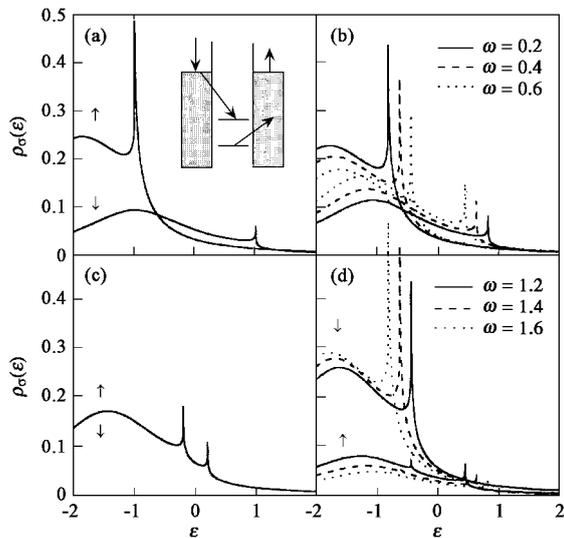


图3 $U = 2$ 时不同外场旋转频率下自旋电流随门电压的变化曲线, 其他参数和图 2(b) 中的相同

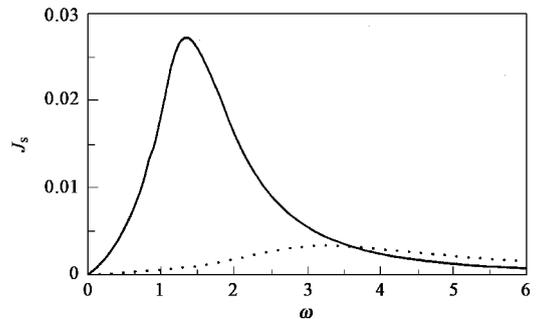


图4 不同外场旋转频率下自旋向上(实线)和向下(点划线)的态密度. 使用的参数为 $\epsilon_{d\uparrow} = -2.5\Gamma, \epsilon_{d\downarrow} = -1.5\Gamma, T = 0.001\Gamma, g\mu_B B_1 = 0.2\Gamma$

综上所述, 施加外部旋转磁场是产生纯的自旋电流的一种有效方式. 我们发现, 在低温强耦合区, 近藤型共隧穿过程引起了自旋电流的显著增强. 这为自旋电流的实现提供了一个有效的途径.

旋电流.

图 3 显示了不同旋转频率下的局域自旋态密度

参 考 文 献

- [1] Kikkawa J M , Awschalom D D . Phys. Rev. Lett. , 1998 , 80 : 4313
- [2] Awschalom D D , Sarmarath N , Loss D eds. . Semiconductor Spintronics and Quantum Computation. Berlin : Springer-Verlag , 2002
- [3] Sun Q F , Guo H , Wang J . Phys. Rev. Lett. , 2003 , 90 : 258301
- [4] Watson S K *et al.* cond - mat/0302492
- [5] Potok R M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002 , 89 : 266602
- [6] Potok R M *et al.* cond - mat/0303152
- [7] Kondo J. Solid State Physics , 1969 , 23 : 183
- [8] Kouwenhoven L , Glazman L. Physics World , 2001 , 14 : 33
- [9] Zhang P , Xue Q K , Wang Y P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002 , 89 : 286803
- [10] Zhang P , Xue Q K , Xie X C Phys. Rev. Lett. , 2003 , 91 : 196602
- [11] Anderson P W. Phys. Rev. , 1961 , 124 : 41

· 物理新闻和动态 ·

第九届全国低温物理学术讨论会简讯

受低温物理专业委员会的委托,由华中科技大学和武汉大学共同承办,第九届全国低温物理学术讨论会于2003年10月27日至30日在武汉华中科技大学举行.与会代表150余人,分别来自全国30多所高校或研究所,日本Tohoku大学久保田均博士和法国Grenoble低温实验室Carley Paulsen教授也应邀参加.本次会议为历届低温物理学术讨论会规模最大、代表人数最多、学术气氛浓厚的一次会议.

低温物理专业委员会主任赵忠贤院士致开幕词.他纵观国际低温物理研究的历史及其对科学技术发展所起的重要作用,剖析当前国际上相关领域的研究趋势,分析我国的研究现状和努力方向,指出低温物理研究是大有可为的.湖北省政协副主席、武汉大学博士生导师王少阶教授、华中科技大学校长樊明武院士、中国科学院武汉分院院长、华中科技大学理学院院长叶朝辉院士等先后讲话.

开幕式后,于淦院士、周放研究员/赵忠贤院士、邢定钰教授和张裕恒教授分别就“自旋-电子规范理论和欠掺杂高温超导体的金属-绝缘体相变”、“ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 超导体中的反常物理现象”、“自旋输运中的几个问题”和“(A, Ca) $\text{Mn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ (A = La, Bi) 电荷有序的坍塌”做了大会特邀报告.

除特邀报告外,40多个分会邀请报告和60多个一般报告进行了会上交流,内容涉及五大主题,即(1)非常规超导电性,电子强关联问题,序参量对称性,磁通动力学;(2)低维导体、纳米管、纳米线、量子点,以及单电子器件及其低温物性;(3)GMR,CMR,TMR现象,自旋有序、电荷有序、轨道有序与相变,半金属、铁磁金属、超导等各种材料的异质结,自旋极化输运及低温下磁有序等;(4)量子输运、量子相干、量子计算,分子磁体和玻色-爱因斯坦凝聚等;(5)极低温的获得和低温实验技术.这些报告充分反映了我国低温物理领域研究的概况和快速发展的趋势.

全国低温物理学术讨论会是每两年举行一次的低温物理专业委员会的例会.本次会议的大会特邀报告和分会邀请报告的遴选采用由专业委员会负责人委托5名专家按5个

主题约定报告人的方法确定,一般报告由与会者自行提出.

这次会议的特点是:

(1)学术内容涉及面广,除了基础研究的课题外,还呈现出不少与现代科技密切相关的应用基础研究的课题,如单电子器件物理问题、自旋电子学、超导电子学、分子磁体中的量子隧穿、新超导材料探索等,这些课题的研究是信息革命的需求,为低温物理的发展增添了活力,更具有时代感.

(2)参加的人多,所在单位地域分布较广,有不少单位首次参加全国低温会.

(3)有一批高水平的理论物理学家参加,他们和实验物理学家之间的深入讨论加强了学术交流的深度.

(4)年轻人多,反映我国低温物理领域新老交替的局面已经形成.

(5)学术气氛浓厚,会上会下讨论热烈,代表们在会议期间认识了新的朋友,有的还商量的合作课题.

会议期间还举行了低温物理专业委员会学术委员会会议,专业委员会主任赵忠贤院士、副主任吕力研究员和李晓光教授以及近20名学术委员会委员参加了这次会议,国家自然科学基金委员会物理I科学一处处长张守著博士应邀参加.会上议论了我国低温物理研究的发展方向,并就今后几年在我国低温物理界以“低温下量子奇异现象”作为重点研究内容的问题达成共识,同时就低温物理专业委员会主任人选、如何办好《低温物理学报》以及下届低温物理学术讨论会等问题也进行了讨论.委员们一致建议赵忠贤院士继续担任低温物理专业委员会主任,同时决定下届全国低温物理会在广西省南宁市举行,委托北京大学物理学院和广西大学物理院共同承担会务组织工作.

闭幕式上,原低温物理专业委员会副主任、北京大学物理学院阎守胜教授受大会的委托做了生动而精彩的会议总结,张守著处长在发言中充分肯定了近几年来低温物理研究取得的成绩,表示继续支持低温物理研究.专业委员会负责人代表大家感谢国家自然科学基金的一贯支持,同时感谢会务组全体同志的热情接待和辛勤劳动.

(中国科学院物理研究所 陈兆甲)