

*
LT-GaAs 缺陷态对载流子的捕获特性

刘智刚, 黄亚萍, 文锦辉, 廖 睿, 林位株

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室 // 物理学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 采用宽频带飞秒脉冲泵浦—探测方法测量了 LT-GaAs 中不同能态的光生载流子的超快捕获特性, 发现随着载流子的过超能量增大, 载流子的散射速率加快, 而缺陷态对载流子的捕获速率, 则与光生载流子的过超能量无关, 表明 LT-GaAs 缺陷态捕获电子主要为点缺陷深能级多声子无辐射捕获过程。

关键词: LT-GaAs; 飞秒脉冲; 非平衡载流子; 缺陷捕获

中图分类号: O472⁺.8 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2002) 03-0119-03

低温生长砷化镓 (简称 LT-GaAs) 因具有亚皮秒级的载流子寿命, 退火后高阻抗、高击穿电场阈值等优点, 成为超快光导开关和全光开关的理想材料^[1]。有关 LT-GaAs 的应用不断涌现, 最近 Loka 等^[2]用 LT-GaAs 制成了高速 (3 ps)、宽带 (35 nm)、低开关能量 (200 fJ/ μm^2) 的非对称 FP 全光开关。

LT-GaAs 的许多新奇特性来源于其中的富余 As 形成高密度缺陷态, 捕获载流子并使载流子快速复合。由于 LT-GaAs 中存在多种缺陷, 对这些缺陷的捕获特性及所起作用至今仍是人们感兴趣的课题。本文采用宽带飞秒脉冲激发, 不同波长探测, 测量不同能态上光生载流子的时间演化, 从而获得了较全面的关于 LT-GaAs 载流子弛豫和捕获的信息。

1 实 验

当用一束激光脉冲激发半导体样品时, 受激产生于导带中的电子和价带中的空穴占据了激发态的布居, 从而会降低样品对探测光的吸收, 产生所谓吸收饱和效应, 探测光透过率增加。随着受激载流子布居的衰减, 这种饱和效应便随之退化, 探测光的透过率亦随之减少。这样, 通过测量探测光透过率的变化, 便可以测定载流子布居的衰变情况。

泵浦—探测瞬态光谱测量中得到的信号, 在材料响应时间很快的条件下, 正比于材料响应函数与光脉冲强度自相关函数之卷积^[3]。本实验是采用宽带泵浦—探测技术测量, 泵浦光中心波长为 780 nm。本文对 780 nm 的探测信号扣除相干耦合假像, 而 810~870 nm 等各信号远偏离泵浦光中心波长, 相干耦合假像已很弱, 就不用扣除相干耦合

假像了。用解卷积的方法可以获得材料的响应函数 $A(t)$ 。通常载流子具有多个弛豫过程, 相应响应函数 $A(t)$ 包含几个时间常数, 具体可表示为

$$A(t) = \sum_i a_i \exp\left[-\frac{t}{T_i}\right] \quad (1)$$

本文的 LT-GaAs 样品, 是采用 MBE 方法, 在 200 °C 下生长并在 600 °C 退火 10 min 而成, 样品的衬底 GaAs 用物理和化学方法去除, 只留下厚度为 1 μm 并粘贴在宝石片上的薄膜样品。由自锁模钛宝石激光器产生的脉宽 (FWHM) 为 16 fs 的飞秒激光脉冲经分束镜分成 2 束, 分别作为泵浦和探测脉冲, 偏振方向相互平行。两束光非共线地聚焦到样品上, 光斑半径约 10 μm 。由样品透射的探测光经单色仪分光后, 入射到光电倍增管接收, 再经锁相放大, 输入至计算机记录处理。图 1 为室温下探测波长分别为 780, 810, 830, 840, 850, 860 和 870 nm 条件下 LT-GaAs 的飞秒饱和吸收曲线, 其中载流子的浓度约为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。由图中曲线可看出, 探测波长为 780 nm 的瞬态饱和吸收曲线比 870 nm 处的表现出较快的衰减特性。

对探测波长为 780 nm 条件下 LT-GaAs 的饱和吸收曲线减去相干假像部分后, 采用双指数拟合, 得到快成分和慢成分, 它们的 2 个时间常数分别为 t_1 和 t_2 。其中较快的过程主要决定于载流子初始散射; 而较慢的过程则主要反映缺陷捕获和载流子热弛豫的共同影响。同样地, 对其它探测波长的饱和吸收曲线作相似的数据处理, 得到各条件下 LT-GaAs 光生载流子弛豫的时间常数。各波长实验曲线的上述时间常数示于图 2。对图 1 中探测波长为 870 nm 的曲线进行指数拟合时, 发现只得到一个

* 收稿日期: 2002-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60178020, 19874082); 广东省自然科学基金资助项目 (011204)

作者简介: 刘智刚 (1975-), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 林位株; E-mail: stslwz@zsu.edu.cn

时间常数 $t = 300$ fs。因为 $\lambda = 870$ nm 已处于 LT-GaAs 的导带底, 此时已无初始散射和载流子热弛豫过程影响, 因此得到的 t 即为其缺陷捕获时间 τ_d 。由图 1 拟合的数据表明, 探测波长红移时, t_1 随之增大, 权重系数变小, 其慢成分 t_2 随之增大, 权重系数变大。这是因为光生载流子过超能量减少时, 初始散射和热弛豫速率都变慢之故。但不同过超能量下的缺陷捕获时间 τ_d 却基本不变。

2 分析和讨论

半导体禁带中的缺陷可分为浅能级和深能级, 浅能级是由长程库仑势引起的, 深能级是由短程缺陷势引起。LT-GaAs 中 As 的富余量可达 1% 以上, 主要以反位 As_{Ga} 点缺陷存在。经 600 °C 退火后会转变成颗粒状的 As 沉淀, 直径约 2~10 nm。退火温度越高, As 沉淀的尺寸越大。关于缺陷的捕获机制, Look 等^[4] 认为主要是反位点缺陷 As_{Ga} 形成类 EL2 能级捕获载流子。其中 As_{Ga}^0 属于双施主深能级, 起载流子陷阱的作用。后来人们发现 As 沉淀对载流子的复合起主要作用, 成为复合中心^[5]。上述的深能级缺陷态都位于导带底约 0.6 eV 的禁带中央。

陷捕获; 另一方面, 载流子的热运动速率越大, 越易于从缺陷逃逸, 过渡到束缚态需同时放出数目较多的声子, 因而缺陷捕获的截面减小。这两方面的因素相互制约, 使得高、低能态的载流子捕获速率相差不大。当然, 由于高能态的电子要多释放少量的声子, 会使晶格温度升高的幅度大一些, 但由于载流子的密度与晶格密度相比很小, 将不会引起显著的晶格温度变化 (< 0.2 K)。因此, 若 LT-GaAs 只有深能级缺陷, 捕获速率应与载流子的过超能量无关。在我们实验中, 晶体体积 V 约为 3×10^{-16} m³, 缺陷密度 N_d 约为 10^{18} cm⁻³, A 约为 10^7 s⁻¹, 激活能 E_b 为 180 meV, T 为 300 K, 由 (2) 式计得的深能级模型理论曲线示于图 2 实线, 它与实验数据点基本符合。

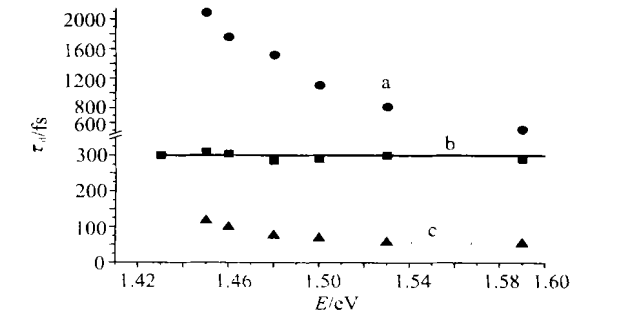


图 2 LT-GaAs 载流子捕获时间与激发光子能量的关系
Fig. 2 The carrier capturing rate of LT-GaAs versus the exciting photon energies
b 为点缺陷深能级多声子无辐射捕获时间的理论曲线;
■ 为捕获时间的实验数据点;
▲ 和 ● 分别为不同激发光子能量下载流子的初始散射和热弛豫时间

3 结 论

本文利用泵浦-探测技术, 采用宽带激发, 单波长探测的方法, 测量了 LT-GaAs 不同能态的光生载流子的超快动力学特性。结果表明, 随着载流子的过超能量增大, 载流子的散射速率加快, 而缺陷态对载流子的捕获速率, 与光生载流子的过超能量无关。这表明 LT-GaAs 缺陷态捕获电子过程主要为点缺陷深能级多声子无辐射捕获。

参考文献:

[1] KROTKUS A, BERTULIS K, DAPKUS L, et al. Ultrafast carrier trapping in Be-doped low-temperature-grown GaAs [J]. Appl Phys Lett, 1999(75): 3336.
[2] LOKA H S, SMITH P W E. Ultrafast all-optical switching with an asymmetric fabry perot device using low-temperature grown GaAs: material and device issues [J]. IEEE JQE, 2000(36): 100.

(下转第 122 页)

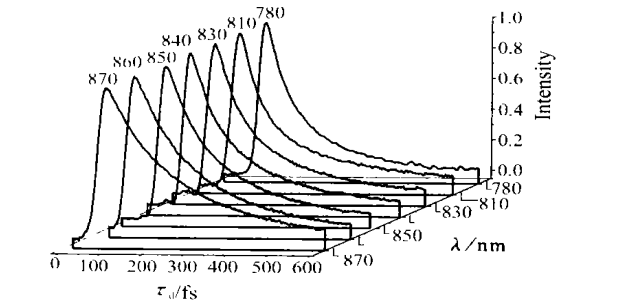


图 1 不同探测波长的 LT-GaAs 飞秒饱和吸收曲线
Fig. 1 The femtosecond absorption saturation traces of LT-GaAs with probe pulses at different wavelengths

对于深能级点缺陷, 载流子需放出相当于多个 LO 声子的能量才能过渡到缺陷态。声子无辐射捕获, 这是 GaAs 等 III-V 族半导体深缺陷能级的主要的捕获机制。深能级的捕获速率为

$$\frac{1}{\tau_d} = N_d V A \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right) \quad (2)$$

其中, V 为晶体体积, N_d 为缺陷的密度, A 为与电子和晶格耦合强弱有关的系数, E_b 是产生多声子捕获过程所需的激活能, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为晶格温度。

(2) 式说明 LT-GaAs 中载流子的捕获速率主要由晶格温度 T 决定, 与载流子的过超能量大小无关。这是因为, 一方面高能态的载流子由于热运动速率大, 运动到缺陷附近的几率较大, 容易被缺

式 (6) 就是经过严格证明的适用于三层分层有耗媒质中的 Sommerfeld 积分近似条件。将此近似条件应用于文献 [5] 中, 可得到 Sommerfeld 积分的解析表达式。

参考文献:

[1] WAIT J R. Electromagnetic waves in stratified media [M]. New York: IEEE Press, 1996.
[2] CHEW W C. Waves and fields in inhomogeneous media

[M]. New York: IEEE Press, 1995.
[3] 龙云亮, 蒋鸿雁. 复杂有耗媒质中的场与波[J]. 系统工程与电子技术, 1994, 16(11): 26—37.
[4] 龙云亮. 计算 Sommerfeld 型积分远场近似的新方法 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 1994, 33(4): 29—34.
[5] LONG Y L, JIANG H Y. Current integral equations of boundary penetrating antenna embedded in three-layer medium[J]. Electronics Letters, 1998, 34(8): 711—712.

Exact Proof of the Approximation Condition for the Sommerfeld Integral in Layered Lossy Medium

JIANG Hong yan, LONG Yun liang

(Department of Electronics & Communication Engineering,
Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The correct approximation condition for the sommerfeld integral involved in a three layer lossy medium is presented. The exact proof of the approximation condition is also worked out.

Key words: layered lossy medium; Sommerfeld integral

(上接第 120 页)

[3] 林位株, 丘志仁, 徐文成. AlGaAs/ GaAs 多量子阱结构中受激载流子的飞秒弛豫特性 [J]. 光学学报, 1992 (12): 390.
[4] LOOK D C, FANG Z Q. Photoquenching of hopping conduction in low-temperature-grown molecular-beam-epitaxial GaAs [J]. Appl Phys Lett, 1992 (61):

1438.
[5] LOCHTEFELD A J, MELLOCH M R, CHANG J C P, et al. The role of point defects and arsenic precipitates in carrier trapping and recombination in low-temperature-grown GaAs [J]. Appl Phys Lett, 1996 (69): 1465.

The Carrier Capturing Characteristics of Defects in LT—GaAs

LIU Zhi gang, HUANG Ya ping, WEN Jin hui, LIAO Rui, LIN Wei zhu

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,
Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: With the technique of broad band pump probe, the ultrafast capturing characteristics of photo excited carriers in LT GaAs were studied. It is found that the initial scattering and cooling rates of the excited carriers decrease as the excess energies of the carriers decrease, but the capturing rate of defects is independent of the excess energies. This reveals that the carriers are captured by the defects formed by anti position AsGa.

Key words: LT GaAs; femtosecond pulses; nonequilibrium carriers; defect capturing