

GaAs/AlGaAs 多量子阱中载流子动力学的实验研究*

胡长城¹⁾²⁾ 叶慧琪²⁾ 王刚²⁾ 刘宝利^{2)†}

1)(吉林大学物理学院, 长春 130021)

2)(北京凝聚态物理国家实验室, 中国科学院物理研究所固态量子信息与计算实验室, 北京 100190)

(2009年3月29日收到; 2010年5月7日收到修改稿)

利用瞬态光栅激光光谱技术测量了(110)方向生长的本征 GaAs/AlGaAs 多量子阱的双极扩散系数. 室温下, 光激发的载流子浓度 $n_{ex} = 3.4 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 时, 测得双极扩散系数 $D_a = 13.0 \text{ cm}^2/\text{s}$, 载流子的寿命 $\tau_R = 1.9 \text{ ns}$. 改变光激发的载流子浓度 ($n_{ex} \leq 1.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$) 测量, 发现双极扩散系数不随着载流子浓度的增加而变化.

关键词: 瞬态光栅, 量子阱, 空穴输运

PACS: 78.47.jj, 73.21.Fg, 66.90.+r

1. 引言

近年来, 基于电子自旋的自旋器件和量子计算受到广泛关注和研究^[1-3]. 自旋器件要求有性能更好的半导体材料作为载体. GaAs 拥有一些比 Si 还要好的半导体特性, 如它是直接能隙材料, 具有高的饱和电子速率及高的电子迁移率; 另外, GaAs 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的晶格常数几乎是一样的, 可以利用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术或金属有机气相沉积 (metal-organic vapour phase epitaxy, MOVPE) 技术在 GaAs 上生长高质量的异质结构, 便于设计能带结构和电子特性, GaAs 材料的诸多优点使得它成为下一代自旋电子器件的候选材料之一. 在半导体材料中, 载流子的寿命 τ_R 、扩散系数 D 和迁移率 μ 等参数是表征材料品质的重要参数, 所以需要在实验上进行精确测量. 在 n 型掺杂的样品中, 电子的输运特性可以利用标准的 4-probe 霍尔测量技术来表征, 可是这种技术却难以测量低掺杂浓度样品和本征样品的输运性质. 时间分辨的瞬态光栅技术^[4] 在研究半导体中载流子的动力学过程中得到了广泛应用, 其在测量载流子扩散系数和载流子寿命时展现了强大的功能. 这种技术是通过两束相

干光来产生载流子的空间调制 (即瞬态光栅) 并且通过另一束探测光来实时探测这个瞬态光栅随时间的变化, 从而获得载流子的动力学过程的信息^[5-7]. Sūdzius 等人^[8] 利用瞬态光栅技术系统研究了 CdZnTe 晶体中载流子的产生、复合和输运过程; Aleksiejūnas 等人^[9] 测量了本征 GaN 材料载流子的双极扩散系数和表面载流子的复合速率; Chen 等人^[10] 利用瞬态光栅技术研究了 InN 材料中载流子的动力学过程, 发现在 InN 样品表面和 InN/GaN 界面处的双极扩散系数以及载流子的寿命有大的差别. 到目前为止, 对 GaAs 量子阱中电子的动力学过程研究比较系统, 而对另一种重要的载流子-空穴的研究还很少. 我们利用实验室自行建设的瞬态光栅系统^[11], 研究了(110)方向生长的本征 GaAs 量子阱中载流子的扩散性质, 测得该样品的双极扩散系数以及双极扩散系数与光激发的载流子浓度的关系, 并且得到样品的载流子寿命、空穴的迁移率以及扩散长度.

2. 实验

实验采用美国 Coherent 公司生产的锁模掺钛蓝宝石脉冲激光器作为光源, 其输出的脉冲宽度为

* 国家自然科学基金 (批准号: 10774183, 10911130356), 国家重点科学研究发展计划 (批准号: 2009CB930500) 和财政部、中国科学院支持项目资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: bliu@aphy.iphy.ac.cn

120 fs, 重复频率为 76 MHz. 实验原理如图 1 所示, 两束偏振方向相同的线偏振抽运光在样品表面干涉, 形成光场强度周期性变化的光场分布. 强度周期性分布的光场将引起载流子浓度的空间调制, 即形成瞬态光栅. 另外一束线偏振光入射到瞬态光栅上, 测量其衍射光强度随时间的变化, 从而获得载流子输运动力学过程的信息. 在我们的实验系统中, 采用外差探测和两级锁相放大相结合的方法, 能获得高信噪比的实验信号^[11].

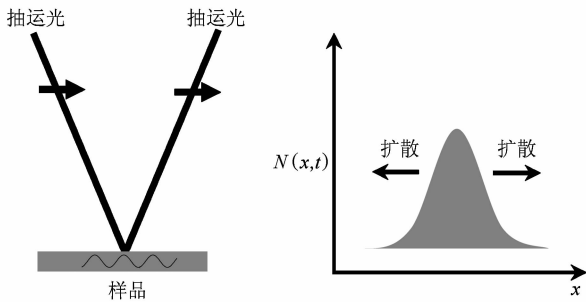


图 1 光激发的载流子浓度空间调制示意图

实验上, 随着探测光相对抽运光的延迟时间 Δt 的增长, 探测光被瞬态光栅衍射后的衍射光 (信号光) 强度也相应的在衰退. 室温下, 在 (110) GaAs 量子阱中, 这一衰退过程可以由单 e 指数形式进行描述, 即

$$I_{\text{signal}} = A \exp(-\Gamma \Delta t), \quad (1)$$

其中 A 是常数, 瞬态光栅的衰退速率 Γ 由下式决定^[12]:

$$\Gamma = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_D}, \quad (2)$$

式中 $1/\tau_R$ 表示载流子的复合过程对瞬态光栅衰退的贡献, $1/\tau_D$ 表示载流子的扩散过程对瞬态光栅衰退的贡献. 瞬态光栅技术中, 光在样品中激发的非平衡载流子密度随着时间和空间的演化满足下列方程^[12]:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D_a \nabla^2 N(x,t) - \frac{N(x,t)}{\tau_R}. \quad (3)$$

方程(3)的解如下:

$$N(x,t) = N(0,0) \left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau_D}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \right] \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right). \quad (4)$$

把(4)式代入到方程(3)得到瞬态光栅的衰退速率 Γ , 即

$$\Gamma = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_D} = D_a \frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + \frac{1}{\tau_R}, \quad (5)$$

表中, D_a 是双极扩散系数, Λ 是瞬态光栅的周期. 根据(5)式, 改变瞬态光栅的周期得到不同的瞬态光栅衰退速率, 通过线性拟合能够精确得到双极扩散系数及载流子的寿命. 在我们的实验中, 产生的瞬态光栅周期分别为 $\Lambda = 1.25 \mu\text{m}, 1.5 \mu\text{m}, 1.75 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}, 2.5 \mu\text{m}, 3.0 \mu\text{m}, 3.5 \mu\text{m}, 4.0 \mu\text{m}$.

实验样品是在半绝缘 (110) GaAs 衬底上, 利用分子束外延系统生长的 20 周期 8 nm GaAs/AlGaAs 本征多量子阱. 通过时间分辨的克尔旋转谱 (time-resolved Kerr rotation, TRKR)^[13] 找到样品的共振激发波长为 830 nm. 实验过程中, 把激光的中心波长固定为 830 nm, 固定探测光的功率为 0.23 mW, 光斑直径为 180 μm .

3. 结果及讨论

在室温下, 测量了八个不同瞬态光栅周期的实验信号, 抽运光的功率为 12 mW, 相应的光激发载流子浓度 $n_{\text{ex}} = 3.4 \times 10^{10}/\text{cm}^2$. 图 2 展示了五个代表性的瞬态光栅周期实验信号的衰退过程. 从图可以看出, 随着光栅周期的增加, 衍射信号的衰退速率变慢. 对图 2 中瞬态光栅衰退曲线进行拟合, 得到不同瞬态光栅周期的衰退速率 Γ , 我们画出 Γ 和 $4\pi^2/\Lambda^2$ 的关系曲线, 如图 3 所示. 依照(5)式对 Γ 和 $4\pi^2/\Lambda^2$ 进行线性拟合, 得到双极扩散系数 $D_a = 13.0 \pm 0.3 \text{ cm}^2/\text{s}$, 载流子寿命 $\tau_R = 1.9 \text{ ns}$.

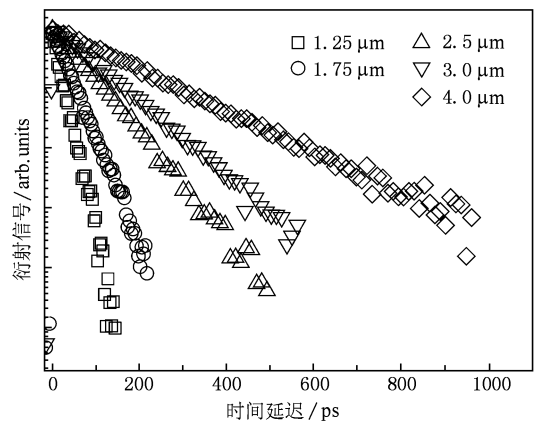


图 2 不同光栅周期下衍射信号的衰退

在本征半导体样品中, 光激发的电子和空穴的浓度相同, 双极扩散系数可以由如下公式表示^[14]:

$$D_a = \frac{k_B T}{q} \left(\frac{2\mu_e \mu_h}{\mu_e + \mu_h} \right), \quad (6)$$

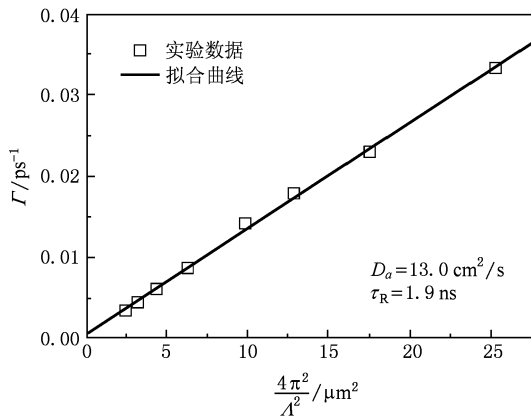


图3 量子阱中双极扩散系数和载流子寿命

这里, k_B 是玻尔兹曼常数, q 是元电荷常数, μ_e (μ_h) 是电子(空穴)迁移率, T 是载流子的温度. 半导体中载流子的迁移率 $\mu = q\langle\tau\rangle/m^*$, $\langle\tau\rangle$ 和 m^* 分别是载流子的平均自由时间和有效质量. 对于 GaAs 样品, 由于空穴的有效质量远大于电子的有效质量, 所以 $D_a \approx 2k_B T \mu_h / q$. 结合爱因斯坦关系 $qD = \mu k_B T$, 近似得到样品的空穴扩散系数 $D_h \approx 1/2 D_a$, 进一步可以得到空穴的扩散长度 $L_h = \sqrt{D_h \tau_R}$. 通过测得的双极扩散系数和载流子寿命可求得 $D_h = 6.5 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\mu_h = 250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $L_h = 1.1 \text{ }\mu\text{m}$. 我们测量的双极扩散常数和空穴迁移率和已有的实验结果是一致的^[15]. 从得到的结果上看, GaAs 量子阱材料中的双极扩散系数、空穴扩散系数和空穴迁移率均大于 CdTe 晶体^[8] 和 GaN 体材料^[9] 中相应的参数, 实验结果为以后在理论上深入研究 GaAs 量子阱材料的性质提供了实验参数依据.

进一步测量了双极扩散系数与光激发的载流子浓度(n_{ex})的关系, 如图 4 所示. 发现在 $n_{ex} \leq 1.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 的条件下, 样品的双极扩散系数与光激

发载流子浓度无关, 近似为常数 $13.2 \text{ cm}^2/\text{s}$. 我们的实验结果与 Young 等人在 GaAs 中的理论计算结论^[16] 是一致的, 在一定的光激发载流子浓度条件下, 双极扩散常数基本上为常数. 载流子浓度的增加, 载流子-载流子之间的散射增强, 但是载流子-载流子散射只在载流子之间交换动量, 系统总动量还是保持守恒的, 因此这种散射不会影响双极扩散过程, 从而导致在我们实验的激发条件下双极扩散系数不变.

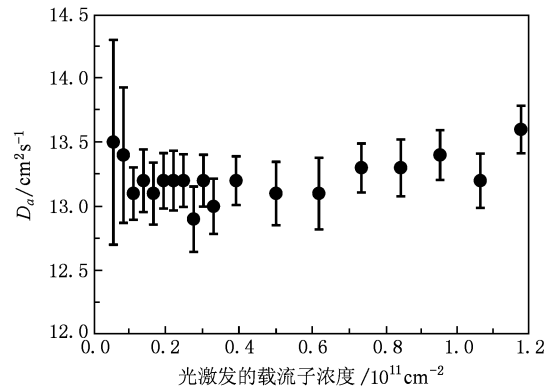


图4 双极扩散系数随载流子浓度的变化

4. 结 论

本文利用瞬态光栅激光光谱技术测量了本征 (110) GaAs/AlGaAs 量子阱中载流子的时间-空间动力学过程. 在室温下, 测得样品的双极扩散系数 $D_a = 13.0 \text{ cm}^2/\text{s}$, 载流子的寿命 $\tau_R = 1.9 \text{ ns}$, 进而求得空穴的迁移率 $\mu_h = 250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 空穴扩散长度 $L_h = 1.1 \text{ }\mu\text{m}$. 进一步测量了双极扩散系数与载流子浓度的关系, 发现在载流子浓度 $n_{ex} \leq 1.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 的条件下, 样品的双极扩散系数近似为常数 $D_a = 13.2 \text{ cm}^2/\text{s}$.

[1] Datta S, Das B 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 665
 [2] Awschalom D D, Loss D, Samarth N 2002 *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation* (Berlin: Springer)
 [3] Awschalom D D, Flatte M 2007 *Nature Physics* **3** 153
 [4] Eichler H J, Günter P, Pohl D W 1986 *Laser-Induced Dynamic Gratings* (Berlin: Springer-Verlag)
 [5] Grivickas V, Netiksis V, Noreika D, Petrauskas M, Willander M, Hasan M A, Ni W X 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 617

[6] Huang X R, McCallum D S, Dawso M D, Smirl A L, Boggess T F, Hasenberg T C, Tober R L 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 1868
 [7] McCallum D S, Cartwright A N, Huang X R, Boggess T F, Smirl A L, Hasenberg T C 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 3860
 [8] Sūdžius M, Aleksiejūnas R, Jarašiūnas K, Verstraeten D, Launay J C 2003 *Semicond. Sci. Technol.* **18** 367
 [9] Aleksiejūnas R, Sūdžius M, Malinauskas T, Vaitkus J, Jarašiūnas K 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1157

- [10] Chen F, Cartwright A. N, Lu H, Schaff W J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 212104
- [11] Hu C C, Wang G, Ye H Q, Liu B L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 597 (in Chinese) [胡长城、王 刚、叶慧琪、刘宝利 2010 物理学报 **59** 597]
- [12] Eichler H J, Massmann F 1982 *J. Appl. Phys.* **53** 3237
- [13] Liu B L, Zhao H M, Wang J, Liu L S, Wang W X, Chen D M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 112111
- [14] Seeger K 1986 *Semiconductor Physics* (Berlin: Springer)
- [15] Cameron A R, Riblet P, Miller A 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4793
- [16] Young J F, van Driel H M 1982 *Phys. Rev. B* **26** 2147

Spatiotemporal dynamics of photogenerated carriers in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells*

Hu Chang-Cheng¹⁾²⁾ Ye Hui-Qi²⁾ Wang Gang²⁾ Liu Bao-Li^{2)†}

1) (College of Physics, Jilin University, Changchun 130021, China)

2) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 29 March 2010; revised manuscript received 7 May 2010)

Abstract

The ambipolar diffusion coefficient of (110) GaAs/AlGaAs multiple quantum wells was measured by the transient spin grating technique. The ambipolar diffusion coefficient and carrier life time, which are $D_a = 13.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ and $\tau_R = 1.9 \text{ ns}$, were obtained directly by this technique under carrier concentration $n_{ex} = 3.4 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ at room temperature. The measured D_a keeps almost a constant value when the photoexcited carrier concentration is increased up to $1.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$.

Keywords: transient grating, quantum well, hole transport

PACS: 78.47. jj, 73.21. Fg, 66.90.+ r

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10774183, 10911130356), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB930500), also supported by Ministry of Finance and Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: blliu@aphy.iphy.ac.cn