


量子力学朝花夕拾

(第二辑)

柯善哲 鞠国兴 王均义 马雷 主编

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书是由全国高校量子力学研究会组织编写的,执笔者都是国内高校多年从事量子力学研究和教学的专家学者.内容涉及量子力学的重要经典问题,如波函数、变换理论、微扰论和变分法、三体问题、奇异原子的相对论效应和磁共振问题等,也有一些有趣的新进展,如量子相变与量子纠缠与量子纠缠、量子博弈、自旋调控、共振超流、变质量量子系统和非对易量子力学等,还有一些关于量子力学教学的讨论和心得体会.

本书可供大学物理系本科学生,研究生,高校量子力学教师及量子力学研究人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

量子力学朝花夕拾.第2辑/柯善哲等主编.—北京:科学出版社,2007
ISBN 978-7-03-019753-5

I. 量… II. 柯… III. 量子力学-教学研究 IV. 0413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 131617 号

责任编辑:胡 凯 / 责任校对:鲁 素

责任印制:赵德静 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—3 000 字数: 281 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(明辉))

半导体纳米结构中的自旋动力学及自旋调控

吴明卫[†]

合肥微尺度物质科学国家实验室(筹)与中国科学技术大学物理系, 合肥, 230026

摘要: 本文综述了我们在半导体纳米结构系统中, 基于动力学自旋 Bloch 方程, 对自旋进动和自旋扩散/输运中的自旋弛豫/退相干方面的理论研究.

1. 引言

在过去的三十年里, 半导体中的自旋电子动力学受到了广泛的关注^[1,2]. 尤其是近来在实验上发现 n 型闪锌矿结构(如 GaAs)的半导体中可以实现很长的自旋寿命(长达几百纳秒). 随后, 人们又在各种低维系统中做出了大量的进一步研究^[6]. 在自旋扩散/输运方面的实验研究中, 研究者获得了相当长的自旋注入深度^[7]. 这些研究表明: 用自旋自由度代替电荷自由度, 或者把两种自由度结合起来以实现自旋器件(如量子位和自旋晶体管)的前景是相当可观的. 而对自旋进动和自旋扩散/输运中的自旋弛豫/退相干(spin R/D)过程的深刻理解是实现这方面应用的关键所在.

在 n 型闪锌矿结构的半导体中, spin R/D 的主要机制是 D'yakonov-Perel' (DP)^[8] 机制. 目前, 理论上对各种系统中^[1,9]自旋弛豫时间的研究多基于单体公式^[11]

$$\frac{1}{\tau} = \int_0^{\infty} dE_k (f_{k\uparrow} - f_{k\downarrow}) \tau_p(k) \overline{h^2(\mathbf{k})} / 2 \int_0^{\infty} dE_k (f_{k\uparrow} - f_{k\downarrow}) \quad (1)$$

这里 $\tau_p(k)$ 表示由电子-声子散射与电子-杂质散射导致的动量弛豫的弛豫时间. $f_{k\sigma}$ 是自旋为 σ 的电子的分布函数. $\mathbf{h}(\mathbf{k})$ 为提供有效磁场的 DP 项, 该项包括由晶格的空间反演对称破缺(BIA)引起的 Dresselhaus 项^[10]和由系统结构的空间反演对称破缺(SIA)引起的 Rashba 项^[11]. $\overline{h^2(\mathbf{k})}$ 表示 $h^2(\mathbf{k})$ 对 \mathbf{k} 的所有方向的平均值. 在 GaAs 量子阱(QW)中, Dresselhaus 项起主要作用, 所以 $\mathbf{h}(\mathbf{k})$ 取形式如下:

$$h_x(\mathbf{k}) = \gamma k_x (k_y^2 - \langle k_z^2 \rangle), h_y(\mathbf{k}) = \gamma k_y (\langle k_z^2 \rangle - k_x^2), h_z(\mathbf{k}) = 0 \quad (2)$$

[†] Email: mwwu@ustc.edu.cn

其中 $\langle k_z^2 \rangle$ 表示算符 $(\partial/\partial z)^2$ 在最低子带电子态中的平均值. γ 为 Dresselhaus 自旋-轨道耦合参数^[1,12]. 但是在 InAs 中, 起主要作用的是 Rashba 项, 因此 $\mathbf{h}(\mathbf{k})$ 形式变成: $h_x(\mathbf{k}) = \alpha k_y$, $h_y(\mathbf{k}) = -\alpha k_x$ 和 $h_z(\mathbf{k}) = 0$, 其中 Rashba 系数 α 正比于沿晶体生长方向的界面电场 E_z : $\alpha = \alpha_0 E_z$. 这里 α_0 反比于带隙宽度和电子的有效质量^[13]. 表达式(1)只有在满足条件 $|\mathbf{h}| \tau_p \gg 1$, 即系统处于强散射极限, 同时要求散射为弹性散射的时候才成立. 可是对于远离平衡的系统, 比如当系统有很大的自旋极化并(或)有很强的平面内电场的时候, 这种方法就不再适用. 另外, 需要说明的是: 由于对动量弛豫没有直接贡献, 库仑散射长期以来被广泛的认为对自旋弛豫没有影响.

最近, Wu 等人利用其建立的完全的微观动力学自旋 Bloch 方程(KSBE)方法^[14]证实, 用单体方法描述 spin R/D 无论是就时域^[14-18]还是就空域^[19-22]来说都是不合适的. 实际上, 无论是有效磁场(DP 项)对动量的依赖性, 还是沿空间梯度^[19]方向的自旋扩散速率对动量的依赖性, 甚至包括随机的自旋-轨道耦合(SOC)^[23]都会导致非均匀扩展^[15,16,24]. 而正是由于非均匀扩展的出现, 使得包括载流子之间的库仑散射在内的所有散射都会导致不可逆的 spin R/D^[15,16]. 然而, 散射除了提供 spin R/D 通道外, 也对非均匀扩展有反作用: 散射促使载流子趋于更具有各向同性的状态从而抑制了非均匀扩展. 需要强调的是, 这种基于微观动力学自旋 Bloch 方程的方法, 无论散射的强弱都是有效的, 并且对于远离平衡态的情况也同样适用.

在这篇文章里, 我们回顾了不同条件下, 在多种纳米结构中使用 KSBE 方法的讨论. 文章结构为: 在第二节里, 建立 KSBE 方程; 第三节, 综述时域 spin R/D 的结果; 第四节, 综述自旋输运/扩散下的 spin R/D; 第五节, 简介单体及介观领域自旋动力学及自旋调控的工作; 第六节, 总结.

2. 模型和 KSBE 方程

我们研究 n 型闪锌矿结构的半导体量子阱, 取晶体生长方向为 z 方向. 假设阱宽足够小, 以至于只需考虑最低子带. 有时也加上合适强度的沿 x 方向磁场 \mathbf{B} (处在 Voigt 位型下).

在广义 Kadanoff-Baym Ansatz^[25]假设下, 采用非平衡格林函数方法的梯度展开, 我们可以建立 KSBE 方程:

$$\dot{\rho}_k(\mathbf{r}, t) = \dot{\rho}_k(\mathbf{r}, t)|_{dr} + \dot{\rho}_k(\mathbf{r}, t)|_{dif} + \dot{\rho}_k(\mathbf{r}, t)|_{coh} + \dot{\rho}_k(\mathbf{r}, t)|_{scat} \quad (3)$$

这里 $\rho_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} f_{\mathbf{k}\uparrow} & \rho_{\mathbf{k}\uparrow\downarrow} \\ \rho_{\mathbf{k}\downarrow\uparrow} & f_{\mathbf{k}\downarrow} \end{pmatrix}$ 是时刻为 t 、位置为 $\mathbf{r} = (x, y)$ 、动量为 \mathbf{k} 的电子的密度矩阵. 非对角元 $\rho_{\mathbf{k}\uparrow\downarrow} = \rho_{\mathbf{k}\downarrow\uparrow}^*$ 代表自旋向上态与自旋向下态之间的关联. $\dot{\rho}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t)|_{\text{dr}} = \{\nabla_{\mathbf{r}} \bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t), \nabla_{\mathbf{k}} \rho_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t)\}/2$ 是由外电场引起的驱动项. 其中 $\bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}^2 / (2m^*) + [g\mu_{\text{B}}\mathbf{B} + \mathbf{h}(\mathbf{k})] \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\sigma\sigma'}/2 - e\psi(\mathbf{r}) + \varepsilon_{\text{HF}}(\mathbf{r}, t)$, 最后一项为 $\varepsilon_{\text{HF}}(\mathbf{r}, t) = -\sum_q V_q \rho_{\mathbf{k}-q}(\mathbf{r}, t)$, 即 Hartree-Fock 项(HF). m^* 为有效质量. $\psi(\mathbf{r})$ 由 Poisson 方程确定. 花括号表反对易关系 $\{A, B\} = AB + BA$. $\dot{\rho}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t)|_{\text{dif}} = -\{\nabla_{\mathbf{k}} \bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t), \nabla_{\mathbf{r}} \rho_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t)\}/2$ 是扩散项. 而(3)式中相干项项的形式为 $\dot{\rho}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t)|_{\text{coh}} = i[[g\mu_{\text{B}}\mathbf{B} + \mathbf{h}(\mathbf{k})] \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\sigma\sigma'}/2 - e\psi(\mathbf{r}) + \varepsilon_{\text{HF}}(\mathbf{r}, t), \rho_{\mathbf{k}}]$.

散射项的形式与采用的统计的具体形式有关^[26]. 一种为共线性(collinear)统计, 即以没有 SOC 项(DP 项)时导带电子的费米分布为平衡态. 这是系统能谱为 $\varepsilon_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}^2 / (2m^*)$, 自旋本征态为 σ_z 的本征态, 也即 $\chi_{\uparrow} = (1, 0)^{\text{T}}$ 和 $\chi_{\downarrow} = (0, 1)^{\text{T}}$. 另一种为螺旋型(helix)统计, 以考虑了 SOC 的导带电子费米分布为平衡态. 能谱为 $\varepsilon_{\mathbf{k}, \xi}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}^2 / 2m^* + \xi |\mathbf{h}(\mathbf{k})|$, 分别取 $\xi = \pm 1$ 表示两自旋分支. 所以自旋本征函数为 $|\xi\rangle = [\chi_{\uparrow} + \xi \tilde{h}(\mathbf{k}) \chi_{\downarrow} / |\mathbf{h}(\mathbf{k})|] / \sqrt{2}$, 其中 $\tilde{h}(\mathbf{k}) = h_x(\mathbf{k}) + ih_y(\mathbf{k})$. 原则上, 螺旋线统计才是正确的统计, 然而, 由于在半导体中 SOC 远小于费米能, 所以 SOC 能谱可以被忽略^[26]. 这个近似大大简化了对散射的精确数值计算.

数值上解加入所有散射后的 KSBE 方程, 可以得到随时间演化的密度矩阵 $\rho_{\mathbf{k}}$, 从而可以定出 spin R/D 时间. 自旋弛豫时间 T_1 由 $\Delta N = \sum_{\mathbf{k}} (f_{\mathbf{k}\uparrow} - f_{\mathbf{k}\downarrow})$ 的包络线的斜率给出; 不可逆自旋退相干时间 T_2 与自旋关联项的非相干求和^[14] $\rho = \sum_{\mathbf{k}} |\rho_{\mathbf{k}\uparrow\downarrow}(t)|$ 相联系; 总体自旋退相干时间 T_2^* 则定义为自旋关联项的相干求和

$\rho' = \left| \sum_{\mathbf{k}} \rho_{\mathbf{k}\uparrow\downarrow}(t) \right|$ 的包络线的斜率. 类似地, 对于自旋扩散/输运, 自旋扩散深度可

以由系统在自旋处于稳态时候 ΔN 的空间演化确定^[19].

3. 自旋弛豫/退相干(spín R/D)

我们在这部分回顾一下在半导体纳米结构中我们基于 SKBE 方法得到的 spin R/D 的结果. Wu 等人最早指出: 在系统存在非均匀扩展的时候, 任何原本自旋守恒的散射(包括库仑散射)都会引起不可逆的 spin R/D^[15]. 而能量依赖的 g 因子与动量依赖的 DP 项^[15-18]都可以提供非均匀扩展. 在量子线里, 非均匀扩展可以

用 Lamor 频率的方差定量地描述, 并且可以和自旋退相干时间相对应^[27]. 当采用 Voigt 配置的磁场时, GaAs(110)量子阱中存在来自 DP 项的非均匀扩展, spin R/D 时间要比(001)量子阱中长得多, 但仍然是有限的^[28]. 对 120K 以上的温度并且考虑了所有的散射, 从多体角度对 n 型 GaAs(001)量子阱中自旋弛豫问题的细致研究, 使我们得出如下的重要结果: 对小阱宽的量子阱, 当电子密度在 10^{11} cm^{-2} 的量级时, spin R/D 时间随温度的升高而变长, 这与用单体方法得到的结果恰好相反. 这个结果与 Malinowski^[6]等人的实验结果符合得非常好. 当阱宽比较大的时候, 情况有所不同, Weng 和 Wu 引入多子带效应^[29]计算了更大阱宽的量子阱中 spin R/D, 结果表明: 在小(大)阱宽下, (2)式中的一次(三次)项起主要作用, 随温度的升高, spin R/D 时间变长(短). 这是由于随着温度的升高, 非均匀扩展和散射都得到了加强, 而这两个相互竞争的效应在一次(三次)项起主要作用时的总体表现是不同的^[29]. 把库仑散射加入到所有阶的圈图里, 就可以计算出远离平衡情况下的 spin R/D. 计算^[17]还证明了自旋极化会引起 spin R/D 的剧烈增加. 这来自于 KSBE 相干项中的最低阶库仑相互作用(HF)的贡献. 在强自旋极化下, HF 项表现为沿 z 方向的有效磁场, 该磁场抑止了自旋进动. 这一预言最近已被德国 Regensburg 大学的实验组证实^[30]. 进一步, 运用一些数值计算上的技巧^[18], 可以得到当有很强的平面内的电场把系统驱动到热电子区域时的系统 spin R/D. 当存在平面电场时, 即便没有任何磁场, 电子仍然可以在高温下发生自旋进动. 可以这样解释: 平面电场导致了动量空间的质心漂移, 这个效应引起了一个正比于电场强度^[18]的有效磁场. 关于应力对 spin R/D 影响的研究表明可以采用加应力的方式实现对 spin R/D 时间的调控^[31]. Cheng 和 Wu 后来又进一步讨论了存在相同大小的 Dresslhaus 和 Rashba 项下的 spin R/D^[26], 发现由公式(2)中的三次项可以得到有限的 spin R/D 时间. 最近, Zhou 等人^[32]把这套理论推广到低温, 找到了从数值上计算电子与 AC 声子间散射的方法. 计算中不借助任何拟合参数得到的结果在 20K 到 300K 的温度范围内与 Ohno^[6]等的实验符合得非常好. 在计算中发现: Dresslhaus 耦合参数 γ 的微扰解析表示 $\gamma = (4/3)(m^*/m_0) \left(1/\sqrt{2m^{*3}E_g} \right) \left(\eta/\sqrt{1-\eta/3} \right)$ ^[12] (其中 m_0 表示自由电子的质量, E_g 表示禁带宽度, $\eta = \Delta/(\Delta + E_g)$, Δ 为价带的 SOC. 这些量全部是已知的半导体参量)是非常准确的. 而目前文献中存在的对 γ 值的争论, 部分原因是由于对实验的拟合中没有考虑库仑散射, 从而使得 γ 值偏大^[32]. 更进一步, 当满足电子浓度不太高而杂质密度比较低的条件时, Zhou 等人在低温区预言了一个显著体现库仑散射对于 spin R/D 影响的峰^[32]. 对这一峰的实验验证, 目前正在德国 Resensburg 大学和中国的半导体所的实验组进行. 这一预言的实验验证对确认库仑散射对 spin R/D 的作用

有着重要的意义：目前国际上承认库仑散射对 spin R/D 有重要作用的，在理论上除了我们于 2000 年最早提出的以外^[15]，还有 Galzov 和 Ivchenko 于 2002 年用微扰法也指出了这一效应^[33]；在实验上，Brand 等人间接证明了库仑散射对 spin R/D 的作用^[6]。但是直接的实验验证仍然缺乏。

Lü 等人用 KSBE 研究了 GaAs(001)量子阱中的轻、重空穴系统中的 spin R/D^[34]。这时，SOC 主要由 Rashba 项引起^[35]，并且耦合很强，因此系统处于弱散射极限，故单粒子公式(1)不再适用，然而我们的 KSBE 理论依然有效。我们发现：在弱散射极限下，在系统中加入任何一种新的散射机制，比如库仑散射，都提供新的 spin R/D 通道，从而缩短 spin R/D 时间^[34]。这与强散射极限正好相反^[18,34]。最后，我们还指出^[36]，在很大的温度变化和浓度变化范围内，系统中库仑散射已经足够的强，以至于可以保证 $T_1 = T_2 = T_2^*$ 是正确的。

4. 自旋扩散/输运

在我们的理论中，通过自洽求解耦合了 Poisson 方程以后的 KSBE，不需要任何拟合参数就可以得到所有的输运特性，如迁移率、电荷扩散深度、自旋扩散/注入深度等。Weng 和 Wu^[19]最早指出，仅用以前文献中普遍采用的漂移扩散方程来描述自旋扩散/输运是不够的。实际上，在研究自旋扩散/输运过程中，考虑非对角元 $\rho_{k\uparrow\downarrow}$ ，即自旋关联，是十分重要的。这一项的存在，使电子在扩散的同时发生进动，因此扩散项中的 $\mathbf{k} \cdot \nabla_r \rho_k(\mathbf{r}, t)$ 项提供了额外的非均匀扩展。这一额外的非均匀扩展，使得包括库仑散射在内的所有散射可以引起不可逆的 spin R/D^[19]。与时域自旋进动有所不同，这里非均匀扩展由 $|\mathbf{g} \mu_B \mathbf{B} + \mathbf{h}(\mathbf{k})|/k_x$ 项决定，而不光是由 $\mathbf{h}(\mathbf{k})$ 。所以，即便 DP 项不存在，仅仅外加磁场本身也可以提供非均匀扩展^[19]。此外，我们还首次指出在高温并且没有外加磁场情况下，自旋波包在扩散的同时还会有振荡^[20]。对这一振荡，在稍后的工作中做了详细的研究^[21,22]。后来，在低温条件下，Crooker 和 Smith^[7]从实验上在体材料中观察到了这一振荡。我们还指出了在自旋扩散过程中，库仑拖拽效应十分重要、电场可以加强/抑制自旋扩散等效应^[22]。前不久，Cheng 和 Wu 发展了一套新的数值计算方法来处理自旋扩散/输运问题^[37]，该方法具有高速、高精确度的优点。研究表明：散射，尤其是库仑散射，在时域导致的 $T_2 = T_2^*$ ，在空域下也是正确的(当然， T_2 及 T_2^* 在空域由 L_2 及 L_2^* 代替)。另外，由于零磁场时 $|\mathbf{h}(\mathbf{k})|/k_x$ 决定了自旋扩散的非均匀扩展，沿 x 轴的自旋振荡周期与电场无关^[37]，从而有别于时域的自旋进动速率^[18]。这与 Beck^[7]等人的实验发现保持一致。稳态的许多自旋扩散/输运性质也都在文章里给出^[37]。

5. 其他基于单体理论的自旋动力学工作

我们在这里简述我们在单电子图像下的自旋动力学工作. 自旋电子学的一个可能的应用是用于量子计算的量子位, 因而基于量子点的自旋动力学引起了广泛的关注^[38], 在我们工作之前, 大量的工作用微扰方法研究了自旋的弛豫时间^[38]. 我们用严格对角化的方法, 重新计算了自旋弛豫时间, 发现由于在半导体量子点中自旋-轨道耦合较大, 以往用微扰得出的自旋弛豫时间和用严格对角化方法得到的自旋弛豫时间相差 6 至 7 个量级^[39]. 更有甚者, 以往文献中微扰方法出现了错误: 对能量的二级修正被忽略了, 如果将能量的高级修正正确地记入, 将导致定性结果的错误^[39]. 这些结果随后得到了 Destefani 和 Ulloa 的验证^[40]. 我们用我们严格对角化的方法, 仔细研究了在单量子点中的一个电子在各种情况下的自旋寿命^[39]. 我们也进一步研究了一个空穴在单量子点中的寿命^[41], 在这里由于同时存在轻重空穴, 因此有着非常丰富的自旋动力学行为. Wang 和 Wu 更进一步在垂直生长的双量子点中, 通过加偏压实现自旋寿命的调节^[42]. 他们发现, 用一个很小的偏压, 即可将自旋寿命调节 7~8 个量级.

我们对将强 THz 场加入有自旋-轨道耦合的半导体量子阱及量子点的介观系统也加以了研究. Cheng 和 Wu 研究了将 THz 电场平行地加入有 Rashba 自旋-轨道耦合的二维电子气, 利用 Floquet 方法^[43], 得到了含时 Schrödinger 方程的严格解^[44]. 更进一步, 他们指出了在研究自旋问题时, 自旋关联是不可忽略的. 当自旋关联被忽略时, 一些错误的理论会得出加入含时电场会导致自旋的劈裂, 进而设计出自旋阀. 而实际上, 加入含时电场由于对称性的保证, 是不会导致实验室系下自旋的分裂^[44]. 此外, 他们提出了在 x 方向加入一个 THz 电场, 会在 y 方向诱发一个 THz 磁矩^[44], 这在磁性半导体中磁共振实验有极大的意义. Jiang 等人将该理论推广到了有自旋-轨道耦合的量子点系统中, 得到了类似的结果^[45]. 在此基础上, Jiang 和 Wu 将耗散引入到有自旋-轨道耦合的含时量子点系统, 研究了 THz 场对自旋寿命的影响^[46]. 他们发现, 由于强 THz 场导致的卫星带(side band)强烈地改变了态密度, 因而自旋的寿命也被强烈地调制^[46].

利用系综 Monte Carlo 方法, Wang 和 Wu 研究了由铁磁向半导体量子阱的自旋注入问题^[47]. 他们发现由于界面处形成的 Schottky 势垒产生的电场在 Rashba 效应下导致的有效磁场的作用, 自旋注入被大大地压制了. 这揭示了自旋注入极低的一个长期被忽视的机制.

在介观尺度上, 利用 Landauer-Büttiker 方法, 我们也提出了一系列自旋阀的设计^[48-52]. 此外, Wu 和 Zhou 还研究了空穴系统的自旋霍尔效应, 指出了由轻重空穴在 Γ 点简并导致的磁单极在自旋霍尔效应中并不起什么独特的作用^[53].

6. 总结

我们总结了我们用完全的微观 KSBE 理论在 spin R/D 方面的研究, 具体包括自旋进动和自旋扩散/输运. 我们还强调了库仑散射的重要性, 并指出这种方法对处理近平衡与远平衡的情况同样有效, 对强、弱散射极限也都适用. 另外还详细的讨论了非均匀扩展对散射的影响以及散射对非均匀扩展的反作用. 我们也简要介绍了我们在单体及介观领域对自旋动力学及自旋调控的研究.

致谢 该工作受到中科院百人计划、中国自然科学基金(批准号: 90303012 及 10574120)、中国国家基础研究项目(批准号: 2006CNBOL1205)、安徽省自然科学基金(批准号: 050460203)、中国科学院知识创新工程和 SRFDP 的资助. 作者感谢他以前和现在的学生翁明其、程晋罗、蒋建华、周俊、王元元和吕川在这一系列研究中的出色工作. 作者也感谢他的学生沈卡将本文中的一部分由英语翻成中文.

参 考 文 献

- [1] Meier F, Zakharchenya B P. *Optical Orientation*. North-Holland, Amsterdam, 1984.
- [2] Awschalom D D, Loss D, Sarmarath N. *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*. Berlin: Springer, 2002; Žutić I, Fabian J, Das S S. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76:323; Hanson R, Kouwenhoven L P, Petta J R, Tarucha S, Vandersypen L M K. *cond-mat/0610433*.
- [3] Kikkawa J M, Awschalom D D. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80:4313.
- [4] Dzhioev R I, Zakharchenya B P, Korenev V L, Gammon D, Katzer D S. *Pis'ma Zh.Éksp.Teor.Fiz.*, 2001, 74:200; *JETP Lett.*, 2001, 74:182; Dzhioev R I, Kavokin K V, Lazarev M V, Meltser B Y, Stepanova M N, Zakharchenya B P, Gammon D, Katzer D S. *Phys. Rev.*, 2002, B66:245204.
- [5] Mordin B N, Litvinenko K, Allam J, Pidgeon C R, Bird M, Morrison K, Zhang T, Clowes S K, Branford W R, Harries J, Cohen L F. *Phys. Rev.*, 2005, B72:085346.
- [6] Damen T C, Viña L, Cunningham J E, Shah J, Sham L J. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67:3432; Wagner J, Schneider H, Richards D, Fischer A, Ploog K. *Phys. Rev.*, 1993, B47:4786; Heberle A P, Rühle W W, Ploog K. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72:3887; Crooker S A, Baumberg J J, Flack F, Samarth N, Awschalom D D. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77:2814; Crooker S A, Awschalom D D, Baumberg J J, Flack F, Samarth N. *Phys. Rev.*, 1997, B56:7574; Kikkawa J M, Smorchkova I P, Samarth N, Awschalom D D. *Science*, 1997, 277:1284; Ohno Y, Terauchi R, Adachi T, Matsukura F, Ohno H. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83:4196; Ohno Y, Terauchi R, Adachi T, Matsukura F, Ohno H. *Physica E(Amsterdam)*, 2000, 6:817; Malinowski A, Britton R S, Grevatt T, Harley R T, Ritchie D A, Simmons M Y. *Phys. Rev.*, 2000, B62: 13034; Brand M A, Malinowski A, Karimov O Z, Marsden P A, Harley R T, Shields A J, Sanvitto D, Ritchie D A, Simmons M Y. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89:236601; Adachi T, Ohno Y, Matsukura F, Ohno H. *Physica E(Amsterdam)*, 2001, 10:36; Karimov O Z, John G H, Harley R T, Lau W H, Flatté M E, Henini M, Airey R. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91:246601; Döhrmann S, Hägele D, Rudolph J, Bichler M, Schuh D, Oestreich M. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:147405; Lombez L, Braun P-F, Carrère H, Urbaszek B, Renucci P, Amand T, Marie X, Harmand J C, Kalevich V K. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87:252115; Strand J, Lou X, Adelman C, Schultz B D, Isakov A F, Palmstrøm C J, Crowell P A. *Phys. Rev.*, 2005, B72: 155308; Tyryshkin A M, Lyon S A, Jantsch W, Schäffler F. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94:126802; Holleitner A W, Sih V, Myers R C, Gossard A C, Awschalom D D. *cond-mat/0602155*.

- [7] Ohno Y, Young D K, Beschoten B, Matsukura F, Ohno H, Awschalom D D. *Nature*, 1999, 402:790; Fiederling R, Keim M, Reuscher G, Ossau W, Schmidt G, Waag A, Molenkamp L W. *Nature*, 1999, 402:787; Brand M A, Malinowski A, Karimov O Z, Marsden P A, Harley R T, Shields A J, Sanvitto D, Ritchie D A, Simmons M Y. *Phys.Rev.Lett.*, 2002, 89:236601; Stephens J, Berezovsky J, McGuire J P, Sham L J, Gossard A C, Awschalom D D. *Phys.Rev.Lett.*, 2004, 93:097602; Strand J, Schultz B D, Isakovic A F, Palmstrøm C J, Crowell P A. *Phys.Rev.Lett.*, 2003, 91:036602; Schmidt G, Gould C, Grabs P, Lunde A M, Richter G, Slobodskyy A, Molenkamp L W. *Phys.Rev.Lett.*, 2004, 92:226602; Crooker S A, Smith D L. *Phys.Rev.Lett.*, 2005, 94:236601; Beck M, Metzner C, Malzer S, Döhler G H. *Europhys. Lett.*, 2006, 75:597.
- [8] D'yakonov M I, Perel' V I. *Zh.Éksp.Teor.Fiz.*, 1971,60:1954; *Sov. Phys. JEPT*, 1971,33:1053.
- [9] Lau W H, Olesberg J T, Flatté M E. *Phys.Rev.*, 2001, B64:161301; Song P H, Kim K W. *Phys.Rev.*, 2002, B66:035207; Bronold F X, Martin I, Saxena A, Smith D L. *Phys.Rev.*, 2002, B66:233206; Averkiev N S, Golub L E, Willander M. *J.Phys.: Condns. Matter* 2002, 14: 271; Krishnamurthy S, Newman N, van Schilfgaarde M. *Appl.Phys.Lett.*, 2003, 83:1761; Kainz J, Pössler U, Winkler R. *Phys.Rev.*, 2004, B70: 195322; Glavin B A, Kim K W. *Phys.Rev.B*, 2005, 71:035321; Yu Z G, Krishnamurthy S, van Schilfgaarde M, Newman N. *Phys.Rev.*, 2005, B71: 245312.
- [10] Dresselhaus G. *Phys. Rev.*, 1955, 100:580.
- [11] Bychkov Y A, Rashba E. *Pis'ma Zh.Éksp.Teor.Fiz.*, 1984,39:66; *Sov. Phys. JEPT Lett.*, 1984, 39:78.
- [12] Aronov A G, Pikus G E, Titkov A N. *Zh.Éksp.Teor.Fiz.*, 1983,84:1170; *Sov. Phys. JEPT*, 1983, 57:680.
- [13] Lommer G, Malcher F, Rössler U. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 60:728.
- [14] Wu M W, Metiu H. *Phys. Rev.*, 2000, B61:2945; Wu M W, Ning C Z. *Phys. Stat. Sol.*, 2000, 222:523.
- [15] Wu M W, Ning C Z. *Eur. Phys. J.*, 2000, B18:373; Wu M W. *J. Supercond.*, 2001, 14:245.
- [16] Wu M W. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2001, 70:2195.
- [17] Weng M Q, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2003, B68: 075312; 2005, B71:199902; *Chin.Phys. Lett.*, 2005, 22:671.
- [18] Weng M Q, Wu M W, Jiang L. *Phys. Rev.*, 2004, B69:245320.
- [19] Weng M Q, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2002, B66:235109.
- [20] Weng M Q, Wu M W. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93:410.
- [21] Weng M Q, Wu M W, Shi Q W. *Phys. Rev.*, 2004, B69:125310.
- [22] Jiang L, Weng M Q, Wu M W, Cheng J L. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98:113702.
- [23] Sherman E Y. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82:209.
- [24] Allen L, Eberly J H. *Optical Resonance and Two-level Atoms*. New York: Dover, 1975.
- [25] Haug H, Jauho A P. *Quantum Kinetics in Transport and Optics of Semiconductors*. Berlin: Springer, 1996.
- [26] Cheng J L, Wu M W. *J. Appl. Phys.*, 2006, 99:083704.
- [27] Cheng J L, Weng M Q, Wu M W. *Solid State Commun.*, 2003, 128:365.
- [28] Wu M W, Huwata-Gonokami M. *Solid State Commun.*, 2002, 121:509.
- [29] Weng M Q, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2004, B70: 195318.
- [30] Stich D, Zhou J, Korn T, Schuh D, Wegscheider W, Wu M W, Schüller C. *cond-mat/0612477*.
- [31] Jiang L, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2005, B72:033311.
- [32] Zhou J, Cheng J L, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2006, B74, in press.
- [33] Glazov M M, Ivchenko E L. *JETP Lett.*, 2002, 75:403.
- [34] Lü C, Cheng J L, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2006, B73:125314.
- [35] Winkler R. *Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems*. Berlin: Springer, 2003.
- [36] Lü C, Cheng J L, Wu M W, da Cunha Lima I C. *cond-mat/0610510*.
- [37] Cheng J L, Wu M W. *cond-mat/0608413*.
- [38] Khaetskii A V, Nazarov Y V. *Physica E*, 2000, 6:470; Khaetskii A V, Nazarov Y V. *Phys. Rev.*, 2001, B64:125316; Woods L M, Reinecke T L, Lyanda-Geller Y. *Phys. Rev.*, 2002, B66:161318(R); de Sousa R, Das Sarma S. *Phys.*

- Rev.*, 2003, B68:155330; Bulaev D V, Loss D. *Phys. Rev.*, 2005, B71: 205324; Golovach V N, Khaetskii A, Loss D. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:016601; San-Jose P, Zarand G, Shnirman A, Schön G. *Phys. Rev.*, 2006, B97:076803.
- [39] Cheng J L, Wu M W, Lü C. *Phys. Rev.*, 2004, B69:115318.
- [40] Destefani C F, Ulloa S E. *Phys. Rev.*, 2005, B72:115326.
- [41] Lü C, Cheng J L, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2005, B71:075308.
- [42] Wang Y Y, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2006, B72:153301.
- [43] Shirley J H. *Phys. Rev.*, 1965, B138: 979.
- [44] Cheng J L, Wu M W. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86:032107.
- [45] Jiang J H, Weng M Q, Wu M W. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100:063709.
- [46] Jiang J H, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2007, B75, in press.
- [47] Wang Y Y, Wu M W. *Phys. Rev.*, 2005, B72:153301.
- [48] Zhou J, Shi Q W, Wu M W. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84:365.
- [49] Wu M W, Zhou J, Shi Q W. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85:1012.
- [50] Shi Q W, Zhou J, Wu M W. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85:2547.
- [51] Zhou J, Wu M W, Weng M Q. *Phys. Lett.*, 2006, A349:393.
- [52] Feng X Y, Jiang J H, Weng M Q. cond-mat/0610151.
- [53] Wu M W, Zhou J. *Phys. Rev.*, 2005, B72:115333.