

文章编号:1001-9014(2005)03-0179-03

半导体中超快过程的研究

黄仕华, 李汐, 凌严, 陆昉

(复旦大学表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

摘要:用飞秒脉冲激光技术研究了半导体中的超快过程. 通过用超快光生电压谱对激光激发载流子的动量弛豫过程进行检测, 得到在半导体硅中载流子的动量弛豫时间约为70飞秒, 该过程与载流子与载流子的散射几率有关; 对于锗硅量子点, 由于载流子的散射几率下降, 使动量弛豫时间增加至130飞秒. 用超快反射谱法测量了载流子的能量弛豫过程和扩散过程, 用高能量激光激发得到载流子的能量弛豫时间约为几个皮秒, 这与载流子与声子的散射几率密切相关; 而用低能量激光激发可得到光生载流子的扩散时间约为1百皮秒量级.

关键词:飞秒脉冲激光; 半导体; 动量弛豫; 能量弛豫

中图分类号: O472+.3 **文献标识码:** A

STUDY OF ULTRAFAST PROCESS IN SEMICONDUCTOR

HUANG Shi-Hua, LI Xi, LIN Yan, LU Fang

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The ultrafast process in semiconductor was studied by using femtosecond pulse laser. The momentum relaxation of carriers excited by laser was detected by using ultrafast photo-voltage spectra. The time of momentum relaxation of carriers in semiconductor Si is about 70 femtosecond, which is related to the probability of carrier-carrier scattering. In SiGe quantum dot, it is about 130 femtosecond due to the decrease of carrier-carrier scattering. The energy relaxation and diffusion processes can be measured by ultrafast reflection spectra. The time of energy relaxation of carriers excited by high energy laser is about several picoseconds, which is related to the probability of carrier-phonon scattering, and the diffusion time of carriers excited by low energy laser is about several hundreds picoseconds.

Key words: femtosecond pulse laser; semiconductor; momentum relaxation; energy relaxation

引言

大多数信息技术是基于小尺寸和高速微电子器件的快速响应. 在半导体微电子器件中, 高速和小尺度是紧密相关的, 半导体器件的尺度越小, 它的响应时间就越快. 高速器件的发展需要人们对载流子和声子发生在超短时间尺度内的动力学过程有一个清晰的了解^[1]. 飞秒激光技术的发展使对发生在半导体中动力学过程的研究变为现实. 当一个光脉冲照射到半导体上时, 大量的非平衡载流子产生. 这些处于非平衡状态的光生载流子在经历了不同的时间和空间演化过程过渡到平衡状态, 载流子的动量和能量弛豫到平衡状态的速率取决于散射过程的性质和散射过程的强度. 本文介绍用不同探测方法研究半导体中载流子的不同弛豫过程, 即用超快光生电压

谱研究了载流子的动量弛豫过程、用超快反射谱研究了载流子的能量弛豫过程和扩散过程.

1 原理

当一个激光脉冲作用在半导体上时, 如果光子的能量大于半导体的禁带宽度, 则会激发价带中的电子跃迁到导带, 并同时在导带与价带中产生大量的非平衡载流子, 并且载流子的温度也随之升高. 这些处于非平衡状态的光生载流子在经历了不同的时间和空间演化过程过渡到平衡状态, 图1给出了一些重要的演化过程及其特征时间^[2].

由于光子能量 $\hbar\omega_0$ 比半导体的禁带宽度 E_g 大, 并且单色脉冲激光具有特定偏振方向, 因此所激发产生的电子-空穴对的能量分布在极窄的范围内, 而它们的动量则分布在具有特定方向的动量空

收稿日期: 2004-10-08, 修回日期: 2005-01-20

Received date: 2004-10-08, revised date: 2005-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(90101011, 10321003, 10474012), 国家重点基础研究项目(G2001CB3095), 上海市科委重大项目

通讯作者简介: 陆昉(1957-), 男, 江苏无锡人, 博士, 复旦大学物理系教授, 主要从事半导体物理研究.

间,如图 1(a)所示. 随着载流子的弹性散射^[3],它们的动量不再具有特定方向的分布,而在几十 fs 内发生了随机分布,导致平均动量为零,如图 1(b)所示. 而电子和空穴的过剩能量($\hbar\omega_0 - E_g$),则通过载流子的非弹性散射,与声子交换能量,使电子和空穴分别在导带和价带达到由特征温度为 T_e (T_h) 所确定的费米 - 狄喇克分布,如图 1(c)所示. 此时是具有各自特征温度分布的两个分开的系综. 如果考虑到光吸收在空间是不均匀,因此除了考虑光生载流子的时间演化外,还必须考虑它的空间演化. 由于光生载流子在空间的浓度梯度不同,从而引起光生载流子在空间的扩散,这也将使得导带电子与价带空穴的分布发生变化.

2 实验

实验所用光源为钛:宝石激光系统,脉冲宽度小于 120 fs,波长在 700 nm ~ 900 nm 和 1.10mm ~ 1.65 mm连续可调. 超快光生电压谱及超快反射谱的测量均采用了泵浦 - 探测技术. 用超快光生电压谱对锗硅量子点中动量弛豫过程进行研究,根据 Ge 量子点的稳态光电流测试结果可知量子点存在两个子能级,它们与 Si 导带底的能量差分别为 0.76 eV 和 0.84 eV. 分别把脉冲激光的波长调谐到 1.63、1.48 以及 1.11 μm ,以研究载流子动量弛豫在硅体材料与在锗硅量子点中的差别,实验结果如图 2 所示. 应用光学 Bloch 方程并经过一定的近似,可对激光脉冲对作用下的二能级体系的退相时间(动量弛豫时间)从理论上加以推导. 应用这个方程拟合不同的激发波长下所获得的超快光生电压谱,可获得

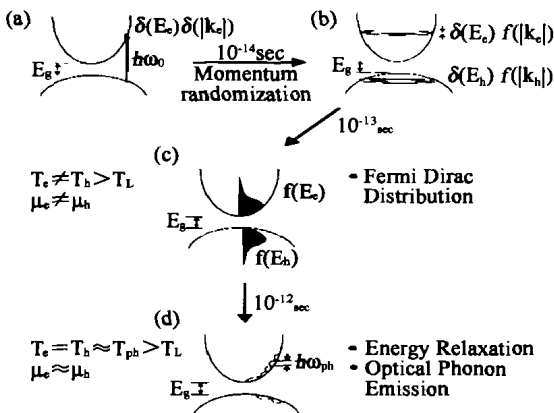


图 1 半导体中由于激光产生载流子的动量和能量弛豫过程示意图
Fig. 1 Momentum and energy relaxation of carriers in semiconductor induced laser

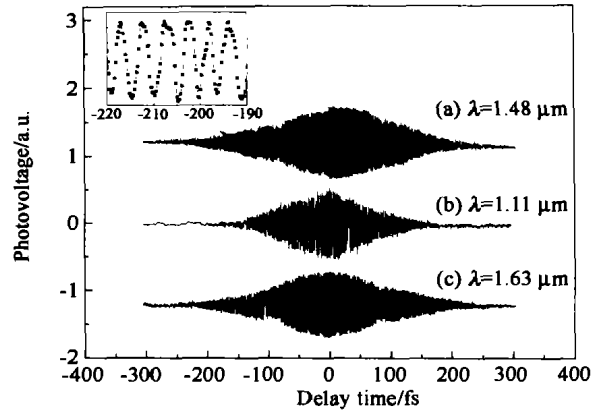


图 2 在不同激发能量下锗硅量子点的超快光生电压谱
Fig. 2 The ultrafast photo-voltage spectra in GeSi quantum dot under different laser energy

载流子在硅体材料中的退相时间约为 70 fs,而在量子点中的退相时间约为 130 fs.

采用泵浦 - 探测技术,进行超快反射谱的测量,选择不同的激发光的波长(400 与 800nm),可对 InP 材料($E_g = 1.34\text{eV}$)中光生载流子的能量弛豫过程及扩散弛豫过程进行研究. 当激发光波长为 400nm 时($\hbar\omega_0 = 3.1\text{eV}$),电子被激发到导带的较高能级 E2,由于该能级的能量要远高于导带底,因此在该能级上的光生载流子数目在能量弛豫过程中迅速衰减,直至所有电子在导带中的分布满足费米 - 狄喇克分布,在这种情况下,用超快反射谱测量得到的激发能级 E2 上光生载流子的衰减过程也就是能量弛豫过程,如图 3(a)所示. 载流子的能量弛豫过程是通过载流子 - 光学声子散射的形式而耗散其过多的能量,测量得到其能量弛豫时间约为几个皮秒.

当激发波长为 800 nm ($\hbar\omega_0 = 1.55\text{eV}$)时,电子被激发到离导带底较近的 E1 能级上,经过能量弛豫后,仍将有大量的光生电子分布在 E1 能级上,此时该能级上光生电子的衰减,则主要由光生载流子在空间上的扩散过程所决定,通过用超快反射谱方法测量 E1 能级上光生电子的衰减过程,可得到这一扩散过程所需的时间,如图 3(b)所示. 该过程所需时间约为 100 皮秒量级.

3 结论

用超快光生电压谱测量得到在硅体材料中光生载流子的动量弛豫时间约为 70 飞秒,而在锗硅量子点中该时间约为 130 飞秒. 这表明载流子在零维空间受到的载流子与载流子之间的散射几率要比三维空间小的多. 在不同光子能量激发下,激发能级上的

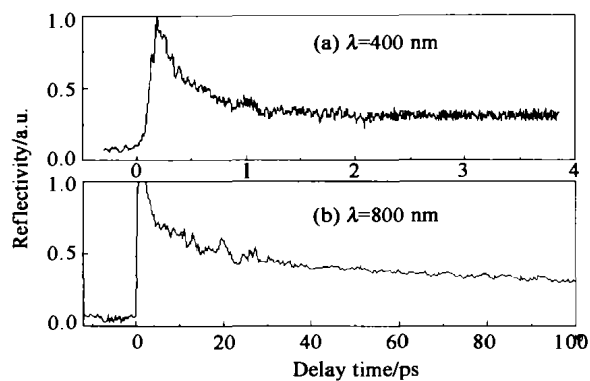


图3 在不同激发光波长(a: 400nm,b: 800nm)下超快反射光谱的测量结果
Fig.3 The ultrafast reflection spectra under different wavelength of laser (a: 400nm,b: 800nm)

载流子的能量弛豫过程和扩散弛豫过程在整个弛豫过程中所占的比例相差很大,即高能量激发下,能量弛豫过程占主导地位,时间为几个皮秒,而在低能量激发下,则主要由扩散弛豫过程所决定,该过程所需的时间约为1百皮秒量级.

REFERENCES

- [1] Yang Z C, Ho W. Alkali promotion of photodissociation of adsorbed Mo(CO) [J], *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**:741.
- [2] Shah J. Hot electrons and phonons under high intensity photoexcitation of semiconductors [J], *Solid-State Electron.*, 1978, **21**: 43.
- [3] Bigot J Y, Portella M T, Schoenlein R W, *et al.* Two-dimensional carrier-carrier screening in a quantum well [J], *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**:636.