**摘 要**

本文首先介绍了自旋霍耳效应的研究背景,随后着重提到并分析了Murakami等人关于“本征自旋霍耳效应”的工作。…………（中文摘要一般不超过250-300字）

**关键词**： 自旋霍耳效应,电子自旋,自旋霍耳流

**ABSTRACT**

This dissertation first introduce the research background of spin Hall effect, and then especially make mention of the work of Murakami et al. ………（外文摘要一般不超过250实词）。

**Key Words：** spin Hall effect, spin of electron, spin Hall current

**目 录**

1.自旋霍耳效应的研究背景………………………………………………………………1

2.Murakami等人的工作及其问题所在……………………………………………………2

2.1 Murakami等人的工作………………………………………………………………2

2.2 Murakami等人的工作存在的问题…………………………………………………4

2.2.1 存在的第1个问题…………………………………………………………4

2.2.2 存在的第2个问题…………………………………………………………5

2.2.3 存在的第3个问题…………………………………………………………6

2.2.4 存在的第4个问题…………………………………………………………6

3.交变电场下弱杂质散射情形的自旋霍耳效应…………………………………………7

3.1 电场对波矢的影响…………………………………………………………………7

3.2 交变电场对自旋的影响……………………………………………………………9

3.3 求解 ………………………………………………………………………………11

3.4 结果正确性的分析 ………………………………………………………………12

3.5 交变电场下的自旋流 ……………………………………………………………13

4.总结 ……………………………………………………………………………………14

注释 ………………………………………………………………………………………15

参考文献 …………………………………………………………………………………16

附录 ………………………………………………………………………………………17

致谢 ………………………………………………………………………………………18

**1.自旋霍耳效应的研究背景**

1999年,加利福尼亚大学的Hirsch提出,当纵向、无自旋极化的电流通过无磁性的金属薄板时,由于运动电子强的自旋轨道耦合作用,薄板的横向会产生自旋的不均匀分布,即板的两边会有非平衡的自旋积累[1]。文章称此效应为自旋霍耳效应。从理论上分析,自旋霍耳效应源于自旋－轨道耦合导致的运动的导电电子左右不对称的散射(字面上也可以理解为“歪斜的散射”)。在理论研究的早期,人们把这种源于对向上向下自旋的不对称散射的自旋霍耳效应称为非本征自旋霍耳效应。

自旋霍耳效应可以简单地从自旋轨道散射来理解。考虑一“束”非极化的电子被无自旋的杂质散射,势能为



（1.1）

其中和分别为电子的自旋和轨道角动量。项是常见的自旋轨道散射势能[2]。易知式（1.1）第二项对于向上和向下两种自旋是大小相等而符号相反的,由于能量越低越稳定,这样在散射的作用下电子束就被分开、被极化了——此机制就是自旋霍耳效应的来源,具体陈述在下面。

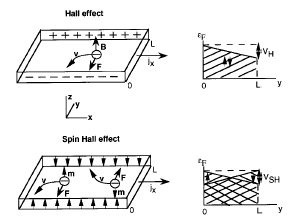


图1.1 自旋霍耳效应示意图

在自旋霍耳效应中只有薄板两边的积累,却没有宏观电荷的积累。这是与通常的霍耳效应不同的。通常的霍耳效应是导电电子受到外磁场的洛伦兹力而产生的电荷横向的不平衡,结果是样品两边都有电荷积累,但没有自旋的不平衡。在通常的霍耳效应中,电子在样品两边缘的费米能级是不同的,由于能量越低越稳定而产生横向电荷的不平衡,两端的费米能级之差就是霍耳电压,这个电压可以用电压表来测量，如表1.1所示；但自旋向上和自旋向下的费米能级却是一样的,因而没有区分开来。而在自旋霍耳效应中,由于式（1.1）中的第二项对于向上和向下两种自旋是大小相等而符号相反的,所以向上向下两种自旋在两边的费米能级都各自是不同的,在样品两边分别发生自旋的不平衡，如图1.1所示。类似地,我们可以把他们各自两边的费米能级之差定义为“自旋霍耳电压”,——实际上,这两个电压显然是大小相等而方向相反的——不过这个“电压”不能直接用通常的电压表来测量；又因为自旋向上的自旋流和自旋向下的自旋流的对称性,他们相互抵消了“电荷流”而宏观不会出现电荷的积累。既然自旋霍耳电压不能直接测量,我们有没有其他的,比如说,间接的方法呢？Hirsch在文章中提出了一个办法：可以用一个横向金属带把样品两端联起来,由于向上与向下两种自旋各自在样品两边的费米能级存在差异,一个纵向的自旋流会在横向的金属带中产生;若在横向的金属带中同样的歪斜散射机制也起作用,这个带中的纵向自旋流会产生一个横向电荷不均衡,这样在带的两边就产生了通常的霍耳电压（见图1.2）,这个电压就可以用电压表来直接测了。综上所述,原则上我们可以通过测量横向金属带两边的通常的霍耳电压来测量纵向样品两边的自旋霍耳电压,如果和的关系已知的话——而实际上这个关系在Hirsch提出自旋霍耳效应的文章中已经给出来了。

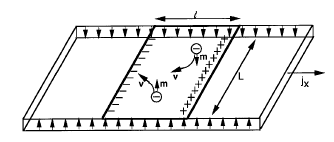


图1.2 自旋霍耳效应的实验测量

近来,东京大学Murakami及其国际上的合作者预言在一大类掺杂空穴（如P型）半导体（Si,Ge和GaAs等）中会出现一种新的自旋霍耳效应,称为“本征霍耳效应”,并很快有加利福尼亚大学的Kato等人作了相关的实验。这个工作我们将在第二部分着重介绍。

表1.1 实验测量数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

**2.Murakami等人的工作及其问题所在**

**2.1 Murakami等人的工作**

Murakami等人新的理论预言——在一大类掺杂空穴半导体中会出现的本征霍耳效应——是一种源于能带结构而不是散射的自旋霍耳效应,因而与非本征自旋霍耳效应不同：当给这样的半导体加上直流电场时,在垂直电场方向会出现量子非耗散自旋流,更加有趣的是,自旋霍耳流具有良好的拓扑性质,且在数学物理上都表现出量子霍耳边缘电流的一些基本性质[3,4]。例如,自旋霍耳电导率将是与杂质散射无关的拓扑非耗散传输系数（即在杂质散射下保持不变）,甚至在室温下也不会有显著下降[5-8]。假如此效应真的存在,将为在室温下不用铁磁金属而用无磁性半导体获得自旋的有效注入提供有效途径,这是半导体自旋电子学中一个长久没有得到解决的挑战。很快,Kato等人在N型GaAs样品中实际观测到了量子霍耳效应,但实验结果却有力支持观测到的量子霍耳效应应是非本征的而不是本征的——非本征量子霍耳效应是由杂质与自旋－轨道有关的各向异性散射引起…………

**2.1.1**

…………

**注 释**

（论文中若无注释部分可以不写。注释部分放置于正文当页下（脚注），注释序号用，，……标识，每页单独排序。）

**参考文献**

[1] J. E. HIRSCH. Spin Halleffect[J]. Phys. Rev. Lett, 1999,83: 1834-1837.

[2] M. L. GOLDBERGER And K.M. WATSON, Collision Theory[M].New York:Wiley, 1964.

[3] S.MURAKAMI,N.NAGAOSA,and S.-C.ZHANG. SU(2) non-Abelian holonomy and dissipationless spin current in semiconductors[J]. Phys. Rev. B, 2004, 69: 235206-235219.

[4] S.MURAKAMI,Absence of vertex correction for the spin Hall effect in p-type semiconductors[J].Phys. Rev. B, 2004, 69: 241202-241205.

[5] S.MURAKAMI,N.NAGAOSA,and S.-C.ZHANG. Spin-Hallinsulator[J]. Phys. Rev. Lett,2004, 93: 156804-156807.

[6] S. A. WOLF, D. D. AWSCHALOM, R. A. BUHRMAN, etc. Spintronics: aspin-based electronics vision for the future[J], Science, 2001,294:1488-1495.

[7] G. SCHMIDT, D. FERRAND, L. W. MOLENKAMP, A. T. FILIP, and B. J. VAN WEES. Fundamental obstacle for electrical spin injection from a ferromagnetic metal into a diffusivesemiconductor[J]. Phys. Rev,2000, B62:4790-4793.

[8]Y. K. KATO, R. C. MYERS, A. C. GOSSARD, etc. Observation of the spin Hall effect in semiconductors[J]. Science, 2004, 306: 1910-1913.

[9]N. W. Aschcroft and N. D. Mermin, Solid State Physics [M].Thomson Learning Inc, 1976.

[10]N. W. Aschcroft and N. D. Mermin, Solid State Physics [M].Thomson Learning Inc, 1976.

[11]蒋挺，赵成林.紫蜂技术及其应用[M].北京：北京邮电大学出版社，2006.

[12]蒋健文.智能型CAN总线测控节点的研究[[J].仪器仪表学报，2001, 22(3): 282-283.

**附 录**

**附录a**

1.硬件电路部分

**…………………（**如无附录部分可以不写）。

**致 谢**

本论文讨论的问题比较前沿,也比较重要。作为一个本科生,可以直接与国际知名的学者就前沿的问题进行“对话”,没有\*\*\*老师的指导是不可能的.\*\*\*老师在我做毕业论文期间给予了全面、细致、耐心的指导和善意的督促,使论文可以如期地完成。与此同时,也让我感受和学习了真正的“研究”到底是怎样一回事。…………

\*\*\*

二○二三年四月三十日