

doi: 10.3788/gzxb20174608.0832001

GaAs 光生载流子动力学机制的超快光谱学分析

于钟慧, 张苏娟, 何川, 黄媛媛, 朱礼鹏

(西北大学 光子学与光子技术研究所/光电技术与功能材料国家重点实验室, 西安 710069)

摘 要: 利用飞秒激光泵浦探测技术, 通过改变光学参数, 如中心波长、功率, 分别对未故意掺杂高纯 n 型砷化镓的差分反射谱进行研究, 进而分析室温下砷化镓光生载流子动力学过程. 首先, 当泵浦光功率恒为 100 mW, 探测光功率恒为 10 mW 时, 随着中心波长的增大, 差分反射率峰值随之增大, 信噪比也随之增加. 其次, 通过拟合不同延迟时间下泵浦光功率和差分反射率的实验曲线, 并和理论模型比较后发现, 在一定范围内的泵浦功率和差分反射率呈线性相关, 未故意掺杂高纯 n 型砷化镓的饱和载流子浓度为 $(3.590 1 \pm 0.310 3) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 在此基础上, 把光生载流子动力学过程分为 3 个过程: $804 \pm 67 \text{ fs}$ 的光激发过程、 $134 \sim 268 \text{ fs}$ 的初始散射过程、 1 ps 和 $3 \sim 6 \text{ ps}$ 的复合过程. 研究表明, 差分反射率与探测功率不存在显著的依赖性, 但差分反射谱的信噪比与探测功率存在相关性.

关键词: 光电子学; 超快激光; 光谱学; 砷化镓; 泵浦-探测; 动力学; 载流子寿命

中图分类号: O472+.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0832001-7

Analysis on Dynamics of Photo-induced Carriers in GaAs by Ultrafast Spectroscopy

YU Zhong-hui, ZHANG Su-juan, HE Chuan, HUANG Yuan-yuan, ZHU Li-peng

(Institute of Photonics & Photon Technology / State Key Lab Incubation Base of Photoelectric Technology and Functional Materials, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Varied with some optical parameters, such as center wavelength, power, the differential reflectance spectroscopy of unintentionally doped high-purity n-type gallium arsenide were studied by femtosecond laser pump probe technique. These time-resolved differential reflective spectroscopy further analyzed the dynamics of photo-induced carrier of gallium arsenide at room temperature. Firstly, if the pump and the probe power were stabled at 100 mW and 10 mW respectively, the peak differential reflectivity increases with the red shift of center wavelength, and the signal-to-noise ratio increases as well. Secondly, Based on the fitting experimental data of varying pump power and the theoretical model, it is found that there is a linear correlation between the pump power and the differential reflectance in a certain range, through which the saturated carrier concentration of this gallium arsenide sample was calculated as $(3.590 1 \pm 0.310 3) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Thirdly, the dynamics process of photo-induced carriers is divided into three terms: the photo-excitation process ($804 \pm 67 \text{ fs}$), the initial scattering process ($134 \sim 268 \text{ fs}$), the recombination process with 1 picosecond and $3 \sim 6 \text{ ps}$. Last but not least, it seems that the differential reflectance has no significant dependence on the probe power, but the signal-to-noise ratio of the differential reflectance spectrum is correlated with the probe power. In a word, this work not only investigates the ultrafast dynamics of unintentionally doped high purity n-type gallium arsenide, which provides a reference for other materials, but also offers the optimal experimental parameters of pump-probe spectroscopy.

Key words: Optoelectronics; Ultrafast lasers; Optical spectroscopy; Gallium arsenide; Pump-probe;

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61378040)资助

第一作者: 于钟慧(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为超快泵浦探测技术. Email: yu857808282@yahoo.com

导师(通讯作者): 张苏娟(1975-), 女, 研究员, 博士后, 主要研究方向为超快激光技术. Email: sjzhang1998@163.com

收稿日期: 2017-02-22; 录用日期: 2017-03-31

<http://www.photon.ac.cn>

Dynamics; Carrier lifetime

OCIS Codes: 320.2250; 320.7090; 320.7150; 140.7090; 300.6530

0 引言

砷化镓(GaAs)是常见的III-V族化合物,与硅、锗等传统半导体相比,GaAs半导体的直接带隙特性和较高的光吸收系数,使其更容易吸收和发射光子,而且GaAs在不同条件下多变的光电学性质使其成为研究光生载流子的典型半导体材料之一.在光电领域中GaAs普遍应用于光电探测器^[1]、红外发光二极管(LED)^[2]、激光二极管和太阳能电池^[3],而这些光电器件的性能通常受载流子寿命和能量转换效率制约.此外,随着激光技术的发展,超快光谱学广泛用于测量半导体^[4]、金属^[5]、纳米材料^[6]和异质结构^[7]中的电子、声子和激子的动力学.飞秒泵浦探测技术是通过两束光在空间位置的延迟来实现时间分辨,是最典型的超快光谱技术之一.

近年来,对于GaAs的超快动力学机制的研究层出不穷.Man等通过组合光谱分辨的光电显微镜和飞秒泵浦探测技术在II型二维InSe/GaAs异质结中得到了光生电子运动的影片,并对空间变化进行定量分析和理论建模后揭示了片状结构中特殊区域的超快电子动力学取决于相邻的片状结构(如薄厚程度)^[8].Hasegawa等利用泵浦探测反射谱和蒙特卡罗模拟研究了未掺杂GaAs和n型GaAs外延结构中的光生电子动力学机制,发现 Γ -L谷间散射表现出阈值性,然后随初始过剩能量增加而增加^[9].Basak等利用400 nm泵浦脉冲研究了体GaAs中相干声子强度与次线性载流子密度的依赖性,发现了动力学由重空穴和卫星L谷电子的载流子动量散射时间支配^[10].Wells等利用泵浦-探测技术测量低温生长GaAs的瞬态反射谱,将双极瞬态实验信号与理论模型结合,从而把载流子动力学过程分为两部分:超快电子俘获过程和光学吸收过程^[11].Fukumoto等构建了时间分辨光电子显微镜系统,使GaAs单晶在超快和超小量级的光生电子动力学直接成像,发现GaAs表面的纳米级缺陷中的光生载流子寿命,比非缺陷区域中观察到的寿命短得多^[12].此外,他们还通过该系统直接观察到未掺杂(100)GaAs晶片中光生电子的复合和其表面由外加电场驱动电子的横向运动,将光电发射信号的上升沿归因于热电子的产生,并发现GaAs的结构缺陷和带内能量弛豫有助于信号的快速衰减^[13].Lebedev等使用飞秒可见泵浦-探测技术测量时间分辨吸收光谱,研究表面处理对n型GaAs(100)中光生载流子动力学的影响,揭示了用硫化物与半导体表面相互作用的不同机理引起表面复合速度的降低,且降低速率取决于溶剂^[14].总的来看,近期的研究主要是关注在不同实验条件下GaAs半导体的新颖结构的差分反射谱以及其背后的超快动力学机制.然而,激光器参数设置是否都对n型GaAs的差分反射谱有影响?一般是固定设置激光器的参数而被忽略.实际上,激光器的准确设置,对光生载流子动力学机制的定量分析有显著影响,例如功率、中心波长.因此,本文针对这些光学参数对动力学机制的影响深入分析,发现光生载流子动力学过程可分为光激发、初始散射和复合三个过程.实验结果还表明,由于探测光主要起检测作用,探测功率不影响载流子动力学寿命,仅仅影响复合过程的信噪比.此外,信噪比同样也受激光中心波长的影响.

1 实验材料

实验所用的未故意掺杂高纯n型GaAs属于高阻单晶基片,其位错密度 $\leq 5\ 000\ \text{cm}^{-2}$,迁移率在 $5\ 380 \sim 5\ 780\ \text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$ 之间,电阻率 R 在 $1.42 \times 10^8 \sim 1.52 \times 10^8\ \Omega \cdot \text{cm}$ 之间.GaAs的能带结构见图1.其导带分别有一个直接带隙 Γ 能谷,两个卫星能谷:X能谷和L能谷,常温下,三个能谷与价带顶的能量差分别为1.42 eV、1.71 eV和1.9 eV^[10, 15-16].当超短脉冲光能量大于禁带宽度时,GaAs半导体内的电子吸收一定能量的光子后,按照半导体材料能带理论^[16],价带顶的部分电子被激发到导带形成自由载流子,随后这些载流子会

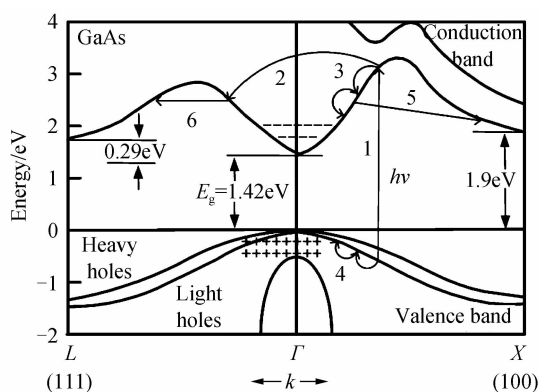


图1 GaAs能带结构

Fig. 1 Energy band diagram of GaAs

通过谷间散射,谷内散射,载流子-载流子散射和载流子扩散等过程来传递能量^[17-18].图1中,箭头1表示光激发过程,箭头2、3表示 Γ 谷的电子通过发射纵波光学声子的谷内散射,箭头4表示空穴通过发射纵波光学声子的谷内散射,箭头5、6表示从 Γ 谷到 $L(X)$ 谷的谷间散射.

2 实验装置和方法

为了研究 GaAs 光生载流子动力学机制,通过自主搭建的飞秒泵浦-探测系统对 GaAs 抛光面的反射率进行实验,其中抛光面是(100)面,实验装置见图2.由 Spectra-Physics 公司生产的自主锁模掺钛蓝宝石激光器(Ti:sapphire)产生一束脉宽为 25 fs、重复频率为 82 MHz 的飞秒高斯脉冲.该激光脉冲通过半波片和偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)分成偏振方向互相垂直的两束光,一束能量强的作为泵浦光,一束能量低的作为探测光.其中泵浦光束通过由计算机远程控制的时间延迟平台和调制频率为 1 kHz 的斩波器(Chopper)后,使其相对于探测光束延迟了时间 Δt ,通过一个焦距为 250 mm 的透镜(L_1)聚焦在 GaAs 基片的表面上.其中时间延迟平台的精确度为 0.02 mm(134 fs),样品表面上的泵浦光束有效直径约为 175.2 μm (半高全宽).探测光束由渐变中性密度衰减片(Gradient filter)调整了光强后,通过焦距为 40 mm 的透镜(L_2)聚焦到样品的相同区域,且直径略小于泵浦光光斑.探测光束的入射角非常小,近乎为零.从样品表面反射的探测光依次经由反射镜(M_1)和透镜(L_3)聚焦在硅探测器处.探测光反射率的变化被探测器检测并记录下来.同时,斩波器和探测器一同接入锁相放大器(lock-in),将反射光信号转换为电压信号,这样能够直观地获得未故意掺杂高纯 n 型 GaAs 内光生载流子超快弛豫过程.实验测量的差分反射率($\Delta R/R$)表示由泵浦光束引起的探测光反射率的相对变化,即 $(R' - R)/R$.其中 R' 和 R 分别是有泵浦光和无泵浦光时对应的探测光的反射率.由于温度对载流子寿命有较大影响,故整个实验过程都在恒温下(20 $^{\circ}\text{C}$ 左右)进行.

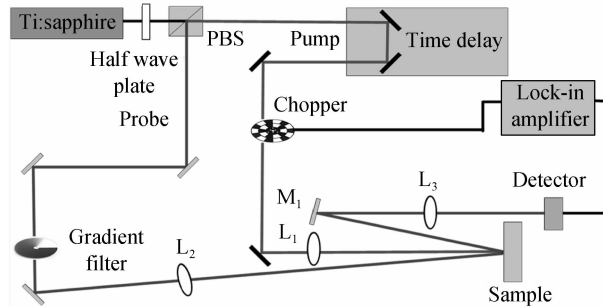


图2 超快反射光谱系统
Fig. 2 Ultrafast reflective spectroscopy system

3 实验结果及讨论

3.1 GaAs 差分反射率随中心波长的响应

受限于激光器波长限制,当带宽低于 30 nm 时,中心波长仅能从 780 nm 连续调到 820 nm,泵浦光功率恒在 100 mW,探测光功率恒为 10 mW,依然能得到单色光激发和探测时 GaAs 晶片对应的一系列差分反射谱,如图 3(a)所示.从能带结构上来看,光子能量(1.515 eV~1.59 eV)均大于带隙($E_g = 1.42$ eV),满足从价带的顶部到谷的底部,产生非平衡载流子条件.但是它们均低于从价带顶到其他谷的能隙,因此可以排除光激发电子被散射到其他谷,仅在谷内发生电子-声子散射^[19],如图1箭头2、3.实验发现随着光子能量的增加,差分反射率峰值却减小,但噪声随光子能量增加而明显,如图3(b)所示.这是在不同波长条件下,提供的光子数目不同产生的结果.实验发现波长比较短时,光子能量比较高,光子数目相对比较少,激发到导带的电子相对比较少,吸收系数和反射系数改变都比较小;波长比较长时,光子能量比较低,光子数目相对比较多,激发到导带的电子相对比较多,吸收系数和反射系数改变都比较大.所以随着光子能量的增加,差分反射率峰值却减小.从能带结构上来看,泵浦光用作激发载流子,达到饱和吸收后,载流子与载流子的多种散射引起带填充和带隙重整化效应^[4,20],光子能量越高,光激发电子越远离带边缘,饱和吸收效应效率较低,多余的能量以热能的形式转移到晶格,从而信噪比降低.同时,复合曲线没有回到基线,是由于电子-空穴复合需要较长时间,载流子很长时间都停留在导带的较高能级.这与金钻明在同类直接带隙材料(CdTe 晶体)上得到的规律一致^[21].

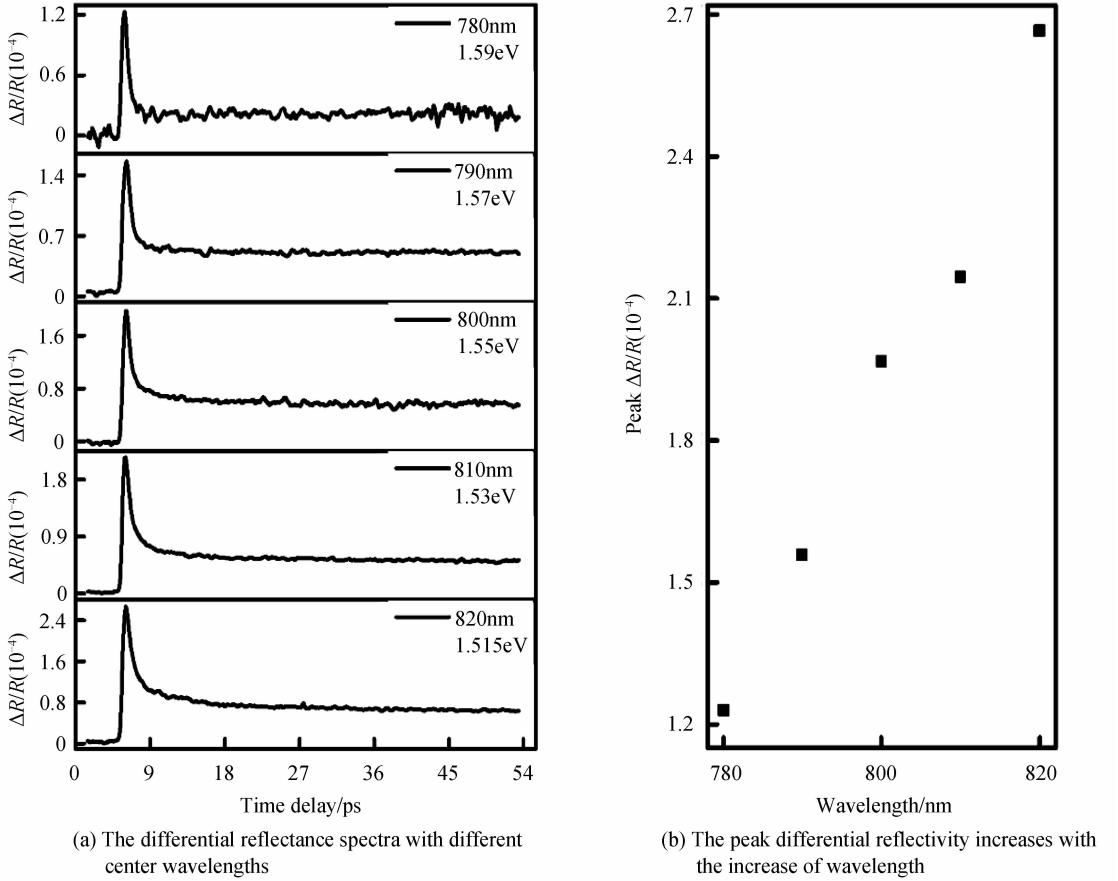


图3 不同中心波长下,差分反射率随时间延迟的变化

Fig. 3 Differential reflectivity with time delay corresponding to different center wavelengths

3.2 GaAs 差分反射率随泵浦功率的响应

通常情况下,若光是从真空(或空气)正入射到固体的表面,那么反射率可以表示为

$$R = \frac{(n_0 - 1)^2 + \kappa_0^2}{(n_0 + 1)^2 + \kappa_0^2} \quad (1)$$

式中, n_0 和 κ_0 分别是复折射率的实部和虚部,查阅文献[22],GaAs 的复折射率为: $\tilde{n} = n_0 + i\kappa_0 = 3.666 + 0.08i$.从麦克斯韦方程组和电磁波动方程出发,推导出吸收系数为

$$\alpha_0 = 4\pi\kappa_0/\lambda \quad (2)$$

在泵浦光激发 GaAs 半导体后,反射率会随着吸收系数的变化发生变化,即 $R' = R + \Delta R$.当仅考虑吸收对反射率的影响时,即 $\alpha = \alpha_0 - \Delta\alpha$,假设泵浦光激发样品的某一瞬间吸收系数的变化量也遵循关系, $\Delta\alpha = (4\pi/\lambda)\Delta\kappa$,那么就可以将反射率变化量 ΔR 写为

$$\Delta R = -\frac{2\lambda n_0 \kappa_0}{\pi [(n_0 + 1)^2 + \kappa_0^2]^2} \Delta\alpha \quad (3)$$

考虑到通过注入泵浦光来产生非平衡载流子,故在线性区间内建立与载流子浓度相关的吸收模型,可表示为

$$\alpha(N) = \alpha_0 (1 - N/N_s) \quad (4)$$

式中, N 为泵浦光激发的载流子浓度, N_s 为样品透明时饱和载流子浓度. $N = 0$ 表示没有泵浦光脉冲时吸收系数不发生改变,则吸收系数的变化量表示 $\Delta\alpha(N) = \alpha_0 (-N/N_s)$.因此差分反射率 $\Delta R/R$ 为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{8n_0 \kappa_0^2}{[(n_0 + 1)^2 + \kappa_0^2][(n_0 - 1)^2 + \kappa_0^2]} \frac{N}{N_s} \quad (5)$$

如果认为注入的光子全部被吸收,用于激发载流子,由文献[23]可知,当只考虑线性效应时,载流子浓度可以描述为

$$N = (1 - R)\alpha_0 \rho / h\nu \quad (6)$$

式中 $h\nu$ 是泵浦光光子能量, ρ 是样品表面上泵浦光的峰值能量密度, 由文献[24]可知, 满足

$$\rho = 4 \ln 2 P / f \pi \omega^2 \quad (7)$$

式中, f 是激光的重复频率, ω 是泵浦光束有效直径, 经实验测量, $R = 0.328$. 查阅文献[22], GaAs 的吸收系数 $\alpha_0 = 1.221 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$. 故从理论上得到泵浦功率 P 和差分反射率 $\Delta R/R$ 的关系, 并建立模型.

保持探测光平均功率为 10 mW 不变, 调整泵浦光功率分别为 100 mW、120 mW、160 mW、180 mW、200 mW、220 mW、240 mW、260 mW, 由等式(6)和(7)计算出对应的载流子浓度分别为 $5.734 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.881 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $9.175 6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.032 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.146 9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.261 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.376 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.491 0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 在该条件下, 通过中心波长为 800 nm 的激光激发未故意掺杂高纯 n 型 GaAs 而得到在不同泵浦功率中, 差分反射率随时间延迟的演化, 如图 4(a) 所示. 在延迟时间分别为 0 ps、0.5 ps 时都得到泵浦功率和差分反射率的线性关系, 即在实验中, 任意延迟时间的差分反射率和泵浦功率呈线性相关, 并拟合出相应的函数关系式, 如图 4(b) 图例所示. 由两个关系式的斜率与等式(5)的系数相类比, 计算出 $N_s = (3.590 1 \pm 0.310 3) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 该值大于实验中注入的载流子浓度, 故实验中载流子浓度始终处在线性区间内, 未发生非线性效应. 进而可以推测当泵浦功率突破 N_s 所对应的功率时, 该模型需修正为线性效应和非线性效应共同作用的模型, 差分反射率和泵浦功率也失去线性相关性.

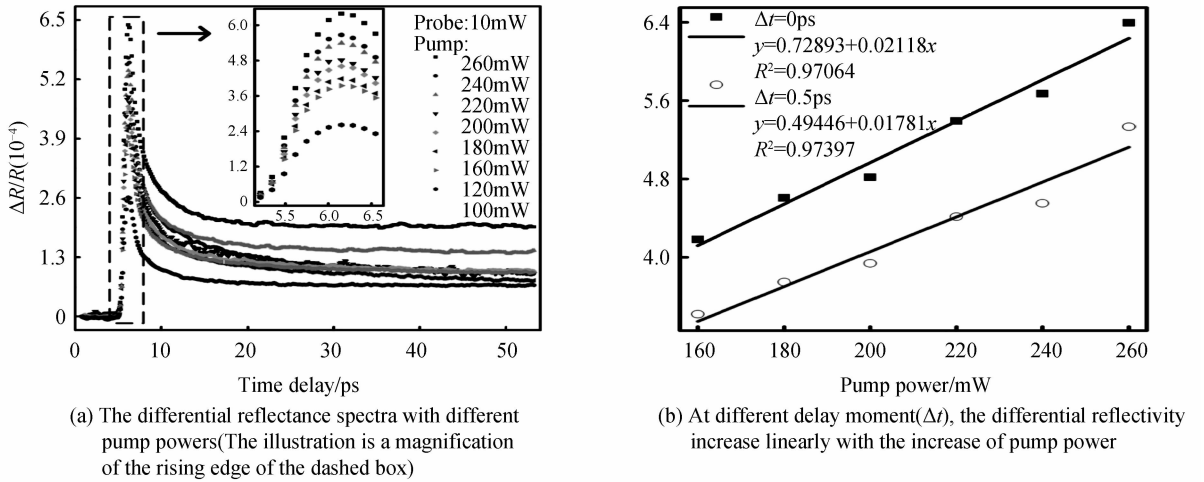


图 4 不同泵浦功率下, 差分反射率随时间延迟的变化

Fig. 4 Differential reflectivity with time delay corresponding to different pump powers

表 1 不同泵浦功率对应的复合过程时间常数

Table 1 The recombination time constant of fitting curve corresponding to different pump powers from Fig. 4(a)

Pump power/mW	160	180	200	220	240	260	
Time constant/ps	τ_1	1.058 ± 0.030	1.001 ± 0.029	1.126 ± 0.046	1.074 ± 0.031	1.030 ± 0.027	1.066 ± 0.032
	τ_2	3.921 ± 0.052	4.62 ± 0.078	4.840 ± 0.095	5.48 ± 0.091	6.471 ± 0.125	6.981 ± 0.087

此外, 差分反射率随延迟时间的演化分为三个过程:

1) 光激发过程: 由于 GaAs 是直接带隙半导体, 故当光子能量大于带隙时, 满带上的电子发生带间直接跃迁, 被激发到导带, 产生非平衡载流子, 很容易达到饱和和吸收, 如图 1 箭头 1 所示, 因此探测光反射率瞬间变大, 由插图可知, 不同光生载流子浓度下, 上升沿近似恒定在 $804 \pm 67 \text{ fs}$, 其时间常数由激光脉冲宽度和样品厚度决定, 后期工作会给出详细论证;

2) 初始散射过程: 非平衡载流子经历 300 fs 以内的平台期, 此时反射率近乎不变. 但由于该过程随着泵浦功率增大而加快, 且受限于时间延迟平台的步长精度, 因而在图 4(a) 插图中变得不明显, 特别是 100 mW 以上时. 从物理机制来看, 其主要是在谷内通过载流子-载流子散射, 载流子-纵波光学声子散射多种微观过程^[10, 25], 较快地离开激发态. 由文献[26]可知, 导带内的载流子散射时间大概在 30 fs, 由于重空穴的有效质量是轻空穴的 10 倍, 则价带内载流子散射时间约 300 fs, 与本文实验结果一致;

3) 复合过程: 通过对图 4(a) 下降沿进行分段拟合, 如表 1 所示. 未故意掺杂高纯 n 型 GaAs 的导电性较差, 则先通过直接复合的方式复合, 其时间常数为 τ_1 . 由于 800 nm 的泵浦光将载流子激发到价带的同一位

置,且载流子浓度处在线性区间内,所以直接复合的时间常数恒定在 1 ps. 值得强调的是,受时间延迟平台的测量范围的限制,差分反射率不能记录到重新回到基线的时间段,故不是本文研究的重点. 因而光生载流子并没有复合完成,远远不止持续 $\tau_2 = 3 \sim 6$ ps.

总的来说,这三个过程并不是相互独立依次发生,而是存在相互叠加的.

3.3 GaAs 差分反射率随探测功率的响应

当 800 nm(1.55 eV) 的泵浦光功率稳定在 100 mW, 调整 800 nm(1.55 eV) 的探测光功率分别为 7 mW、11 mW、14 mW. 实验表明探测功率不影响差分反射率信号, 仅仅影响反射谱的信噪比. 且差分反射谱的形状取决于泵浦光波长、探测光波长、泵浦光浓度和陷阱密度^[27], 与图 5 实验结果一致. 另外, 相比 7 mW、11 mW, 当探测光功率为 14 mW 时, 信号波动较大, 从实验设置上来解释这一现象, 实验中一束能量强的泵浦光和另一束能量低的探测光, 它们都来自同一光源, 所以它们都能够把电子激发到导带. 在实验中为了尽量降低探测光的激发作用, 它的功率与泵浦光的功率比较必须可以忽略才行. 但是如果太低, 也会降低信噪比, 影响测量结果.

因此折中考虑, 在实验中应选取功率适当小的探测光, 往往探测光比泵浦光功率低一个数量级比较好, 也就是 10 : 1.

4 结论

为了具体分析激光器参数对载流子动力学机制的影响, 采用泵浦-探测技术分析室温下在不同的泵浦光功率、探测光功率、中心波长的条件下未故意掺杂高纯 n 型 GaAs 的差分反射谱. 在不同中心波长条件下, 提供的光子数目不同, 差分反射率峰值随光子能量的增加而减小, 多余的能量以热能的形式转移到晶格, 从而信噪比降低. 在不同的泵浦功率下, 建立功率和差分反射率的理论模型, 并拟合不同延迟时间下功率和差分反射率的实验曲线, 推算出最大线性载流子浓度 $N_s = (3.5901 \pm 0.3103) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 并将光生载流子动力学过程分为 3 个过程: 804 ± 67 fs 的光激发过程、134 ~ 268 fs 的初始散射过程、 $\tau_1 = 1$ ps 和 $\tau_2 = 3 \sim 6$ ps 的复合过程. 探测光只起探测作用, 不影响差分反射谱, 但过高或过低都影响反射谱的信噪比. 在此基础上, 这不仅为设计和优化实验提供了有效的实验参数, 还为探究更多闪锌矿晶体的动力学提供实验对照.

参考文献

- [1] NUSIR A I, HILL A M, MANASREH M O, *et al.* Near-infrared metal-semiconductor-metal photodetector based on semi-insulating GaAs and interdigital electrodes[J]. *Photonics Research*, 2015, **3**(1): 1-4.
- [2] LIU X, ZHAO G, ZHANG Y, *et al.* Semiconductor laser monolithically pumped with a light emitting diode operating in the thermoelectrophotonic regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(8): 081116-081118.
- [3] TIAN Bing-tao, WANG Xiao-dong, NIU Yan-yan, *et al.* Sol-gel preparation of graded-refractive-index antireflective coatings for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 128-134.
田冰涛, 王晓栋, 牛彦彦, 等. 溶胶-凝胶法制备 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池梯度折射率减反膜[J]. *光子学报*, 2016, **45**(8): 128-134.
- [4] BOSE R, PELC J S, Vo S, *et al.* Carrier dynamics in GaAs photonic crystal cavities near the material band edge[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 12732-12739.
- [5] VALLÉE F. Ultrafast spectroscopy of metals[J]. *Comptes Rendus del Académie des Sciences-series IV-physics*, 2001, **2**(10): 1469-1482.
- [6] GRUMSTRUP E M, GABRIEL M M, CATING E E M, *et al.* Pump-probe microscopy: Visualization and spectroscopy of ultrafast dynamics at the nanoscale[J]. *Chemical Physics*, 2015, **458**: 30-40.
- [7] GLINKA Y D, TOLK N H, LIU X, *et al.* Electro-optic nature of ultrafast pump-probe reflectivity response from multilayer semiconductor heterostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(4): 043708-043717.
- [8] MAN M K L, MARGIOLAKIS A, DECKOFF-JONES S, *et al.* Imaging the motion of electrons across semiconductor

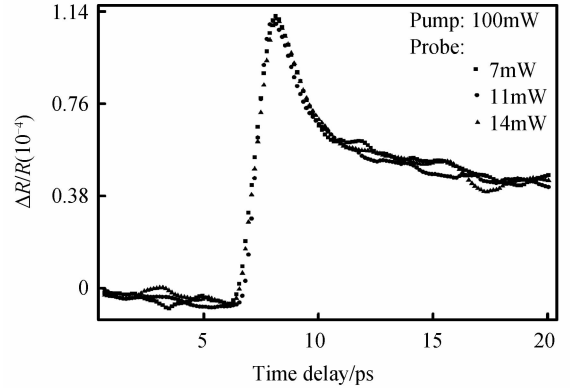


图 5 不同探测功率下, 差分反射率随时间延迟的变化
Fig. 5 Differential reflectivity with time delay corresponding to different probe powers

- heterojunctions[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, **12**(1): 36-40.
- [9] HASEGAWA T, NAKAYAMA M. Unique characteristics of nonequilibrium carrier transport dynamics in an undoped GaAs/n-type GaAs epitaxial structure[J]. *Applied Physics Express*, 2016, **9**(7): 071001-071004.
- [10] BASAK A K, PETEK H, ISHIOKA K, *et al.* Ultrafast coupling of coherent phonons with a nonequilibrium electron-hole plasma in GaAs[J]. *Physical Review B*, 2015, **91**(12): 125201-125215.
- [11] WELLS N P, BELDEN P M, DEMERS J R, *et al.* Transient reflectivity as a probe of ultrafast carrier dynamics in semiconductors: A revised model for low-temperature grown GaAs[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(116): 073506-073515.
- [12] FUKUMOTO K, ONDA K, YAMADA Y, *et al.* Femtosecond time-resolved photoemission electron microscopy for spatiotemporal imaging of photogenerated carrier dynamics in semiconductors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(8): 083705-083710.
- [13] FUKUMOTO K, YAMADA Y, ONDA Ken, *et al.* Direct imaging of electron recombination and transport on a semiconductor surface by femtosecond time-resolved photoemission electron microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(104): 053117-053121.
- [14] LEBEDEV M V, IKEDA K, NOGUCHI H, *et al.* Effect of surface treatment with different sulfide solutions on the ultrafast dynamics of photogenerated carriers in GaAs(100)[J]. *Applied Surface Science*, 2013, **267**: 185-188.
- [15] CALLAN J P, KIM M T, HUANG L, *et al.* Ultrafast electron and lattice dynamics in semiconductors at high excited carrier densities[J]. *Chemical Physics*, 2000, **251**(1-3): 167-179.
- [16] OTHONOS A. Probing ultrafast carrier and phonon dynamics in semiconductors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **83**(4): 1789-1830.
- [17] KORN T. Time-resolved studies of electron and hole spin dynamics in modulation-doped GaAs/AlGaAs quantum wells [J]. *Physics Reports*, 2010, **494**(5): 415-445.
- [18] GAMALY E G. The physics of ultra-short laser interaction with solids at non-relativistic intensities[J]. *Physics Reports*, 2011, **508**(4-5): 91-243.
- [19] LOU S. Ultrafast spectroscopy of semiconducting and multiferroic materials[M]. ProQuest, 2007.
- [20] PRABHU S S, VENGURLEKAR A S. Dynamics of the pump-probe reflectivity spectra in GaAs and GaN[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(12): 7803-7812.
- [21] JIN Zuan-ming, MA Hong, LI Dong, *et al.* Carrier dynamics of intrinsic CdTe by pump-probe reflection spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2343-2346.
金钻明, 马红, 李栋, 等. 抽运-探测反射技术研究本征 CdTe 的载流子动力学[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2343-2346.
- [22] ASPNES D E, STUDNA A A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV[J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1983, **27**(2): 985-1009.
- [23] SABBABH A J, RIFFE D M. Femtosecond pump-probe reflectivity study of silicon carrier dynamics[J]. *Physical Review B*, 2002, **66**(16): 165217-165227.
- [24] KUMAR N, HE J Q, HE D W, *et al.* Charge carrier dynamics in bulk MoS₂ crystal studied by transient absorption microscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(13): 133702-133707.
- [25] HEYWOOD S L. Ultrafast acoustoelectric effects in semiconductor devices[D]. University of Nottingham, 2016.
- [26] LIN W Z, FUJIMOTO L G, IPPEN E P, *et al.* Femtosecond carrier dynamics in GaAs[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **50**(3): 124-126.
- [27] SAVARD S, ALLARD J F, BERNIER M, *et al.* Photoexcited carrier relaxation dynamics and terahertz response of photoconductive antennas made on proton bombarded GaAs materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(12): 124507-124513.