

# 自旋轨道耦合引起的电偶极矩

王永<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘要** 文章介绍了由于自旋轨道耦合导致的电子的电偶极矩在自旋电子学理论中的基本意义. 研究发现, 该电偶极矩与自旋流张量的反对称部分直接相关. 它不仅直接导致可观测的电磁学效应, 而且与电子在电场受到的力以及力矩有关, 从而为自旋的电子学操控提供了可能.

**关键词** 自旋电子学, 自旋轨道耦合, 电偶极矩

## Electric polarization due to spin-orbit coupling

WANG Yong<sup>†</sup>

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The electric dipole of the electron due to spin-orbit coupling plays an essential role in spintronics theory. We have found that this dipole is directly related to the antisymmetric components of the spin current tensor. It not only induces the observable electromagnetic effects directly but also is related to the force and torque that the electron feels in the electric field, which provides the possibility to manipulate the spin by electrical means.

**Keywords** spintronics, spin-orbit coupling, electrical polarization

自 1990 年 Datta 和 Das 研究自旋二极管以来, 自旋电子学逐步成为当今凝聚态物理中的一个重要研究领域, 并得到迅速发展<sup>[1,2]</sup>. 众所周知, 电子除具有带电荷的属性之外, 它还具有内禀自旋. 传统的电子学器件正是利用电子的带电属性和电磁作用的物理规律来实现其功能, 而它的自旋自由度并未被完全地利用. 鉴于自旋运动中的低能耗和量子化等特征, 利用电子的自旋自由度来实现新一代更高性能的电子器件是自旋电子学在 21 世纪凝聚态物理中的新课题. 自旋电子学中当前所关心的核心问题是利用系统材料与自旋相关的物理机制, 实现对非磁材料自旋注入和对自旋的操控, 探测单个自旋、自旋相干性和自旋的弛豫等. 目前, 人们普遍利用磁性材料实现自旋注入与检测; 光学方法也有一定的应用. 但基于电学方法的易于控制和实现以及现已发展相当成熟的半导体技术, 如何用电学方法在半导体材料中有效地控制电子自旋, 引起了人们的极大关注<sup>[3-9]</sup>.

使用电场控制电子自旋的最直接办法是利用电子与电场的自旋轨道耦合相互作用<sup>[10]</sup>. 当电子在电

场中运动时, 按照相对论变换, 在电子的坐标系中将产生一个有效的磁场. 这个有效磁场作用于电子的内禀磁矩, 此即自旋轨道耦合相互作用. 从电场的坐标系看来, 运动着的电子磁矩在相对论变换下将导致电偶极矩<sup>[11]</sup>, 该电偶极矩与电场的相互作用即是自旋轨道耦合相互作用. 由于 Thomas 进动<sup>[12]</sup>, 作用强度的精确值是上面分析得到的值的一半.

理论上预言, 在有自旋轨道耦合相互作用的顺磁金属和半导体材料中, 将存在有自旋霍尔效应<sup>[3-6]</sup>. 随后有相关的实验结果见诸报道<sup>[7-9]</sup>. 但理论上仍有不少亟待解决的基本问题, 诸如自旋流定义, 自旋流的直接探测等等. 为了回答这些问题, 我们从相对论性的包含 Dirac 和 Maxwell 场的作用量出发, 基于 Noether 定理和非相对论近似方法, 研究了展开至自旋轨道耦合量级的守恒流, 得到了若干由自旋轨道相互作用派生出的结论. 本文的内容基于我们先前的这项研究工作<sup>[13]</sup>.

通过对相对论电荷守恒流作非相对论近似, 我

2006-05-09 收到

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

们严格导出了非相对论性的电荷密度  $\rho^c$  和电流密度  $J^c$  :

$$\rho^c = \rho_0^c - \nabla \cdot \mathbf{P} \quad (1)$$

和

$$\mathbf{J}^c = \mathbf{J}_0^c + c\nabla \times \mathbf{m} + \partial \mathbf{P} / \partial t. \quad (2)$$

结果发现,除通常的电荷密度  $\rho_0^c$  之外,自旋轨道相互作用诱导出与运动的磁偶极矩相关的电偶极矩  $\mathbf{P}$ ,其散度对电荷密度贡献有极化电荷密度  $-\nabla \cdot \mathbf{P}$ ;相应的电流密度  $\mathbf{J}^c$  中也出现了与电偶极矩相应的位移电流  $\partial \mathbf{P} / \partial t$ . 类比于介质中的电动力学,我们引入电子的电位移矢量的概念,定义为  $\mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{P}$ ,其中  $\mathbf{E}$  为电场强度. 同时定义磁场强度  $\mathbf{H} = \mathbf{B} - \mathbf{M}$ . 则 Maxwell 方程组可以改写为我们所熟知的形式:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_0^c, \quad \nabla \times \mathbf{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{1}{c} \mathbf{J}_0^c, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

自旋轨道耦合作用对电荷密度与电流密度的修正,反映在 Maxwell 方程组中,将导致直接可观测的电磁学效应. 令人感到不可思议的是,在真空中的单个电子为何表现出类似于电极化的性质? 事实上,根据 Dirac 的理论<sup>[14]</sup>,真空实际上是被负能态电子所填满的“费米海”. 在真空中运动的电子,其实与费米海中的负能电子有着相互作用. 对于在电场中运动的低能电子而言,自旋轨道耦合作用很好地描述了这个相互作用的主要部分. 因此,正是费米海中这些负能电子的存在,导致了这个正能电子态的电极化.

物理上这一结果告诉我们,考虑自旋轨道耦合效应后会导致怎样的电磁学效应. 因为在电子器件中测量手段根本上使用的是电磁基本相互作用,这样的结果就为如何观测自旋流提供了理论基础.

在写出非相对论性动量流与角动量流的具体表达式时,我们能够自洽地导出电子在电磁场中所受到的力与力矩. 其中影响电子动量变化的力为

$$\mathbf{F} = \rho_0^c \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{J}_0^c \times \mathbf{B} + (\nabla \mathbf{B}) \cdot \mathbf{m} + (\nabla \mathbf{E}) \cdot \mathbf{P}. \quad (4)$$

可以看到,除了我们所熟知的洛伦兹力,电子还受到不均匀电场作用到电偶极矩上的力和不均匀磁场作用到电子的内禀磁矩上的力. 其中不均匀磁场作用在电子内禀磁矩的力称为 Stern-Gerlach 力,并成为早期验证自旋的重要实验之一,而电子的电偶极矩在非均匀电场受到的力尚未得到应有的重视与系统的研究.

同样地,改变电子总角动量的力矩可表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{X} \times \mathbf{F} + \mathbf{m} \times \mathbf{B} + \mathbf{P} \times \mathbf{E}, \quad (5)$$

式中除了与经典图像中对应的力矩,公式中还出现了电偶极矩在电场中的力矩,以及内禀磁矩在磁场中的力矩. 这些结果不仅与开始的结论吻合,而且也作为电场操控电子自旋提供了理论依据.

另外,在分析先前人们采用的自旋流定义时,我们发现其中与自旋轨道耦合相关的项可看成是与达尔文项在电偶极矩中的贡献. 为使理论自洽,我们建议自旋流算子定义为

$$\mathbf{J}^s = \frac{\hbar}{4m} \left\{ \left( \mathbf{P} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right) \boldsymbol{\sigma} \right\}, \quad (6)$$

这里  $\mathbf{P} = -i\hbar \nabla$  是动量算子. 而且这样定义的自旋流张量的反对称部分与电偶极矩直接相关,从而可以通过对电偶极矩的探测实现自旋流的探测.

在这项工作中,我们指出了电子的电偶极矩在自旋输运中特别是在与自旋轨道耦合相关的问题中的重要意义,对其中的若干基本问题作出了回答. 当然,仍然有不少问题需要探讨,比如实验中电偶极矩的强度是否足够大到可以被观测,自旋流是否能够实现自旋积累等等,这些都有待于进一步的工作.

致谢 感谢夏钊研究员和马中水教授在本文的写作中给予的支持与帮助.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A *et al.* Science, 2001, 294 :1488
- [ 2 ] Zutic I, Fabian J, Das Sarma S. Rev. Mod. Phys., 2004, 76 :323
- [ 3 ] Dyakonov M I, Perel V I. Phys. Lett. A, 1971, 35 :459
- [ 4 ] Hirsch J. Phys. Rev. Lett., 1999, 83 :1834
- [ 5 ] Murakami S, Nagaosa N, Zhang S C. Science, 2003, 301 :1348
- [ 6 ] Sinova J, Culcer D, Niu Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92 :126603
- [ 7 ] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C *et al.* Science, 2004, 306 :1910
- [ 8 ] Wunderlich J, Kaestner B, Sinova J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94 :047204
- [ 9 ] Sih V, Myers R C, Kato Y K *et al.* Nature Phys., 2005, 1 :31
- [ 10 ] Winkler R. Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems. Berlin :Springer, 2003
- [ 11 ] Frenkel J. Z. Phys., 1926, 37 :243
- [ 12 ] Thomas L H. Nature (London), 1926, 117 :514
- [ 13 ] Wang Y, Xia K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006, 96 :066601
- [ 14 ] Dirac P A M. The Principles of Quantum Mechanics (4th Edition). Oxford :Clarendon Press, 1958