

# 基于 Photo-CELIV 测量载流子迁移率实验系统

张鹏 官二栋 彭辉 田春林

长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 搭建了一套基于 Photo-CELIV 测量载流子迁移率的实验系统。采用  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 脉冲激光器作为诱导光源,在 1~20 Hz 的工作频率下,实验系统可输出波长为 532 nm、脉宽为 10 ns 的激光脉冲,其能量在 0.1~1 mJ 范围内可调,光斑直径小于 2 mm,激光器持续工作 5 h 后的能量不稳定性为  $\pm 8\%$ 。该研究为半导体材料载流子迁移率的测量提供了一定的参考。

**关键词** 激光技术; 固体激光器; 光诱导线性增压载流子提取法; 载流子迁移率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.101407

## Experimental System for Measuring Carrier Mobility Based on Photo-CELIV

Zhang Peng Gong Erdong Peng Hui Tian Chunlin

College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** An experimental system for measuring carrier mobility based on Photo-CELIV is built. With a pulsed  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG laser as an induction light source and under the operating frequency ranging from 1 Hz to 20 Hz, the whole system has an output laser with a wavelength of 532 nm, a pulse width of 10 ns, the tunable energy ranging from 0.1 mJ to 1 mJ, and a spot diameter being less than 2 mm. The laser energy instability after continuous work over 5 h is  $\pm 8\%$ . The study here provides certain reference for the measurement of carrier mobility in semiconductor materials.

**Key words** laser technique; solid laser; Photo-CELIV; carrier mobility

**OCIS codes** 140.3460; 140.3580; 140.3450; 120.4570

## 1 引言

随着半导体材料器件开发与应用的飞速发展,人们越来越清晰地认识到,半导体材料中载流子迁移率是影响半导体器件性能的重要因素之一<sup>[1-5]</sup>。载流子迁移率主要是用来衡量半导体材料中载流子的传输能力<sup>[6-8]</sup>,它直接反映了载流子在外部物理场作用下的动力学特征<sup>[9-10]</sup>。因此,载流子迁移率的测量是半导体材料器件研究的核心问题之一。光诱导线性增压载流子提取法(Photo-CELIV)是一种有效测量载流子迁移率的方法<sup>[11-15]</sup>。考虑到实验样品的实际情况,本文设计并研制了一套基于 Photo-CELIV 测量半导体材料载流子迁移率的实验系统。基于该系统,可利用单脉冲能量较大的激光器来测量镀膜半导体材料的载流子迁移率。经过近一年的实验测量,激光器的稳定性得到了很好的验证,激光光斑经过调节后能够完全辐照在半导体材料样品上。

收稿日期: 2016-06-14; 收到修改稿日期: 2016-06-14; 网络出版日期: 2016-09-19

基金项目: 国家 863 计划(2012AAXX090)

作者简介: 张鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事激光应用技术方面的研究。

E-mail: 2014200051@mails.cust.edu.cn

导师简介: 田春林(1972—),男,博士,副研究员,主要从事光机电一体化方面的研究。

E-mail: 48851795@qq.com(通信联系人)

## 2 实验系统

基于 Photo-CELIV 测量载流子迁移率的实验装置如图 1 所示,实验系统由激光诱导子系统、光学调整子系统、信号采集子系统以及样品平台子系统组成。

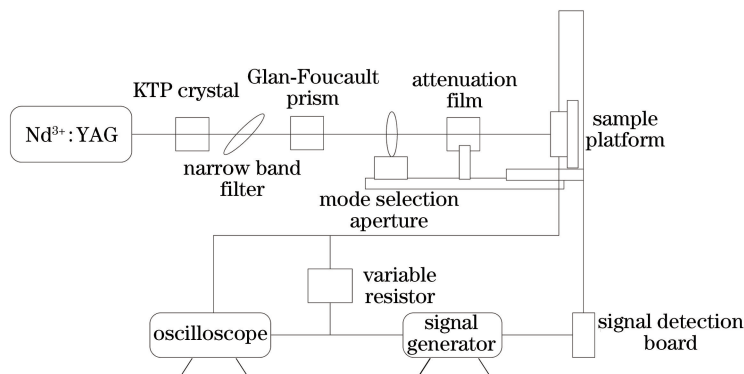


图 1 基于 Photo-CELIV 测量载流子迁移率实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system for measuring carrier mobility based on Photo-CELIV

光学诱导子系统主要是脉冲 Nd<sup>3+</sup>:YAG 固体激光器。为了确保诱导激光的光束质量,激光器的谐振腔采用平凹腔结构,几何腔长为 375 mm,该谐振腔结构能够保证激光光束具有较好的光束质量。采用电光调 Q 技术,实现稳定工作时激光脉冲宽度为 10 ns,输出波长为 1064 nm。

光学调节子系统包括光学倍频装置、光学滤波装置、能量调节装置、光束整形装置、小孔选模装置以及能量衰减装置。其中光学倍频装置是利用 8 mm×8 mm×5 mm 的 KTP 晶体将 1064 nm 激光倍频输出 532 nm 激光,由于 KTP 晶体的倍频效率最高只能达到 50% 左右,为了保证诱导光中只有 532 nm 激光,采用光学滤光片滤除 1064 nm 激光。结合马吕斯定律,采用格兰-付科棱镜将输出的 532 nm 激光进行能量衰减调节,实现 532 nm 激光输出能量 0.1~1 mJ 的线性调节。采用伽利略望远镜结构的光学系统压缩激光光束发散角,并在样品台与激光器之间放置一个直径为 1.5 mm 的小孔光阑进行小孔选模,确保辐照在样品表面的激光光束为光斑直径小于 2 mm 的准高斯光束。为了进一步减小系统误差,在选模小孔光阑和样品之间加入光学衰减片,根据不同的衰减倍数计算每次辐照在样品表面的激光能量。

信号采集子系统包括信号发生器、示波器以及由可变电阻组成的闭合电路。在实验过程中,信号发生器产生三角波信号并加载在半导体样品两端,通过改变三角波的参数来改变加载在半导体样品两端的电信号参数,通过调节可变电阻可以改变加载在半导体材料两端的电压值,示波器主要用来测量可变电阻两端的电压变化量。

样品平台子系统主要由精密调整架、电路板等组成,样品由导电银箔、铜片、电路板组成。每片电路板上均真空镀有 6~8 片 5 mm×2 mm 的样品,电路板固定在五维精密调整架上,能够精密移动样品位置。半导体样品厚度在 150~250 nm 范围内,诱导激光能量不能过大,否则半导体样品会被击穿,无法实现载流子迁移率的测量。因此,该实验要求诱导激光的输出波长为 532 nm,单脉冲能量最大不能超过 1 mJ,激光辐照在样品表面的光斑直径不超过 2 mm,输出模式为准 TEM<sub>00</sub>,输出能量的不稳定性小于等于 10%,模输出脉宽为 10 ns,脉冲频率小于等于 20 Hz。

## 3 实验结果与分析

激光电源的电容为 100 μF,根据电容充放电能量公式

$$P = \frac{1}{2}CU^2, \quad (1)$$

式中  $C$  为电容容量, $U$  为外加电压。从(1)式可以看出,增加外部电压可增加抽运源的抽运能量,激发工作物质产生激光。在激光器输出方向距离输出镜 440 mm 处,固定安装一台激光能量计,为了尽可能减小测量误差,在实验测量过程中保持激光能量计的位置不变。

在不同工作频率  $f$  下,静态激光输出能量与抽运源输入电压的关系如图 2 所示。从图中可以看出,在不同的工作频率下,1064 nm 近红外激光的输出能量随着抽运源输入电压的增加而增加。随着激光电源输入能量逐渐增大,Nd<sup>3+</sup>:YAG 晶体棒的热透镜效应逐渐加剧,导致 1064 nm 激光输出能量不稳定。另外,在抽运源电压相同的情况下,不同工作频率的激光输出能量相差不大。抽运源工作频率越大,激光输出能量越大。

产生这种现象的主要原因可能是激光在谐振腔内的能量传递方式。根据激光的产生机理可知,抽运源激发工作物质产生能级跃迁,在工作物质内部的上能级产生大量反转粒子,这些反转粒子处于上能级状态时存在一定的荧光寿命。当抽运工作频率为 5 Hz 时,抽运源的周期为 200  $\mu$ s,即在一个周期内会产生 5 次抽运能量,而 Nd<sup>3+</sup>:YAG 晶体的荧光寿命在 250  $\mu$ s 左右,因此抽运源每次抽运能量的作用时间小于反转粒子处于工作物质上能级的荧光寿命。在第一次抽运源抽运工作物质所产生的反转粒子没有完全跃迁至下能级之前,第二次抽运源能量再次作用到工作物质上,产生更多的反转粒子数,反转粒子数的增加意味着激光输出能量的增加。以此类推,抽运源的工作频率越高,产生的反转粒子数越多,激光的输出能量越高。

利用光电传感器和美国 Tektronix 公司的 TDS2022 型示波器测量动态激光的脉冲宽度。在不同工作频率下,激光的脉冲宽度与抽运源输入电压的关系如图 3 所示。

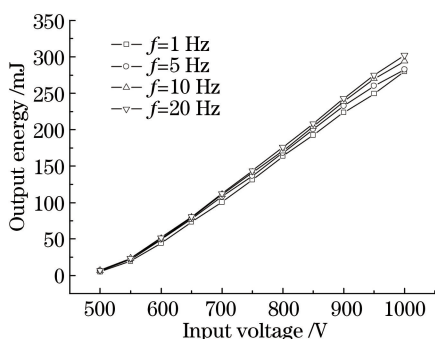


图 2 不同工作频率下静态激光输出能量与抽运源输入电压的关系

Fig. 2 Relationship between static laser output power and input voltage of pump source at different operating frequencies

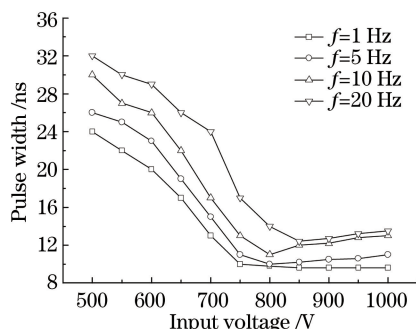


图 3 不同工作频率下激光脉宽与抽运源输入电压的关系

Fig. 3 Relationship between laser pulse width and input voltage of pump source at different operating frequencies

从图 3 可以看出,随着抽运源电压的增加,激光的脉宽逐渐减小。在同一输入电压下,随着抽运源工作频率的增大,激光脉宽逐渐增加。但在一定的抽运源电压范围内,激光脉宽随着抽运源电压的增加而减小。当抽运源工作频率大于 1 Hz,输入电压大于 850 V 时,激光脉宽反而增宽了,这种增宽趋势随着抽运源工作频率的增大而增大。抽运源能量和工作频率的增加加剧了工作物质 Nd<sup>3+</sup>:YAG 晶体棒的热透镜效应,使得激光脉宽出现先变窄后增宽的现象。通过实验获得的数据可知,当工作频率为 5 Hz、输入电压大于 800 V 时,激光脉冲宽度和输出能量能够达到最佳值,实验中测量的最佳条件下的脉冲波形如图 4 所示。

通过对各子系统的精确调节,在系统稳定工作的情况下,最终获得了单脉冲能量为 0.1~1 mJ 可调、脉

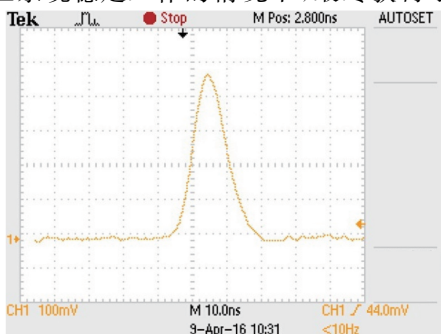


图 4 当工作频率为 5 Hz、输入电压为 800 V 时,532 nm 激光的脉冲波形图

Fig. 4 Pulse waveform of 532 nm laser at input voltage of 800 V and operating frequency of 5 Hz

宽为 10 ns、距离激光输出镜 0.8 m 处光斑直径小于等于 2 mm 的 532 nm 激光,连续运行 5 h 后的能量不稳定性为  $\pm 8\%$ 。

## 4 结 论

研制了一套基于 Photo-CELIV 测量载流子迁移率的实验系统,系统工作稳定,操作方便,能够有效地测量半导体材料的载流子迁移率。利用马吕斯定律,使用格兰-付科棱镜实现了固体激光器单脉冲能量的线性调节。经过小孔选模后,激光光斑直径小于等于 2 mm,确保了激光光束完全辐照在半导体样品材料上。该研究为半导体材料载流子迁移率的测量提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- Osterbacka R, Pivrikas A, Juska G, *et al.* Mobility and density relaxation of photo generated charge carriers in organic materials[J]. *Current Applied Physics*, 2004, 4(5): 534-538.
- Juska G, Arlauskas K, Viliunas M, *et al.* Extraction current transients: New method of study of charge transport in microcrystalline silicon[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(21): 4946-4949.
- Juska G, Arlauskas K, Viliunas M, *et al.* Charge transport in  $\pi$ -conjugated polymers from extraction current transients[J]. *Physical Review B*, 2000, 62(24): R16235.
- Genevicius K, Osterbacka R, Juska G, *et al.* Charge transport in  $\pi$ -conjugated polymers from extraction current transients[J]. *Thin Solid Films*, 2002, 403-404: 415-418.
- Chen Daiyao, Yu Xuecai, Wang Pinghe, *et al.* Study of the influence of cliff layer on uni-traveling-carrier photodetector[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0317011.  
陈代尧, 余学才, 汪平河, 等. 崖层对单行载流子光电探测器的影响研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0317011.
- Li Danni, Xu Yingtian, Xu Li, *et al.* Theoretical simulation analysis the quantum efficiency of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  photodetectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1204002.  
李丹妮, 徐英添, 徐 莉, 等.  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  光电探测器量子效率的理论仿真分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1204002.
- Xu Zhaopeng, Zhang Wenxiu, Wang Yongzhen, *et al.* First principle study on the effect of Pb-doping on optical band gap and conductivity of InI[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1216001.  
徐朝鹏, 张文秀, 王永贞, 等. Pb 掺杂对 InI 最小光学带隙和电导率影响的第一性原理研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1216001.
- Liu Yadong, Tian Jie, Song Xinchao, *et al.* Applications of combination hole injection layer in blue OLED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 102301.  
刘亚东, 田 杰, 宋新潮, 等. 组合空穴注入层在有机电致蓝光器件中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 102301.
- Qi Ying, An Junming, Wang Yue, *et al.* Principle and progress of silicon-organic hybrid electro-optic modulators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070004.  
齐 影, 安俊明, 王 玥, 等. 硅-有机材料混合光电调制器的原理及研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070004.
- Chen Zhenyu, Ye Tengling, Ma Dongge. Measurement methods for charge carrier mobility in organic semiconductors[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(5): 940-947.  
陈振宇, 叶腾凌, 马东阁. 有机半导体中载流子迁移率的测量方法[J]. *化学进展*, 2009, 21(5): 940-947.
- Xu Nanxin, Li Dian, Gao Jinwei, *et al.* The carrier mobility study of graphene covalently bonded with single-walled carbon nanotubes[J]. *Journal of South China Normal University (Nature Science Edition)*, 2015, 47(5): 28-32.  
许南鑫, 李 典, 高进伟, 等. 共价键结合的石墨烯和碳纳米管三维复合材料的载流子迁移率研究[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(5): 28-32.
- Liu Qianghu, Zhang Zihao, Liu Zhichun, *et al.* Study on measurement method of carrier mobility in weak photoconductive material[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4): 445-448.  
刘强虎, 张紫浩, 刘志春, 等. 弱电导材料中载流子迁移率的测量方法研究[J]. *激光技术*, 2014, 38(4): 445-448.

- 13 Zhu Jianzhuo, Du Huijing, Su Zisheng, *et al.* Simulation study on influence of the carrier mobility on the performances of organic solar cells[J]. Chinese J Luminescence, 2013, 34(4): 464-468.  
朱键卓, 杜会静, 苏子生, 等. 载流子迁移率对有机太阳能电池性能影响的模拟研究[J]. 发光学报, 2013, 34(4): 464-468.
- 14 Zhang Yating, Xu Zhangcheng, Yao Jianquan. Temperaturevariable time-of-flight measurement technique applied on carrier mobility in conducting polymer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0908005.  
张雅婷, 徐章程, 姚建铨. 共轭聚合物中载流子迁移率的变温飞行时间检测[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0908005.
- 15 Jiang Xiaoqing, Zhang Yan, Li Xin, *et al.* Charge carriers and their mobilities in films of a series of monosilylene-oligothienylene copolymers[J]. Acta Chimica Sinica, 2009, 67(23): 2655-2661.  
蒋晓青, 张 艳, 李 鑫, 等. 一系列单硅烷-寡聚噻吩共聚高分子膜中电荷载流子及其迁移率的研究[J]. 化学学报, 2009, 67(23): 2655-2661.