

# HgTe/HgCdTe 量子阱中巨大电子 Rashba 自旋分裂\*

仇志军<sup>†</sup> 桂永胜 疏小舟 戴 宁 郭少令 君浩

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2003 年 6 月 13 日收到, 2003 年 8 月 5 日收到修改稿)

主要研究具有倒置能带结构的 n-HgTe/HgCdTe 第三类量子阱 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡中的拍频现象. 发现在量子阱中电子存在强烈的 Rashba 自旋分裂, 通过对 SdH 振荡进行三种不同方法的分析: SdH 振荡对  $1/B$  关系的快速傅里叶变换、SdH 振荡中拍频节点分析和对 SdH 振荡拍频数值拟合, 得到了完全一致的电子 Rashba 自旋分裂能量 (28—36 meV).

关键词: n-HgTe/HgCdTe, Shubnikov-de Haas 振荡, Rashba 自旋分裂

PACC: 7170, 7215G, 7155E

## 1. 引 言

近十年来, 半导体异质结中的自旋效应越来越引起人们的关注<sup>[1-4]</sup>. 因为除了电子的电荷特性外, 还可以利用电子的自旋特性, 来设计新一代电子器件——自旋场效应晶体管<sup>[5,6]</sup>. 如何在半导体材料中控制和操纵电子的自旋是材料器件研究的一个热点. 由于在半导体异质结中存在结构反演不对称性 (SIA), 导致电子的自旋简并解除, 在没有外加磁场情况下, 费米面处电子发生 Rashba 自旋-轨道分裂<sup>[7,8]</sup>. 虽然在极性半导体异质结中还存在体反演不对称性 (BIA) 引起的电子自旋分裂, 但是对于窄禁带半导体而言, 电子的自旋分裂主要是由结构反演不对称性引起的<sup>[9]</sup>.

对于 Rashba 自旋-轨道相互作用的来源, 过去人们一直认为是由于异质结界面电场引起的<sup>[2,9]</sup>, 然而最近理论和实验证明了界面电场的贡献很小 (约为 3.1%), 主要的贡献来源于波函数在势垒的穿透以及在界面的不对称性<sup>[4,10,11]</sup>. 目前, 相当多的研究都集中在 III-V 族半导体材料中<sup>[1-4]</sup>. 由于 Rashba 自旋-轨道相互作用是一种涉及原子的相互作用, 就理论而言, 原子量大的材料, 如 Hg 基 II-VI 族材料, 会存在更强的自旋-轨道相互作用<sup>[12,13]</sup>, 其正比于体材料中价带  $\Gamma_8^+$  和  $\Gamma_7^-$  之间的自旋-轨道分裂  $\Delta_{so}$ . 因

此, 相对于 III-V 族材料, 窄禁带 II-VI 族异质结中电子具有更高的 Rashba 自旋分裂能量 (约 10 meV)<sup>[14]</sup>.

在 III-V 族 GaAs 异质结材料中, 由于导带电子具有  $\Gamma_6$  对称性, 因此电子的 Rashba 自旋分裂与波矢  $K$  成线性关系. 而对具有倒置能带结构的 HgTe 量子阱 (阱宽大于 6 nm), 由于电子第一导带具有  $\Gamma_8$  对称性, 即重空穴态特性, 其直接后果是第一导带子带的 Rashba 自旋分裂正比于  $K$ <sup>[9,13]</sup>. 当电子浓度达  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时, 具有倒置能带结构的 HgTe 量子阱的第一导带子带的重空穴特性会显著增强 Rashba 自旋分裂, 在较高磁场和温度下可以观察到 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡的拍频现象. 本文主要研究具有倒置能带结构的 n-HgTe/HgCdTe 量子阱 Rashba 自旋分裂, 并通过分析 SdH 振荡的拍频现象, 得到电子的自旋分裂能.

## 2. 样品制备和实验

调制掺杂 n-HgTe/Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te 量子阱是在 Riber 2300 分子束外延系统生长的, 样品 A 和样品 B 生长条件完全相同, 阱宽均为 11 nm, 衬底为 (001) 方向的 Cd<sub>0.96</sub>Zn<sub>0.04</sub>Te 材料, 生长过程采用 CdI<sub>2</sub> 单边掺杂, 掺杂层位于量子阱的上方. Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te 势垒层包括 5.5 nm 的隔离层和 9 nm 的掺杂层. 样品通过化学腐蚀的方法形成 Hall 电极, 为了方便以后研究栅压对

\* 国家重点基础研究发展规划 (批准号 2001GB309506) 和国家自然科学基金 (批准号 60221502, 10374094) 资助的课题.

<sup>†</sup>E-mail: zqz@mail.sitp.ac.cn

Rashba 自旋-轨道相互作用的影响,我们在样品 B 上沉积了一层 200 nm 厚  $\text{Al}_2\text{O}_3$  绝缘层,然后蒸一层 Al 膜形成栅电极,并通过焊 In 形成良好的欧姆接触.在 0—15 T 磁场范围内,测量样品在不同温度(1.4—35 K)下的纵向电阻和 Hall 电阻,在测量过程中,尽量保持低电流(约 1  $\mu\text{A}$ )以避免电子加热.

### 3. 结果和讨论

图 1 给出了样品 A 在 1.4 K 时的纵向电阻 SdH 振荡和量子 Hall 平台,低场下电子的 Hall 浓度为  $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,迁移率为  $9.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .从图 1 可以看出,纵向电阻在 0.8 T 就开始出现 SdH 振荡拍频现象(箭头所指的位置为拍频节点).但是在 InAs 量子阱中磁致子带间散射(MIS)也能导致 SdH 振荡出现类似的拍频现象<sup>[15]</sup>.而对于半金属 HgTe 量子阱而言,Zhang<sup>[16]</sup>从实验和理论上证明,无论是对称还是非对称掺杂 HgTe 量子阱,均不存在磁致子带间散射.其原因是 HgTe 量子阱中导带的严重非抛物性导致子带电子非常复杂的能带结构和异常不规则的 Landau 能级布局,从而抑制了磁致子带间散射.所以,HgTe 量子阱中的拍频现象只可能是由于 Rashba 自旋分裂引起的.

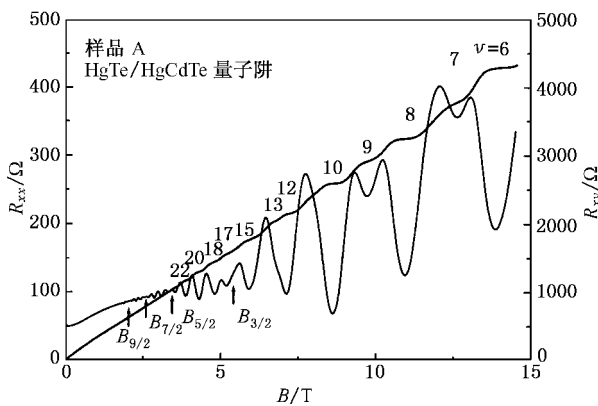


图 1 1.4K 时,样品 A 的纵向电阻( $R_{xx}$ )的 SdH 振荡和横向量子 Hall 平台( $R_{xy}$ ) 箭头指向拍频节点的位置

在具有倒置能带结构的 HgTe 第三类量子阱中,由于第一导带电子具有重空穴态特性,其电子自旋分裂的色散关系可以表示为

$$E_{\pm}(k_{\parallel}) = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m^*} \pm \beta k_{\parallel}^3, \quad (1)$$

式中  $k_{\parallel}$  表示平行于界面的波矢.那么在费米面处电子的自旋分裂  $\Delta_R = 2\beta k_F^3$ ,  $\beta$  为自旋-轨道耦合系

数

$$\beta = \frac{\hbar^2}{2m^*} \sqrt{\frac{X(2-X)}{4\pi n}}, \quad (2)$$

$$X = \frac{2 + \sqrt{1-a^2}}{a^2 + 3}, \quad (3)$$

其中  $a = (n_+ - n_-)/n$ ,  $n = n_+ + n_-$ ,  $n_{\pm}$  为不同自旋方向的电子浓度.

由于子带电子自旋分裂而引起的 SdH 振荡振幅调制可以表示为<sup>[17]</sup>

$$A \approx \cos(\pi\nu), \quad (4)$$

式中  $\nu = \delta/\hbar\omega_c$ ,  $\delta$  为总的自旋分裂,  $\hbar\omega_c$  为 Landau 能级分裂.当  $\nu$  为半整数(1/2, 3/2, ...) 时的磁场位置就是 SdH 振荡中的拍频节点.按照 Teran 等<sup>[18]</sup>对拍频节点位置的分析,最后一个节点(约为 5.35 T)对应于  $\delta = 3/2\hbar\omega_c$ .由于自旋-轨道分裂近似地与拍频中两个节点间的振荡数目成反比,与相同电子浓度的 InGaAs 量子阱相比,HgTe 量子阱的振荡数目要少一个数量级.这说明在 HgTe 量子阱中电子的自旋-轨道相互作用要远远强于 InGaAs 量子阱.

在 HgTe 量子阱中导带电子强烈的非抛物性导致费米面处电子的有效质量不同于带边有效质量,从 SdH 振荡幅度随温度的变化关系(见图 2),可以得到费米能级处电子的有效质量  $m^* = (0.044 \pm 0.005)m_0$ .图 3 给出了不同温度下 SdH 振荡的快速傅里叶变换(FFT),得到第一子带不同自旋态的电子浓度分别为  $0.8 \times 10^{12}$  和  $1.06 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,因此电子的自旋浓度差以及由此得到的自旋分裂能分别为 14.1% 和 28.2 meV.由于 Rashba 自旋分裂远远大于电子的温度展宽  $k_B T$ ,所以当温度升高到 35 K 时,FFT 峰位并没有发生移动.图 3 内插图显示了两个 FFT 峰随温度具有相同的衰减趋势  $X/\sin(X)$ ,  $X = 2\pi^2 k_B T/\hbar\omega_c$ .这表明 FFT 峰确实是对应 SdH 振荡,而不是 MIS,因为 MIS 是不随温度发生明显变化.

样品 B 在覆盖了一层绝缘层和栅电极后,由于半导体和金属具有不同的功函数,导致电子浓度增加.图 4 给出了样品 B 的 SdH 振荡(箭头所指的位置为拍频节点).通过对 SdH 振荡进行 FFT(见内插图)得到第一子带不同自旋态电子浓度分别为  $1.25 \times 10^{12}$  和  $0.93 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,并且发现电子开始占据第二子带.因此,在样品 B 中如此高的自旋电子浓度差(14.7%)导致了其具有更大的 Rashba 自旋-轨道分裂(34.7 meV).

在二维电子气中总的自旋分裂  $\delta$  总可以展开

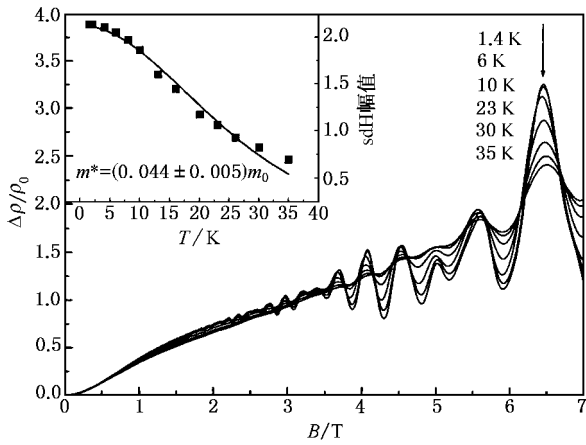


图2 不同温度下的 SdH 振荡(插图给出了 SdH 振荡幅度随温度的变化)

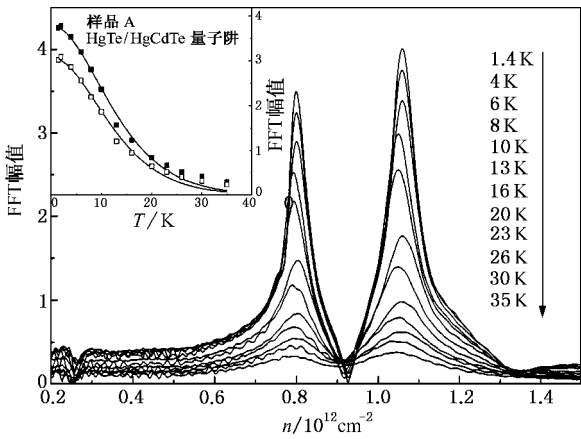


图3 不同温度下的 FFT 谱(插图给出了 FFT 峰随温度的变化, 实线为拟合曲线)

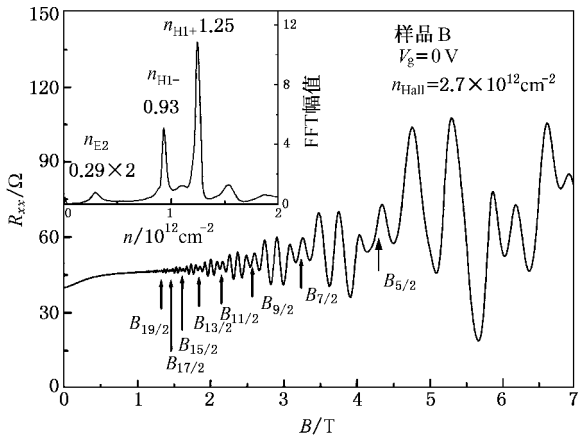


图4 1.4 K 时, 样品 B 纵向电阻  $R_{xx}$  的 SdH 振荡 箭头指向拍频节点的位置, 插图是 FFT 变换谱

成如下形式<sup>[11]</sup> :

$$\delta = \delta_0 + \delta_1 \hbar \omega_c + \delta_2 (\hbar \omega_c)^2 + \dots, \quad (5)$$

式中  $\delta_0$  为零磁场自旋分裂,  $\delta_1$  为线性分裂. 只有当磁场很高时 (5) 式中的二次项和高次项的作用才显得重要, 如果  $\delta_0$  远远大于其他项, 那么只需要考虑前面二项的贡献. 根据方程 (4) 和 (5), 通过线性拟合节点处总自旋分裂与 Landau 分裂的关系就可以得到电子 Rashba 自旋分裂  $\delta_0$  (见图 5). 因此, 在样品 A 和样品 B 中电子的 Rashba 自旋分裂能分别为 28.5 和 35.5 meV, 与从 FFT 得到的结果相一致.

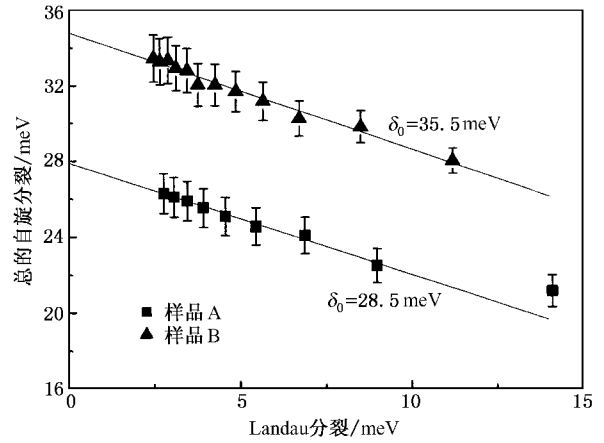


图5 样品 A 和样品 B 总的自旋分裂随 Landau 分裂的变化 实线为线性拟合

为了进一步证实 HgTe 量子阱中 SdH 振荡拍频现象确实是由 Rashba 自旋分裂引起, 我们对 SdH 振荡进行数值拟合. 根据 Gerhardt's 理论<sup>[19]</sup>, 在低级近似下考虑到 Rashba 自旋-轨道相互作用, Landau 能级的态密度可以写成

$$D(E) = \frac{1}{2\pi l^2} \sum_{N\pm} \left[ \frac{\pi}{2} \Gamma^2 \right]^{-1/2} \exp \left[ -2 \frac{(E - E_{N\pm})^2}{\Gamma^2} \right], \quad (6)$$

式中  $l = (\hbar / eB)^{1/2}$ ,  $E_{N\pm}$  为第  $n$  个 Landau 能级中电子自旋向上 (+) 和自旋向下 (-) 的能级. 为了简化, 认为 Landau 能级展宽  $\Gamma$  是一常量. 在磁场下, 非自旋简并 Landau 能级可以写成

$$E_0 = \frac{1}{2} (1 - m^* g^* / 2) \hbar \omega_c \quad (N = 0),$$

$$E_{N\pm} = \hbar \omega_c \left[ N \pm \frac{1}{2} \sqrt{(1 - m^* g^* / 2)^2 + N \frac{\Delta_R^2}{E_F \hbar \omega_c}} \right] \quad (N \neq 0), \quad (7)$$

式中  $g^*$  是有效  $g$  因子. 图 6 为样品 B 的 SdH 振荡和数值拟合结果. 通过调整  $\Delta_R$ ,  $\Gamma$  和  $g^*$ , 使所有节

点位置相一致,以减小数值计算和实验数据的偏差.拟合结果分别为:样品 A,  $\Delta_R = 28.8$  meV,  $\Gamma = 3.0$  meV 和  $g^* = -18.2$ ; 样品 B,  $\Delta_R = 35.7$  meV,  $\Gamma =$

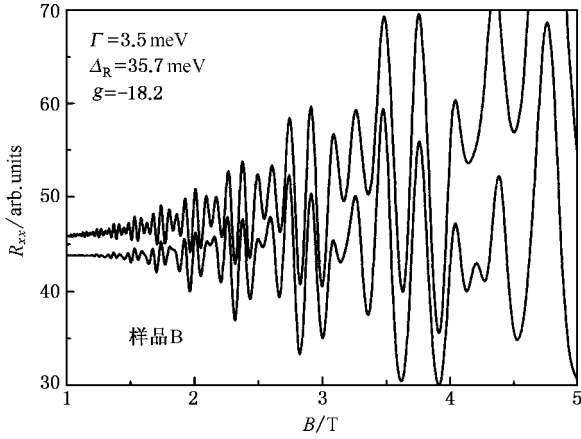


图 6 所测量的 SdH 振荡和数值拟合相比较. 上面曲线是实验值, 下面曲线是数值拟合. 曲线在垂直方向进行了平移

3.5 meV 和  $g^* = -18.3$ . 由此可以看出, 理论数值拟合、FFT 和拍频节点分析三种不同方法, 都能得到一致的结果. 从而证明了在 HgTe 量子阱中确实存在强烈的 Rashba 自旋-轨道耦合.

## 4. 结 论

通过分析 HgTe 量子阱中 SdH 振荡的拍频现象, 发现在量子阱中存在强烈的 Rashba 自旋-轨道耦合(约为 35 meV), 比同一电子浓度的 InGaAs 量子阱高出一个数量级, 甚至超过了室温下的温度展宽(约为 26 meV). HgTe 体材料中价带  $\Gamma_8^v$  和  $\Gamma_7^v$  之间大的自旋-轨道分裂  $\Delta_{so}$  (约 1.08 eV) 以及导带电子的重空穴特性, 显著增强了量子阱中电子的 Rashba 自旋-轨道耦合. 这些结果对今后设计和研制自旋电子器件具有积极的意义.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>[ 1 ] Datta S, Das B 1990 <i>Appl. Phys. Lett.</i> <b>56</b> 665</p> <p>[ 2 ] Nitta J, Akazaki T, Takayanagi H <i>et al</i> 1997 <i>Phys. Rev. Lett.</i> <b>78</b> 1335</p> <p>[ 3 ] Engels G, Lange J, Schapers T <i>et al</i> 1997 <i>Phys. Rev. B</i> <b>55</b> R1958</p> <p>[ 4 ] Hu C, Nitta J, Akazaki T <i>et al</i> 1999 <i>Phys. Rev. B</i> <b>60</b> 7736</p> <p>[ 5 ] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A <i>et al</i> 2000 <i>Science</i> <b>294</b> 1488</p> <p>[ 6 ] Sarma S D 2001 <i>American Scientist</i> <b>89</b> 516</p> <p>[ 7 ] Rashba E I, Tala F T 1960 <i>Sov. Phys. Solid State</i> <b>2</b> 1109</p> <p>[ 8 ] Bychkov Y A, Rashba E I 1984 <i>J. Phys. C</i> <b>17</b> 6039</p> <p>[ 9 ] Das B, Datta S, Reifengerger R 1990 <i>Phys. Rev. B</i> <b>41</b> 8278</p> <p>[ 10 ] Pfeffer P, Zawadzki W 1999 <i>Phys. Rev. B</i> <b>59</b> R5312</p> <p>[ 11 ] Grundler D 2000 <i>Phys. Rev. Lett.</i> <b>84</b> 6074</p> | <p>[ 12 ] Winkler R 2000 <i>Phys. Rev. B</i> <b>62</b> 4245</p> <p>[ 13 ] Rossler U, Malcher F, Lommer G 1989 <i>High Magnetic Fields in Semiconductor Physics II</i> (Berlin Springer-Verlag) p376</p> <p>[ 14 ] Zhang X C, Pfeufer-Jeschke A, Ortner K <i>et al</i> 2001 <i>Phys. Rev. B</i> <b>63</b> 245305</p> <p>[ 15 ] Rowe A C H, Nehls J, Stradling R A <i>et al</i> 2001 <i>Phys. Rev. B</i> <b>63</b> 201307</p> <p>[ 16 ] Zhang X C, Pfeufer-Jeschke A, Ortner K <i>et al</i> 2002 <i>Phys. Rev. B</i> <b>65</b> 45324</p> <p>[ 17 ] Das B, Miller D C, Datta S <i>et al</i> 1989 <i>Phys. Rev. B</i> <b>38</b> 1411</p> <p>[ 18 ] Teran F J, Potemski M, Maude D K <i>et al</i> 2002 <i>Phys. Rev. Lett.</i> <b>88</b> 186803</p> <p>[ 19 ] Gerhardt R R 1976 <i>Surf. Sci.</i> <b>58</b> 227</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

# Giant Rashba spin splitting in HgTe/HgCdTe quantum wells<sup>\*</sup>

Qiu Zhi-Jun   Gui Yong-Sheng   Shu Xiao-Zhou   Dai Ning   Guo Shao-Ling   Chu Jun-Hao

( *State Key Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China* )

( Received 13 June 2003 ; revised manuscript received 5 August 2003 )

## Abstract

Giant Rashba spin splitting has been found in n-HgTe/HgCdTe quantum wells with an inverted band structure by studying the beating patterns in Shubnikov-de Haas oscillations. Fast Fourier transformation , node positions , as well as numerical simulations , are used to deduce the Rashba spin-orbit splitting and result in an excellent agreement in Rashba spin splitting energy ( 28 – 36 meV ).

**Keywords** : n-HgTe/HgCdTe , Shubnikov-de Haas , Rashba spin splitting

**PACC** : 7170 , 7215G , 7155E

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2001GB309506 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60221502 and 10374094 ).