

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0086-04

# 在外磁场作用下 Rashba 系统中的磁光吸收谱

杨翠红<sup>1, 2</sup> 徐文<sup>2, 3</sup> 曾雉<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044  
<sup>2</sup> 中国科学院固体物理研究所物质计算科学研究室, 安徽 合肥 230031  
<sup>3</sup> 澳大利亚国立大学理论物理系, 澳大利亚 堪培拉 0200

**摘要** 基于半经典玻尔兹曼方程的方法研究了 InGaAs/InAlAs 系统中电子在 Rashba 自旋轨道耦合相互作用(RSOI)和外磁场作用下二维电子气(2DEG)的磁光吸收谱以及选择定则。RSOI 的存在使朗道能级相互混合并移动, 在高迁移率和强磁场条件下, 磁光吸收谱可以观察到来自相邻朗道能级和相同自旋间的两个主吸收峰。随着电子浓度、外磁场以及自旋轨道耦合强度的不同可以相应地调制吸收谱强度和峰位等。另外, 由于朗道能级的混合, 使磁光谱出现自旋反转的跃迁, 但由于不同自旋态的电子波函数的重叠很小, 此跃迁对磁光吸收谱的贡献很小。

**关键词** 物理光学; 磁光吸收; 半经典玻尔兹曼方程; Rashba 自旋轨道耦合

中图分类号 O433.5<sup>+</sup>1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0086

## Magnetic-Optical Absorption Spectrum in a Rashba System and Quantizing Magnetic Fields

Yang Cuihong<sup>1, 2</sup> Xu Wen<sup>2, 3</sup> Zeng Zhi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

<sup>2</sup> Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>3</sup> Department of Theoretical Physics, RSPHysSE, Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia

**Abstract** The selection rules for electron-photon interaction in a two-dimensional electron gas (2DEG) in the presence of the Rashba spin-orbit interaction (RSOI) and quantizing magnetic fields in InGaAs/InAlAs-based spintronic system have been studied based on the semiclassical Boltzmann equation. As a theoretical result, two absorption peaks and abroad band absorption spectrum can be observed for high-mobility samples at relatively high magnetic fields. Similar to the spin-degeneracy system, we find that electronic transitions between the neighboring Landau levels (LLs) within the same spin orientation are the main channels for optical absorption in a spin-split 2DEG. The two absorption peaks originated from the energy spectrum varying with the strength of RSOI and the magnetic fields. And the absorption spectrum can be tuned by the electron density and Rashba parameters. However, due the LLs shifting and mixing induced by the magnetic fields and RSOI, spin-flip transitions were accompanied by the absorption of the photons and the strength of the magnetic-optical absorption peak was relatively weak.

**Key words** physical optics; magnetic-optical absorption; semiclassical Boltzmann equation; Rashba spin-orbit interaction

## 1 引 言

从 1990 Datta 和 Das<sup>[1]</sup> 提出自旋场效应晶体管设想以来, 关于半导体异质结因结构反演不对称引起的 Rashba 自旋轨道相互作用(RSOI)体系由于不需要外加磁场就能实现自旋劈裂而得到了广泛研

究<sup>[2, 3]</sup>, 而且 RSOI 的耦合强度可以通过门电压来调节<sup>[4]</sup>。本文以 InGaAs/InAlAs 半导体异质结为研究体系。此系统不但可以用来设计与自旋相关的自旋电子器件, 如: 自旋晶体管、自旋过滤器、自旋波导和探测器等, 而且此系统中的自旋劈裂能在太

**基金项目:** 国家自然科学基金(10804053)和江苏省自然科学基金面上项目(BK2008437)资助项目。

**作者简介:** 杨翠红(1978—), 女, 博士, 讲师, 主要从事半导体光电方面的研究。E-mail: chyang@nuist.edu.cn

赫兹范围,可相应地用来设计太赫兹器件<sup>[5]</sup>。众所周知,在垂直于二维电子气(2DEG)的平面上外加一个量子化磁场和极化的辐射场,磁光谱实验中可以观察到来自于相邻朗道能级和相同自旋间跃迁引起的单吸收峰。在自旋劈裂的 InGaAs/InAlAs 异质结 2DEG 中,实验上观察到两个峰值<sup>[6]</sup>。为解释其原因,理论上有必要研究此体系中的磁光吸收谱,为设计太赫兹器件提供理论依据。另一方面,正如 Rashba<sup>[7]</sup>指出的,自旋电子学系统的光学特性的研究对自旋动力学和自旋输运将有重要作用;而且理论研究结果也表明:1) Rashba 自旋电子学不但可以设计电学器件,同样可以设计光学器件,2) 以往耦合强度主要是通过磁输运的方法来测量,现在则提出可以通过光学手段精确测量<sup>[8]</sup>。

## 2 理论计算

本文假设异质结 InGaAs/InAlAs 的生长方向沿  $z$  方向,在  $xy$  平面形成准 2DEG。外加磁场沿  $z$  方向,光场沿  $z$  方向传播, $x$  方向极化。整个体系的 Hamiltonian 可表示为

$$H = H_0 + H_{\text{er}}, \quad (1)$$

其中外磁场和 RSOI 作用下的  $H_0$  可通过定义产生湮灭算符严格求出体系的能谱和波函数<sup>[9]</sup>。在弱光场的近似条件下辐射电磁场可写作  $H_{\text{er}} = -(\epsilon/m) \mathbf{A} \cdot \mathbf{p}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{p}$  分别为辐射场矢量和系统的动量,并采用朗道(Landau)规范下的矢势  $\mathbf{A}(0, Bx, 0)$ 。弱场近似下只考虑单光子吸收过程,由费米黄金规则可得到电子-光子相互作用下电子的跃迁几率:

$$W_{\lambda\lambda'} = \frac{2\pi}{\hbar} \left( \frac{e\hbar F_0}{\sqrt{2m^* \Omega l_B}} \right)^2 \delta_{k'_y, k_y} \delta_{n', n} \delta(E_{\lambda'} - E_\lambda - \hbar\Omega) \times (\delta_{N', N-1} I_{N-1}^{S'S} + \delta_{N', N+1} I_{N+1}^{S'S}), \quad (2)$$

$$I_{N\pm 1}^{S'S} = \left[ \sqrt{N+(1\pm 1)/2} \cos \theta_{N\pm 1}^S \cos \theta_N^S + \sqrt{N-(1\mp 1)/2} \sin \theta_{N\pm 1}^S \sin \theta_N^S \right]^2, \quad (3)$$

$\lambda = (N, k_y, n, s)$  的量子数分别代表朗道能级指标  $N$ ,  $y$  方向的好量子数  $k_y$ ,  $z$  方向限制势引起的子带能级指标  $n$ , 以及在外磁场和 RSOI 作用下自旋劈裂的自旋指标  $s = \pm 1$ 。  $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$ ,  $E_\lambda = E_{N,s} + \epsilon_n = N\hbar\omega_c + \hbar\Omega_N/2 + \epsilon_n$ , 式中  $\hbar\Omega_N = \sqrt{(\hbar\omega_c - g\mu_B B)^2 + 8N(\alpha/l_B)^2}$ ,  $\omega_c = eB/m^*$ ,  $\tan \theta_N^S = \sqrt{8N}(\alpha/l_B)/(\hbar\omega_c - gu_B B + \hbar\Omega_N)$ ,  $\theta_N^S = \theta_N + (1-s)\pi/4$ ,  $\alpha$ ,  $g$ ,  $m^*$  为 Rashba 自旋轨道耦合强度、 $g$  因子和电子的有效质量。

已知电子的跃迁几率,可通过半经典的玻尔兹曼方程来研究自旋劈裂 2DEG 系统在外加电磁场和辐射场下的载流子分布情况

$$df_\lambda(t)/dt = \sum_{\lambda'} (F_{\lambda\lambda'} - F_{\lambda'\lambda}), F_{\lambda\lambda'} = f_{\lambda'}(t)[1 - f_\lambda(t)]W_{\lambda\lambda'}, \quad (4)$$

$f_\lambda(t)$  为电子在状态  $\lambda$  上的分布函数。由于跃迁几率方程的复杂性,(4) 式很难有解析表达式。通常用平衡方程<sup>[10]</sup>来处理此类问题。同时考虑在  $z$  方向有很强的束缚,只有最低的子带占据电子(即  $n = 0$ )。光吸收系数可进一步表示为

$$\alpha_{\text{op}} = \alpha_0 \frac{\hbar\omega_c^2}{\pi\Omega} \sum_{s', s, N} [F_{N+1}^{s', s}(\Omega) + F_{N-1}^{s', s}(\Omega)] \quad (5)$$

$\alpha_0 = e^2/(\hbar\sqrt{\kappa\epsilon}c)$ ,  $\kappa$ ,  $\epsilon$ ,  $c$  分别代表物质和自由空间的介电常数和光速。 $F_{N\pm 1}^{s', s}(\Omega) = f(E_{N\pm 1, s'})[1 - f(E_{N, s})]I_{N\pm 1}^{s', s}\Gamma/[(E_{N\pm 1, s'} - E_{N, s} - \hbar\Omega)^2 + \Gamma^2]$ ,  $\Gamma$  为朗道能级的展宽。

## 3 数值计算与讨论

计算了以 InGaAs 为基的 2DEG 中低温极限下的磁光吸收谱。InGaAs 的有效质量  $m^* = 0.04 m_0$ ,  $m_0$  为自由电子的质量。 $g = 2$ 。具体计算中取 InGaAs/InAlAs 异质结的典型参数。总电子浓度大概在  $n_e \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , Rashba 自旋轨道耦合强度  $\alpha \sim 10^{-11} \text{ eV}\cdot\text{m}$ 。填充因子由粒子数守恒得到  $\nu = 2\pi l_B^2 n_e = \sum_{N, s} f(E_{N, s})$ 。

图 1, 2 分别给出了在不同电子浓度、Rashba

自旋轨道耦合强度、外磁场以及光子频率条件下的磁光吸收谱。在入射光频率和载流子浓度一定时, Rashba 自旋轨道耦合强度较大时可以观察到两个吸收峰。给定外磁场,简并度  $1/(2\pi l_B^2)$  不变,随载流子浓度的降低,占据的朗道能级数减少,两类相同自旋态之间的跃迁能级相差增大,更容易观察到两个吸收峰。而给定载流子浓度,外磁场越大,每个朗道能级的简并度越大,占据的朗道能级数则相应地减小,也更容易观察到两个吸收峰。图 2 中 (1)~(6) 分别给出了对磁光吸收谱有主要贡献的

跃迁通道所对应的吸收情况,用  $(N, s)$  简化表示跃迁的状态: (1) = (6, -1) 到 (7, -1), (2) = (3, +1) 到 (4, +1), (3) = (4, +1) 到 (5, +1) 分别对应着外磁场  $B = 2$  T 时的磁光吸收谱。(4) = (3, -1) 到 (4, -1), (5) = (1, +1) 到 (2, +1), (6) = (2, +1) 到 (3, +1) 分别对应着当  $B = 4$  T 时的磁光吸收谱。总的来说,当“+”到“+”自旋分支的跃迁和“-”到“-”自旋分支的跃迁所需的能量相差较大时,就能够观测到两个吸收峰。

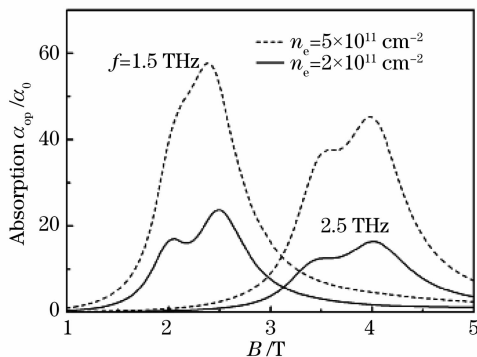


图 1 给定 Rashba 系数  $\alpha = 3 \times 10^{-11}$  eVm, 吸收谱在不同的辐射场频率和总电子浓度下随外磁场的变化关系

Fig. 1 Optical absorption spectrum at a fixed Rashba parameter  $\alpha = 3 \times 10^{-11}$  eVm for different radiation frequencies and electron densities as indicated

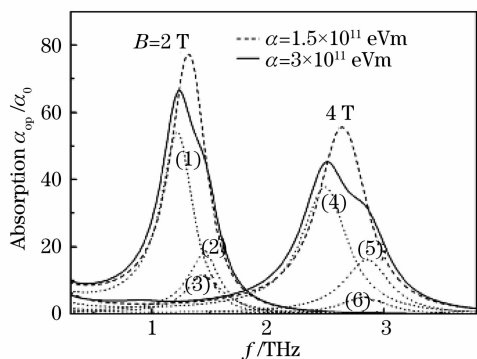


图 2 在总电子浓度一定时, 改变外磁场和 Rashba 耦合强度, 吸收谱随辐射场频率的关系, 图中 (1) ~ (6) 为相应参数条件下磁光吸收谱主要的跃迁通道

Fig. 2 Optical absorption coefficient as a function of radiation frequency  $f = \Omega/2\pi$  at a fixed electron density for different magnetic field and Rashba parameters, we also show the major transition channels with index (1)~(6) given in the text

在高迁移率强磁场的 2DEG 气中, 可以观测到两个共振吸收峰, 它们在跃迁过程中所需的能量为  $\hbar\Omega = \hbar\omega_c + sh(\Omega_{N+1} - \Omega_N)/2$ , 跃迁发生在不同的朗道能级和自旋态  $s = \pm 1$  之间。这种光学特征可以用

作 Rashba 自旋电子学器件的光学鉴定。从两个主要吸收峰的位置, 可以确定占据朗道态(即  $\leq N$ ) 和非占据朗道态(即  $\geq N+1$ ), 以及 Rashba 参数。有了这些结果, 就可以进一步确定填充因子、总的电子浓度等。现在, 以 InGaAs-为基的 2DEG 中的自旋电子学系数主要是通过 Shubnikov-de Hass (SdH) 振荡实验得到的。在磁输运的实验测量中需要欧姆接触, 而且 SdH 振荡实验混合了塞曼劈裂和 RSOI 作用下的自旋劈裂, 很难从实验结果中判断塞曼劈裂和 Rashba 自旋劈裂各占多少比例。另外 SdH 振荡实验只能在相对较低的载流子浓度下才能被观测到, 也就是说实验上需要外加较高的外磁场。这些因素都会影响到 Rashba 自旋轨道耦合系数的确定<sup>[8]</sup>。试想一下, 如果有关自旋电子学的一些特征参数可以通过磁光学的方法得到, 这些缺陷在光学实验测量中就可以避免了, 而且通过这个方法得到的结果更直接、更精确, 对用 SdH 实验测量结果进行进一步确认。

另外在 InGaAs-为基的异质结体系中 2DEG 的垂直方向上外加一个太赫兹量级的磁场, 由于 RSOI 的作用, 自旋劈裂, 磁光吸收谱的峰值大概在太赫兹区。而且自旋劈裂的 2DEG 磁光谱对样品的自旋电子学参数有很强的依赖关系。以往的研究已经表明以 InGaAs-为基的异质结可以通过人工的方法调节自旋电子学参数, 如改变样品的生长方向, 外加一个门电压调节自旋轨道耦合强度, 将会使以 InGaAs-为基的自旋电子学系统有更广泛的应用前景, 比如此 Rashba 自旋电子学结构可用作太赫兹区的光探测器器件。

## 4 结 论

主要研究了在外磁场作用下 Rashba 系统的磁光吸收谱的定则。与自旋简并的体系类似, 跃迁主要来源于相邻朗道能级和相同自旋间的跃迁。但由于 RSOI 与外磁场的相互作用, 使不同朗道能级相互混合, 以至于两类同自旋间的跃迁所需的能量差随磁场、总电子浓度、光的频率等变化而变化, 主要表现为有两个吸收峰。同时自旋反转间的跃迁也存在, 只是由于不同自旋态的电子态交叠很小, 对磁光吸收谱的贡献很小。

## 参 考 文 献

- 1 Supriyo Datta, Biswajit Das. Electronic analog of the electro-optic modulator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 665~667

- 2 W. Zawadzki, P. Pfeffer. Spin splitting of subband energies due to inversion asymmetry in semiconductor heterostructures [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, **19**: R1~R17
- 3 Emmanuel I. Rashba. Electric fields drive spins [J]. *Nature Physics*, 2006, **2**: 149~150
- 4 D. Grundler. Large Rashba splitting in InAs quantum wells due to electron wave function penetration into the barrier layers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**: 6074~6077
- 5 C. H. Yang, C. Zhang, A. Wright *et al.*. Two colour plasmon excitation in an electron-hole bilayer structure controlled by the spin-orbit interaction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 223102
- 6 K. I. Fujii, Y. Morikami, T. Ohya *et al.*. Determination of Rashba spin splitting in InGaAs/InAlAs by far-infrared magneto-optical absorption [J]. *Physica. Engng.*, 2002, **12**: 432~434
- 7 E. I. Rashba. Spin dynamics and spin transport [J]. *J. Supercond.*, 2005, **18**(2): 137~144
- 8 Takaaki Koga, Junsaku Nitta, Tatsushi Akazaki *et al.*. Rashba spin-orbit coupling probed by the weak antilocalization analysis in InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum wells as a function of quantum well asymmetry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(4): 046801
- 9 S. Q. Shen, Michael Ma, X. C. Xie *et al.*. Resonant spin hall conductance in two-dimensional electron systems with a Rashba interaction in a perpendicular magnetic field [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**: 256603
- 10 X. L. Lei, S. Y. Liu. Nonlinear free-carrier absorption of intense THz radiation in semiconductors [J]. *J. Phys. Condens. Matter.*, 2002, **12**: 4655~4664