

# 自旋轨道耦合和自旋流的研究若干进展

孙庆丰<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100190)

**摘要** 近十年来,国内外科学工作者对自旋轨道耦合和自旋流作了很多深入的研究.文章介绍该领域的一些重要进展以及它的发展情况,包括介绍由自旋轨道耦合所引起的内在自旋霍尔效应和持续自旋流、自旋流的产生、自旋流的定义以及自旋流产生电场等.最后也讨论一些有待于解决的课题,以及对该领域的展望.

**关键词** 自旋轨道耦合,自旋流

## The spin-orbit interaction and spin current

SUN Qing-Feng<sup>†</sup>

(Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** In recent years the spin-orbit interaction and spin current have been investigated extensively. We review some of the main developments in this field, including the intrinsic spin Hall effect and persistent spin current induced by the spin-orbit interaction, the generation of spin current, its definition, and the spin-current induced electric field. We also discuss some unsolved problems and future prospects of this field.

**Keywords** spin-orbit interaction, spin current

### 1 引言

电子具有电荷和自旋自由度,但传统的硅基半导体电子器件主要是基于电子的电荷,而一直忽略自旋自由度.近十年来,人们在低维纳米尺度的体系中发现,自旋在很多性能方面比电荷更优越,例如,退相干时间长,能耗低等<sup>[1,2]</sup>.这就使得人们试图利用自旋自由度来设计新一代的电子器件.一门新兴的属于凝聚态物理领域的子学科——自旋电子学在近几年出现,并迅速蓬勃发展起来<sup>[1-3]</sup>.自旋电子学是研究自旋操控、自旋输运、自旋流的特点等与自旋有关的学科.其目的是揭示与自旋有关的各种新现象,和实现自旋电子器件,以及进一步构造量子计算机.

自旋流是自旋电子学中一个最重要的物理量,它是和电流相对应的量.直观地说,一个自旋流相当于自旋向上的电子向一边运动,而同时自旋向下的电子向反方向运动.从2000年以来,人们对自旋流已展开了很多研究,目前实验上已能产生自旋流,已

实现对自旋流的探测,同时自旋流的一些基本特征和规律也被揭露和深入研究.

自旋轨道耦合,也称自旋轨道相互作用,是自旋电子学中一个很重要的相互作用.自旋轨道耦合是一个相对论的结果,它的本质是外电场对运动自旋的作用<sup>[4]</sup>.在通常情况下,自旋轨道耦合很弱,可以忽略.但在一些半导体体系中,它却表现出很强,而且它的耦合强度可以通过栅电压来调节和控制.例如,在实验上,对Rashba自旋轨道耦合已实现从 $-1 \times 10^{-12}$  eV $\cdot$ m到 $3 \times 10^{-11}$  eV $\cdot$ m的调节<sup>[5]</sup>.自旋轨道耦合的一个重要特点是,它将电子的自旋和电子的运动轨道耦合起来,所以利用自旋轨道耦合,人们可以简单方便地用外电场或外电压来实现对自旋的控制和操纵.近年来,人们对自旋轨道耦合进行了深入的研究,已陆续发现一些由自旋轨道耦合所引起的有趣效应,例如自旋霍尔效应、持续自旋流等.

\* 国家自然科学基金(批准号 60776060, 10525418)资助项目  
2008-2-20 收到

<sup>†</sup> Email: sunqf@aphy.iphy.ac.cn

本文将介绍近几年来在国际上对自旋流和自旋轨道耦合的研究进展. 由于这两个课题有紧密的联系, 故将它们一起介绍. 事实上, 一方面, 自旋轨道耦合能引起自旋流, 例如横向霍尔自旋流和持续自旋流等; 另一方面, 当有自旋轨道耦合时, 泡利矩阵  $\sigma_i$  ( $i = x, y, z$ ) 和哈密顿量不对易, 以致通常定义的自旋流不守恒. 近几年, 在有自旋轨道耦合的体系中, 怎么描述和定义自旋流已成为一个热门课题<sup>[1]</sup>. 所以本文将介绍下列问题: 一些自旋流产生的方法, 由自旋轨道耦合所引起的两个有趣效应(即自旋霍尔效应和持续自旋流); 低维有自旋轨道耦合体系的哈密顿量的二次量子化, 自旋流的定义, 与自旋流有关的几个基本现象(如自旋流产生电场, 外电场对自旋流的作用等).

## 2 自旋流的产生

为了研究和利用自旋流, 首先要解决的问题是产生自旋流. 本世纪以来, 人们已提出很多产生自旋流的方法. 例如, 用偏振光激发自旋流<sup>[6-8]</sup>, 用含时的外场去泵出自旋流<sup>[9, 10]</sup>, 用铁磁导线注入自旋流<sup>[11, 12]</sup>, 以及利用自旋轨道耦合诱导自旋流等, 并且其中一些方法已在实验上得到实现<sup>[7, 11]</sup>. 目前, 自旋流的产生已不是一个问题了. 下面简单地介绍两个产生自旋流的方法, 其中一个是我们自己提出的方法<sup>[9]</sup>, 另一个是实验已实现的方法<sup>[11]</sup>.

### 2.1 一种自旋池装置

考虑如图 1(a)所示的双量子点耦合到左右导线的体系. 如果在含时外微波场辐射下和在合适的参数条件下, 这体系将向外电路输出自旋流. 下面我们简单地分析一下它的工作原理. 设左、右量子点上加有相反方向的磁场, 由于塞曼效应, 它们的能级将分开; 在左量子点上, 自旋向上的能级较低, 即  $\varepsilon_{L\uparrow} < \varepsilon_{L\downarrow}$ ; 但在右量子点上, 情况却正好相反, 即  $\varepsilon_{R\uparrow} > \varepsilon_{R\downarrow}$ . 用栅电压把左右量子点的能级调节到单占据的库仑阻塞区, 即  $\varepsilon_{L/R\sigma} < \mu_{L/R} < \varepsilon_{L/R\sigma} + U$  (见图 1(b)). 这时, 左量子点将被一个自旋向上的电子所占据, 而自旋向下的态将在  $\varepsilon_{L\downarrow} + U$  的位置, 并且是空的, 而右量子点正好相反, 它被自旋向下的电子占据, 同时自旋向上的态是空的. 然后, 考虑到体系处于外微波场的辐射下, 光子协助的隧穿过程将发生. 左量子点的自旋向上的电子能吸收光子跃迁到右量子点, 进一步隧穿到右导线, 而右量子点的自旋向下的电子能吸收光子跳到左

量子点, 随后流到左导线. 所以这体系将向外电路输出一自旋流, 有自旋池的功能.

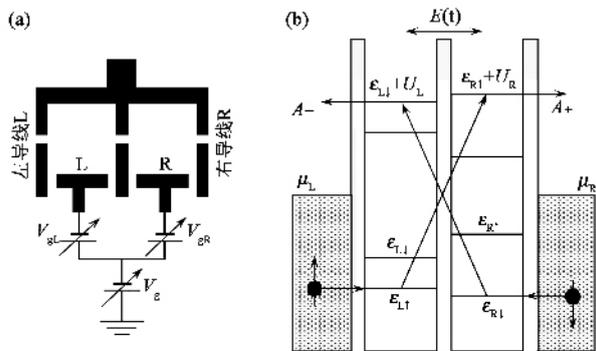


图 1 (a)自旋池的结构示意图 (b)自旋池的工作原理示意图

### 2.2 铁磁导线注入自旋流

在 2006 年发表在 Nature 杂志上的一篇测量逆自旋霍尔效应(即由纵向自旋流引起横向电流的效应)的文章中<sup>[11]</sup>, 他们利用铁磁导线向正常铝导线注入了自旋流. 这种产生自旋流的方法, 在原理上和装置上都很简单, 下面介绍一下它的装置和工作原理. 如图 2(a)所示, 一根约几百纳米宽的铁磁导线连接到一根铝导线. 在铁磁导线上端和铝导线的左端之间加上一外电压, 电流  $I_c$  将从铁磁导线流向铝导线. 这时在铝导线的另一端将出现没有电流的纯自旋流  $I_s$ . 这纯自旋流产生的原理如下: 设自旋向上和自旋向下的电子独立向前流动, 在铁磁导线中, 自旋向上的等效电阻和自旋向下的等效电阻不相等, 导致在铁磁导线和正常铝导线的界面上(A点)的自旋向上和向下的电势将不相等(见图 2(b)). 这个电势差将驱动一纯的自旋流流向铝导线的另一端. 事实上, 如果考虑自旋弛豫的存在并采用扩散方程, 可以容易地计算出与自旋有关的电势在铝导线上的分布(见图 2(b))以及各处的自旋流和电流.

## 3 自旋轨道耦合所引起的一些效应

自旋轨道耦合是一个相对论的结果, 从 Dirac 方程作低速近似, 可以导出它. 它的经典物理意义是外电场对运动自旋的作用. 自旋轨道耦合的普遍形

- 1) 如果哈密顿量和泡利矩阵  $\sigma_i$  对易, 然后自旋是好量子数, 这时的自旋流定义是明确的, 也得到大家的公认. 所以人们至少能先在没有自旋轨道耦合的正常区域中研究和讨论自旋流的各种特性, 然后再探索有自旋轨道耦合的区域.

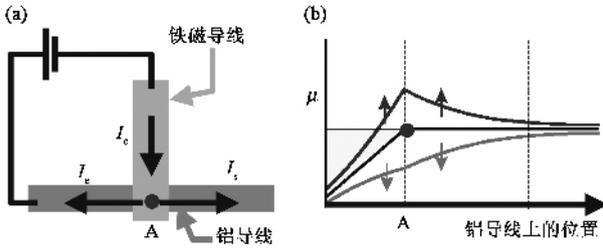


图2 (a)一根铁磁导线耦合到一根铝导线的装置示意图 (b)铝导线上自旋向上和自旋向下的电化学势分布示意图

式是：

$$H_{SO} = \frac{\hbar}{8m_e^2 c^2} \{ \hat{\sigma} \cdot [p \times \nabla V(r)] + \nabla V(r) \cdot (\hat{\sigma} \times p) \}, \quad (1)$$

其中  $m_e$  是电子质量  $c$  是光速  $\hat{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$  是泡利矩阵  $p$  是动量算符,  $V(r)$  是由电场  $E$  所引起的电势 ( $E = -\nabla V(r)$ ). 如果对一些具体的电势  $V(r)$ , 自旋轨道耦合可以简化为不同的形式. 例如, 对于中心力场 (1) 式可简化为 Thomas 自旋轨道耦合：

$$H_{SO} = \frac{1}{2m_e^2 c^2 r} \frac{d}{dr} V(r) \hat{s} \cdot \hat{I}, \quad (2)$$

其中  $r = |r|$   $\hat{I} = r \times p$ , 是角动量算符. 对于没有镜面对称的沿  $z$  方向的电势 (1) 式可简化为 Rashba 自旋轨道耦合：

$$H_{SO} = \frac{1}{2\hbar} \hat{z} \cdot \{ \alpha (\hat{\sigma} \times p) + (\hat{\sigma} \times p) \alpha \}, \quad (3)$$

$\alpha$  表示自旋轨道耦合强度. 到目前, 在实验上已能很好地控制和调节自旋轨道耦合强度<sup>[5]</sup>. 由于自旋轨道耦合的存在, 将引起很多有趣的效应, 例如引起自旋进动<sup>[13]</sup>, 诱导自旋极化流<sup>[14]</sup>, 使得能用电场或电压来实现对自旋的控制和操作等<sup>[15]</sup>. 下面着重介绍两个由自旋轨道耦合所引起的效应: 自旋霍尔效应和持续自旋流. 自旋霍尔效应是一个近几年来非常热门的子课题, 持续自旋流是一个最近由我们提出的新效应.

### 3.1 自旋霍尔效应

自旋霍尔效应是指由纵向电流所引起的横向自旋流现象. 它通常发生在二维体系, 但在一些体材料中也可以存在. 自旋霍尔效应有外在自旋霍尔效应和内在自旋霍尔效应两种. 外在自旋霍尔效应是由杂质对自旋的不对称散射所引起的. 在上世纪 70 年代, 人们已发现外在自旋霍尔效应<sup>[16]</sup>. 近期, 在 1999 年, Hirsh 又重新提出这效应<sup>[17]</sup>. 内在自旋霍尔效应

是于 2003 年由 Murakami 等人和 Sinova 等人各自独立提出的<sup>[18]</sup>, 它是体系的本征行为, 与杂质无关. 内在自旋霍尔效应提出之后, 引起人们的广泛注意和深入研究, 到目前为止, 已有大量的后续工作. 例如: 杂质、磁场等对内在自旋霍尔效应的影响, 介观体系的内在自旋霍尔效应、逆自旋霍尔效应等方面都已有一些工作<sup>[19, 20]</sup>. 另外在实验方面, 几个实验组已观测到自旋霍尔效应. Kato 等人在 GaAs 和 InGaAs 薄膜体系中用 Kerr 方法测得在横向两边的确有相反的自旋积累<sup>[21]</sup>. Wunderlich 等人在二维空穴体系中看到自旋霍尔效应<sup>[22]</sup>, 以及 Valenzuda 和 Tinkham 在扩散区的金属铝导体中观测到逆自旋霍尔效应<sup>[11]</sup>. 但对一些实验中看到的自旋霍尔效应究竟是内在的还是外在的, 仍有一些争议. 外在自旋霍尔效应已确实观测到了, 但内在自旋霍尔效应是否已被观测到还不是很确定.

### 3.2 持续自旋流

这是最近由我们预言的一个效应<sup>[23, 24]</sup>. 考虑处在平衡态的、没有任何磁场和磁性材料的、仅仅存在自旋轨道耦合的体系, 我们提出这自旋轨道耦合仍然能引起持续自旋流. 下面从物理图象上来说明这持续自旋流的存在, 然后简单介绍一下计算过程和结果.

考虑如图 3(a) 和 (b) 所示的两个普通介观小环, 在一个环的中心有一磁性原子 (如铁原子), 而在另一个环的中心是一电性原子 (如离子). 磁性原子在环上产生矢势  $A$ , 进而诱导持续电流. 从电磁相对应的角度看, 电性原子在环上将产生标势  $V$ , 进而应当能诱导持续自旋流, 即环上的势能  $V$  所引起的自旋轨道耦合应当能诱导持续自旋流.

这持续自旋流的存在也可以从另一个物理图象来分析. 让我们来比较霍尔效应、自旋霍尔效应、持续电流和持续自旋流. 考虑如图 4(a) 所示的体系, 一个二维体系加垂直磁场和纵向电压, 然后在横向将有电流, 这是大家熟知的霍尔效应. 在同样体系中, 把垂直磁场去掉, 换成自旋轨道耦合 (如图 4(b)) 这时横向的电流将变成自旋流, 这是最近发现的自旋霍尔效应. 再考虑如图 4(c) 所示的体系, 一个介观小环在垂直磁场下, 小环上将出现持续电流. 约在 20 年前, 这介观小环中的持续电流已在实验上观测到<sup>[25]</sup>. 然后在同样的小环体系中, 把垂直磁场去掉, 换成自旋轨道耦合 (如图 4(d)), 这时和上面相似, 环上的持续电流应当变成持续自旋流.

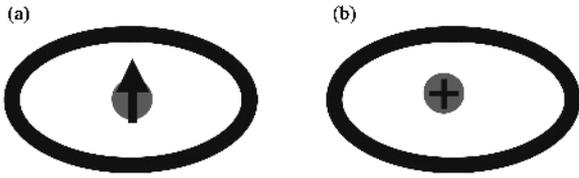


图3 (a)(b)为中心分别放置磁性原子和离子的介观小环装置示意图

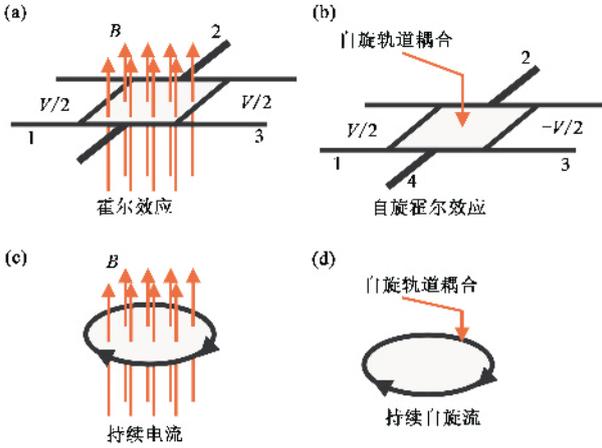


图4 (a)(b)(c)和(d)分别为霍尔效应、自旋霍尔效应、持续电流和持续自旋流的装置示意图

然后我们也进行了具体的计算<sup>[23-24]</sup>. 由于当有自旋轨道耦合存在时,对自旋流的定义还存在很大的争议,因此我们采用以下方法:考虑一个由正常部分和自旋轨道耦合部分组成的介观复合小环.在正常部分,泡利矩阵  $\sigma_i$  与哈密顿量是对易的,所以在这部分的自旋流定义是没有争议的.经过具体计算和考虑各种界面情况,结果清楚地表明,自旋轨道耦合的确能引起纯的持续自旋流.这持续自旋流是纯量子的效应,它存在于平衡态,永远无耗散地保持着.澄清持续自旋流存在之后,我们再回来研究自旋流定义(这部分内容见下面的第5节).

### 4 含有自旋轨道耦合量子点体系的二次量子化哈密顿量

对于低维受限体系(例如量子点),通常有强的电子-电子相互作用或其他二体相互作用.当哈密顿量中存在二体相互作用时,我们需要求解多体薛定谔方程,而不是单粒子薛定谔方程.如果在实空间求解这一类问题,通常非常困难.前人通常用二次量子化哈密顿量,在这基础上已经发展了各种各样的处

理多体相互作用的方法和有效的近似,例如非平衡格林函数方法.但是前面的(1)式给出的自旋轨道耦合哈密顿量是在实空间的,所以我们需要给出它的二次量子化形式.从2005年开始,我们已有这方面的工作<sup>[4]</sup>,下面介绍一下结果.考虑一个零维体系,即量子点耦合到左右铁磁导线,量子点内既有自旋轨道耦合,又有电子-电子库仑相互作用,这时二次量子化的哈密顿量是<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned}
 H = & \sum_{n,s} \varepsilon_n \hat{d}_{ns} \hat{d}_{ns} + \sum_{ns,ms'(ns \neq ms')} U_{ns,ms'} \hat{n}_{ns} \hat{n}_{ms'} \\
 & + \sum_{m,n} [t_{mn}^{SO} \hat{d}_m \downarrow \hat{d}_n \uparrow + H. C.] + \sum_{k,s,\beta} (\varepsilon_{k\beta} + sM_\beta) \hat{a}_{k\beta s} \hat{a}_{k\beta s} \\
 & + \sum_{k,\nu,\beta} [t_{k\nu\beta} (\cos \frac{\theta_\beta}{2} \hat{a}_{k\beta s} - s \sin \frac{\theta_\beta}{2} \hat{a}_{k\beta s}) \exp(-isk_\beta x_\beta) \hat{d}_{ns} + H. C.]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

其中  $\beta = L, R$ ,  $\hat{d}_{ns}$  是量子点的湮灭算符,而  $\hat{a}_{kLs}$  和  $\hat{a}_{kRs}$  是左右导线的湮灭算符.下面主要介绍由自旋轨道耦合所引起的项(其他项的介绍见文献[4]).自旋轨道耦合引起两个作用:

(1)在隧穿项上出现一相位因子  $\exp(-isk_\beta x_\beta)$ . 注意这相位与自旋指标  $s$  有关,这与磁通的相位  $\phi$  很不一样,  $\phi$  与自旋指标  $s$  无关.

(2)引起一自旋翻转跃迁项,并且跃迁矩阵元  $t_{mn}^{SO} = -t_{nm}^{SO}$ .

如果导线是正常的,或者超导的,以及存在外磁场等情况,自旋轨道耦合的二次量子化形式也能相似地给出.应用这二次量子化哈密顿量,人们也已研究了一些由自旋轨道耦合所引起的有趣现象,并发现一些新效应<sup>[15-26]</sup>.

### 5 自旋流的定义

在2003年,Rashba在研究均匀二维有Rashba自旋轨道耦合的系统时,发现如果用常规的自旋流定义,这系统在平衡态时的自旋流还是非零的<sup>[27]</sup>.对于在平衡态时存在自旋流,Rashba觉得不可理解,他认为这是非物理的结果.所以他建议应当重新定义自旋流,以使得在平衡态时,自旋流为零.从这之后,有很多后续工作讨论自旋流的定义<sup>[24,28-31]</sup>.到目前为止,人们已总结常规自旋流定义有以下三大缺点:(1)在自旋轨道耦合体系处于平衡态时,存在非零的自旋流;(2)自旋流通常是不守恒的;(3)Onsager倒易关系被破坏.然后一些新的定义自旋流方案被提出.例如施等人建议用全微分的形式定义自旋流<sup>[29]</sup>,即用  $j_s \equiv \text{Re}\{\Psi^+ [d(rs)/dt]\Psi\}$  代替常

规定义  $j_s \equiv \text{Re}\{\Psi^+ (dr/dt) \hat{s} \Psi\} = \text{Re}\{\Psi^+ \hat{v} \hat{s} \Psi\}$  其中  $j_s$  是自旋流密度. 下面着重介绍一下我们自己的观点<sup>[24, 28]</sup> (1) 我们通过深入仔细的分析, 提出存在自旋轨道耦合的体系处于平衡态时的自旋流有物理意义, 它是持续自旋流(详细讨论见本文 3.2 节); (2) 提出自旋流通常应当是不守恒的. 事实上, 在一些实验上已观测到不守恒的自旋流, 例如在 Valenzuda 和 Tinkham 的实验中<sup>[11]</sup>, 已看到自旋流从铁磁导线注入到铝导线, 然后向前流去并逐渐变小, 最后消失在远方 (3) 尽管 Onsager 关系是一个非常重要的近平衡理论, 在以往的近平衡输运中, Onsager 关系总是成立的, 但是对于自旋输运, Onsager 关系通常不成立. 特别是我们发现不管如何改变自旋流的定义, Onsager 关系永远不可能被恢复, 也就是说, 对于自旋输运, 不存在 Onsager 关系. 所以, 上面提到的常规自旋流定义三个缺点都是假象的, 并不是真正的缺点. 再者, 常规自旋流定义已有很好的物理意义, 能很好地描述自旋平移运动, 并能很好地应用到各种与自旋流有关的效应中. 所以这常规自旋流定义已很好, 不需要任何改动和重新定义.

另外, 如果考虑一类有强自旋-自旋偶极相互作用的体系<sup>[24, 30]</sup>. 在这类体系中, 由于存在强的自旋偶极作用, 当一个自旋转动(进动)时, 其他自旋会跟着反向转动去屏蔽它, 以致于总的自旋进动几乎为零. 所以在这类体系中, 用常规自旋流定义, 自旋流自动是守恒的.

再者, 由于自旋是一个矢量, 除了平移运动之外, 还有转动(进动), 所以我们还需要引入另一物理量来描述自旋进动<sup>[28]</sup>. 我们用  $j_\omega$  来描述, 它的定义为<sup>[28]</sup>

$$j_\omega \equiv \text{Re}\{\Psi^+ (ds/dt) \Psi\} = \text{Re}\{\Psi^+ \hat{\omega} \times \hat{s} \Psi\}, \quad (5)$$

其中  $\hat{\omega}$  是角速度算符, 相似于线速度  $v$  和角速度  $\omega$ , 常规  $j_s \equiv \text{Re}\{\Psi^+ \hat{v} \hat{s} \Psi\}$  也被命名为线自旋流, 而  $j_\omega = \text{Re}\{\Psi^+ \hat{\omega} \times \hat{s} \Psi\}$  被命名为角自旋流, 然后自旋连续性方程为  $ds/dt = -\nabla \cdot j_s + j_\omega$ .

## 6 与自旋流有关的几个基本现象

最后, 介绍几个与自旋流有关的很基本的现象, 包括自旋流产生电场, 外电场对自旋流的作用, 和自旋流的焦耳热.

### 6.1 自旋流产生电场

约在 200 年前, 人们已发现电流能产生磁场, 即毕奥-萨伐尔定律和安培环路定理. 相对应地, 一个稳恒的自旋流能产生电场, 即在一个体系中, 即使电流为零, 电荷为零, 自旋积累也处处为零, 仅仅存在一个稳恒的自旋流, 这自旋流还能在它周围的空间产生电场<sup>[28, 32, 33]</sup>. 线自旋流和角自旋流产生的电场公式分别是<sup>[28, 32]</sup>:

$$E_s = -\frac{\mu_0 g \mu_B}{4\pi} \nabla \times \int j_s dV \cdot \frac{\mathbf{r}}{r^3},$$

$$E_\omega = -\frac{\mu_0 g \mu_B}{4\pi} \int j_\omega dV \times \frac{\mathbf{r}}{r^3}, \quad (6)$$

其中  $\mu_0$  是真空磁导率,  $\mu_B$  是玻尔磁子,  $g$  是朗德因子,  $\mathbf{r}$  为自旋流元到场点的位置矢量. 这自旋流产生的总电场  $E_T = E_s + E_\omega$  满足  $\oint E_T \cdot d\mathbf{l} = 0$ , 即  $E_T$  是有源无旋场, 具有类似于静电场的性质.

### 6.2 外电场对自旋流的作用

由于自旋流能产生电场, 它的逆现象是外电场对自旋流有力和力矩的作用, 这是作用与反作用的关系. 最近, 这方面已有一些工作<sup>[32, 34]</sup>. 有人已从 Dirac 方程出发, 推导出力和力矩的公式.

### 6.3 自旋流的焦耳热

除了在一些特殊情况下自旋流是无耗散的之外, 在通常情况下和在扩散区时, 输运自旋流是有耗散的, 会产生热量. 最近, 有少数人也涉及到这一课题<sup>[28, 29]</sup>. 如果考虑无自旋翻转情况, 即角自旋流  $j_\omega$  为零时, 自旋流产生的热量是:  $Q = \rho(j_s^2 + j_e^2)$ , 其中  $\rho j_e^2$  是电流  $j_e$  产生的焦耳热,  $\rho \sum_{ij} j_{sij}^2$  是自旋流产生的焦耳热<sup>[28]</sup>.

## 7 结束语

自旋电子学是一个新兴的开放的学科. 近几年来, 人们已对这学科中的自旋流和自旋轨道耦合开展了大量的研究, 并揭示了一些有趣的效应和基本规律, 例如, 自旋轨道耦合引起的自旋霍尔效应和持续自旋流, 以及自旋流能产生电场和外电场对自旋流有力的作用等, 也解决了一些问题, 例如自旋流的产生等. 但是这领域仍然还是一个开放的领域, 很多问题有待于我们解决和深入研究, 例如自旋流的探测仍然是很困难的, 远远没有像测电流那么容易, 这还需要解决; 内在自旋霍尔效应和持续自旋流还有

待于实验的证实. 所以说自旋电子学仍然处于青年时代, 将来会有更多的发展.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Wolf S A *et al.* Science 2001 294 :1488  
 [ 2 ] Prinz G A. Science ,1998 282 :1660  
 [ 3 ] Zutic I , Fabian J , Das Sarma S. Rev. Mod. Phys. ,2004 , 76 :323  
 [ 4 ] Sun Q F , Wang J , Guo H. Phys. Rev. B ,2005 ,71 :165310  
 [ 5 ] Nitta J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1997 ,78 :1335 ; Heida J P *et al.* Phys. Rev. B , 1998 , 57 :11911 ; Grundler D. Phys. Rev. Lett. ,2000 ,84 :6074  
 [ 6 ] Bhat R D R , Sipe J E. Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85 :5432  
 [ 7 ] Hubner J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,90 :216601 ; Stevens M J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,90 :136603  
 [ 8 ] Wang B G , Wang J , Guo H. Phys. Rev. B , 2003 , 67 :092408  
 [ 9 ] Sun Q F , Guo H , Wang J. Phys. Rev. Lett. , 2003 , 90 :258301  
 [ 10 ] Sharma P , Brouwer P W. Phys. Rev. Lett. , 2003 , 91 :166081 ; Mucciolo E R , Chamon C , Marcus C M. Phys. Rev. Lett. ,2002 ,89 :146802  
 [ 11 ] Valenzuela S O , Tinkham M. Nature ,2006 ,442 :176  
 [ 12 ] Shao L B , Xing D Y. Phys. Rev. B ,2004 ,70 201205(R)  
 [ 13 ] Datta S , Das B. Appl. Phys. Lett. ,1990 ,56 :665  
 [ 14 ] Sun Q F , Xie X C. Phys. Rev. B ,2005 ,71 :155321  
 [ 15 ] Sun Q F , Xie X C. Phys. Rev. B ,2006 ,73 235301  
 [ 16 ] Dyakonov M I , Perel V I. Phys. Lett. A ,1971 ,35 :459  
 [ 17 ] Hirsh J E. Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 :1834  
 [ 18 ] Murakami S , Nagaosa N , Zhang S C. Science , 2003 , 301 :1348 ; J. Sinova J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2004 ,92 :126603  
 [ 19 ] Yao Y , Fang Z. Phys. Rev. Lett. ,2005 ,95 :156601 ; Jiang Z F *et al.* Phys. Rev. B ,2005 ,72 :045201 ; Kou S P , Qi X L , Weng Z Y. Phys. Rev. B ,2005 ,72 :165114 ; Wu M W , Zhou J , Phys. Rev. B ,2005 ,72 :115333 ; Sheng L , Sheng D N , Ting C S. Phys. Rev. Lett. ,2005 ,94 :016602  
 [ 20 ] Yao J , Yang Z Q. Phys. Rev. B ,2006 ,73 :033314 ; Wang J , Chan K S , Xing D Y. Phys. Rev. B ,2006 ,73 :033316 ; Dai X *et al.* , Phys. Rev. Lett. ,2006 ,96 :086802 ; Xing Y , Sun Q F , Wang J. Phys. Rev. B ,2006 ,73 :205339  
 [ 21 ] Kato Y K *et al.* Science ,2004 306 :1910  
 [ 22 ] Wunderlich J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 94 :047204  
 [ 23 ] Sun Q F , Xie X C. Wang J. Phys. Rev. Lett. ,2007 ,98 :196801  
 [ 24 ] Sun Q F , Xie X C. Wang J. Phys. Rev. B , 2008 , 77 :035327  
 [ 25 ] Levy L P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1990 ,64 :2074 ; Chandrasekhar V *et al.* , Phys. Rev. Lett. ,1991 ,67 :3578  
 [ 26 ] Lu H F , Guo Y. Phys. Rev. B ,2007 ,76 :045120 ; Appl. Phys. Lett. ,2007 ,91 :092128  
 [ 27 ] Rashba E I. Phys. Rev. B ,2003 ,68 :241315(R)  
 [ 28 ] Sun Q F , Xie X C. Phys. Rev. B ,2005 ,72 :245305  
 [ 29 ] Shi J *et al.* , Phys. Rev. Lett. ,2006 ,96 :076604  
 [ 30 ] Wang J *et al.* Phys. Rev. B ,2006 ,74 :155307  
 [ 31 ] Wang Y *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2006 ,96 :066601 ; Jin P Q , Li Y Q , Zhang F C. J. Phys. A : Math. Gen. ,2006 ,39 :7115  
 [ 32 ] Sun Q F , Guo H , Wang J. Phys. Rev. B ,2004 ,69 :054409  
 [ 33 ] Schutz F , Kollar M , Kopietz P. Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91 :017205  
 [ 34 ] Shen S Q. Phys. Rev. Lett. ,2005 ,95 :187203

独家代理销售加拿大 GENTEC-EO 生产的激光功率能量计及光束分析仪,其产品具有功率、能量探测头规格全,宽光谱响应,探头损伤阈值高、灵敏度高,SOLO 显示器自动识别每个探头,带有自动校准功能,光束分析仪定量、定性分析激光束等特点.



独家代理销售美国 STELLARNET 生产的微型光纤光谱仪,其产品具有多种型号规格可选,坚固耐用、轻巧便携,波长范围覆盖 190—2200nm,适合于实验室、现场及野外的光谱测量.



联系人: 栗曼珊 sumanshan@goldway.com.cn 联系电话: D10-84562860 84562550 传真: D10-84569901



北京欧普特科技有限公司 <http://www.goldway.com.cn>  
 北京朝阳区酒仙桥东路一号 M7 栋东五层 100016