

· 光电器件与材料 ·

芳纶纤维复合材料在脉冲激光作用下的热损伤研究

王含妮, 谭勇, 张喜和

(长春理工大学 理学院, 长春 130022)

摘要:应用有限元软件建立三维脉冲激光辐照芳纶纤维复合材料的物理模型, 获得了芳纶纤维复合材料的温度场分布及其变化规律。结果显示, 随着激光功率密度的增大, 芳纶纤维复合材料的温度逐渐升高; 不同激光功率密度作用下的芳纶纤维复合材料的温度在光斑中心处最大并随着各位置到中心距离的增大而减小。为验证数值分析模型并更好的研究芳纶纤维复合材料的热损伤规律, 试验过程中选用不同功率密度的纳秒脉冲激光辐照芳纶纤维复合材料。研究结果表明, 数值模拟温度与实验温度吻合较好, 最大相对误差为 12.49%; 随着激光功率密度的增大, 芳纶纤维复合材料的焦化碳化面积逐渐增大, 熔融深度随之加深。

关键词:芳纶纤维复合材料; 温度场; 纳秒脉冲激光; 热损伤

中图分类号: O644.18

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0026-06

Research on Thermal Damage of Aramid Fiber Composites Acted by Pulse Laser

WANG Han-ni, TAN Yong, ZHANG Xi-he

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The physical model of three-dimensional pulse laser irradiation aramid fiber composites is established by finite element software. And the temperature field distribution and the change rules of aramid fiber composites are obtained. The results show that with the increasing of laser power density, the temperature of aramid fiber composites rises gradually. The temperature value of the composites acted by different laser power density is the maximum at facula center, and it decreases with the increasing of the distance between different points and center point. For verifying numerical analysis model and researching the thermal damage rule of aramid fiber composites, nanosecond pulse laser irradiation aramid fiber composites with different power density is chosen during the experiment. The research results show that numerical simulation temperature better accords with experimental temperature and the maximum relative error is 12.49%. With the increasing of laser power density, the coking and carbonized areas of aramid fiber composites increase gradually and the melt depth will gradually deepened.

Key words: aramid fiber composites; temperature field; nanosecond pulse laser; thermal damage

芳纶纤维最初作为国防材料而鲜为人知, 后因其具有超高强度、高模量, 以及耐酸性、耐碱性、耐高温等优良特性而广泛应用于民用领域。芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料, 是以丁腈橡胶为基体、芳纶纤维为增强体而合成的复合材料, 它具有高强度、高模量等优良特性。目前, 芳纶纤维复合材料在脉冲激光作用下的热损伤研究见刊较少, 民用领域多倾向于芳纶纤维复合材料的力学性能研

究。因此激光作用下芳纶纤维复合材料的热损伤研究具有重大意义。

激光与物质相互作用的研究主要分为理论研究方法^[1-3]、数值模拟方法^[4-6]及试验验证方法^[7-9]。文中应用 Comsol Multiphysics 有限元分析软件对激光辐照芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料建立三维模型进行计算, 得出芳纶纤维复合材料的温度场分布及其变化规律。试验过程中选用功率密度分别

为 8.539 kW/cm²、11.248 kW/cm²、12.131 kW/cm²、12.956 kW/cm²、13.839 kW/cm² 及 14.722 kW/cm² 的纳秒脉冲激光作用芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料,得到芳纶纤维复合材料的损伤区域表面温度及芳纶纤维复合材料的损伤规律。

1 数值模拟

1.1 热传导方程

芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料受到激光辐照后,将会引发材料局部急剧升温,材料出现熔融、烧蚀、气化等一系列热-力学行为。因此在与实际物理过程保持较高一致的前提下,对有限元求解做以下几点假设:(1)光束均匀假设。即假定激光光束分布均匀,脉冲作用时间内能量分布均匀;(2)各向同性假设。物体的弹性在每个方向都相等,物体的弹性常数与方向无关;(3)初始温度假设。器件的初始温度分布均匀,且均为室温;(4)绝热条件假设。即假定边界满足绝热条件,忽略各表面的热辐射及热对流损失。

根据上述假设,激光辐照芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的烧蚀过程由以下三维非稳态导热微分方程来描述,在笛卡尔坐标系下其一般形式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

其中, ρ 为密度; c 为比热容; t 为时间; k 为导热系数; Q 为单位时间内单位体积中内热源的生成热。

1.2 边界条件

(1)第一类边界条件指明了材料在边界上的温度数值^[10]。基于模型假设,器件各个部位的初始温度均为室温。因此第一类边界条件表达为

$$T_w = 293.15 \text{ K} \quad (2)$$

(2)第二类边界条件指明了材料在边界上的热流密度的值^[10]。由于边界符合绝热条件,即看做绝热边界。因此第二类边界条件表达为

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = 0 \quad (3)$$

其中, k 为导热系数; n 为法线方向。

1.3 温度场模拟及结果分析

利用 Comsol Multiphysics 有限元分析软件建立

三维芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料模型。由于芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料热力学参数多用于国防领域,因此复合材料部分参数在接近实际参数情况下参见其他复合材料。具体芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料热力学参数见表 1。

表 1 芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的热力学参数

密度/ kg/m ³	传热系数/ W/(m.K)	热容/ J/(kg.K)	杨氏模量/ Pa	热膨胀系数/ 1/K	泊松比/ 1
1 390	0.36	4.71	6.98×10 ⁷	-8.39×10 ⁻⁹	0.34

图 1a~图 1f 分别表示激光功率密度为 8.539 kW/cm²、11.248 kW/cm²、12.131 kW/cm²、12.956 kW/cm²、13.839 kW/cm² 及 14.722 kW/cm² 时,激光辐照芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的温度场分布图。

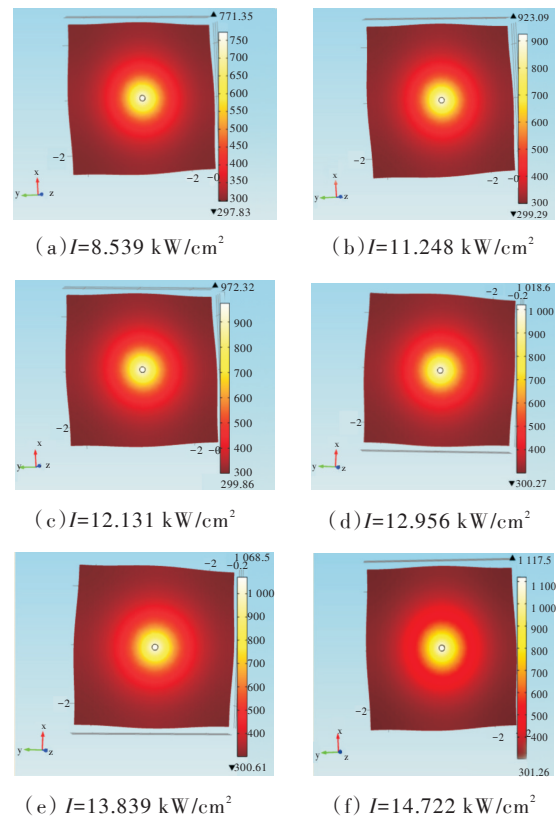


图 1 激光辐照芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的温度场分布图

将图 1 中在不同激光功率密度作用下的复合材料的最高温度提取出,并将其绘成图 2。

从图 2 中可以更加清晰地看出,激光辐照的芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的最高温度随着激光功率密度的增加而逐渐增大,即芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的损伤程度随着激光功率密度的增加而逐渐加大。

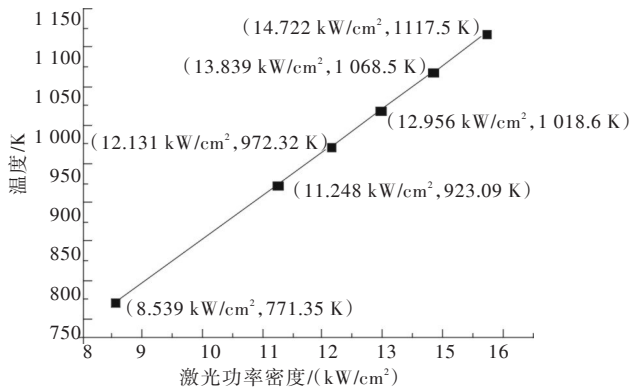


图2 最高温度随激光功率密度变化曲线

图3a~图3f分别表示激光功率密度为8.539 kW/cm²、11.248 kW/cm²、12.131 kW/cm²、12.956 kW/cm²、13.839 kW/cm²及14.722 kW/cm²时,激光辐照芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料最后时刻靶材中心点温度随靶材深度的变化曲线。其中横坐标中0代表激光直接作用点,靶材深度为0.15 mm。

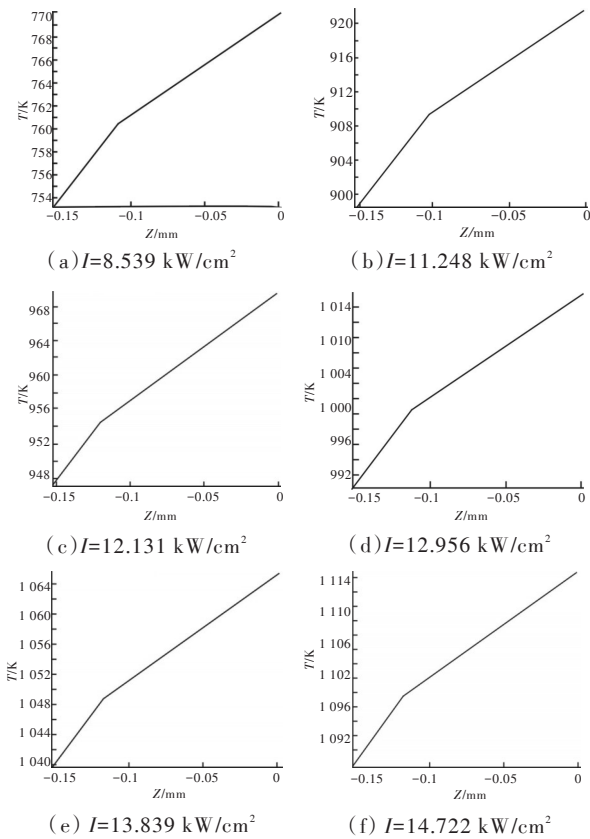


图3 激光辐照复合材料最后时刻靶材中心点温度随靶材深度的变化曲线

从图3中可以看出,不同激光功率密度下,芳纶纤维复合材料的温度最高点均位于激光光斑中心

的复合材料表层处,且随着靶材深度的增加温度逐渐降低,这是由于激光直接作用的复合材料表层吸收了更多的激光能量。

2 激光辐照试验

2.1 试验材料与设备

试验使用了芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料进行多次辐照试验。

试验装置由光纤激光器、分光镜、聚焦透镜、可移动三维样品平台、功率计、光谱仪组成。其中光纤激光器选用SPI激光公司生产的G4脉冲光纤激光器,波长为1064 nm,最大输出功率为1.778 × 10⁴ W;函数信号发生器选用EM1644型号;光谱仪选用美国海洋光学公司研制的QE65000型号的高精度科研级光谱仪。

2.2 光谱数据处理与分析

当脉冲激光作用芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料时,利用光谱仪对复合材料的辐射光谱进行实时检测,利用函数信号发生器调节频率,试验中频率选定为24 kHz、26 kHz、28 kHz、30 kHz、32 kHz、34 kHz,与之对应的功率密度分别为8.539 kW/cm²、11.248 kW/cm²、12.131 kW/cm²、12.956 kW/cm²、13.839 kW/cm²及14.722 kW/cm²。在每组试验中,光谱仪采用获取时间方法对光谱进行采集,光谱仪在获取时间内采集选定时段的光谱数据,选出每组数据中的最高峰数据。为方便对比,将6组原始数据中最高峰数据生成在一张光谱图内,见图4。

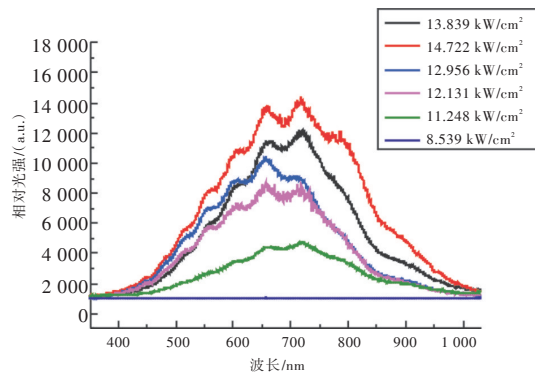


图4 原始数据中最高峰数据的光谱图

从图4中可以看出,随着激光功率密度的增

大,光谱仪探测到的复合材料靶材辐射光谱强度也随之增大。利用型号为LS1050-100的腔式黑体对光谱仪进行标定,将腔式黑体数据及原始数据进行进一步处理,得到修正后的光谱数据,再将修正后的谱线与标准普朗克谱线对比,得到不同激光功率密度下芳纶纤维复合材料的温度。利用Origin软件将实验所得到的温度随频率变化曲线绘图,如图5所示。

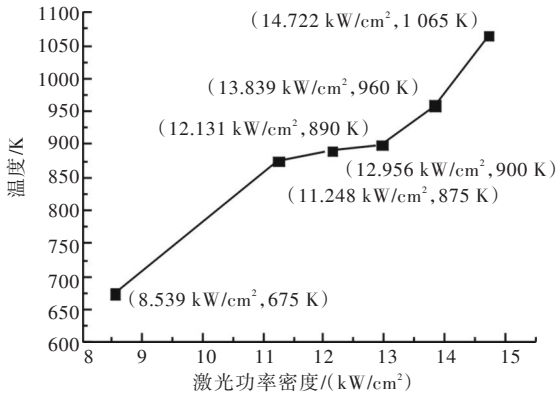


图5 最高温度随激光功率密度变化曲线

从图5中可以看出,随着激光功率密度的增加,由光谱仪探头接收到的被激光辐照的芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的辐射光谱温度越高,即芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的损伤越严重。

为更好对比模拟结果与试验结果,将图2和图5中各功率密度下芳纶纤维复合材料的最高温度数据提取出来,如图6所示。

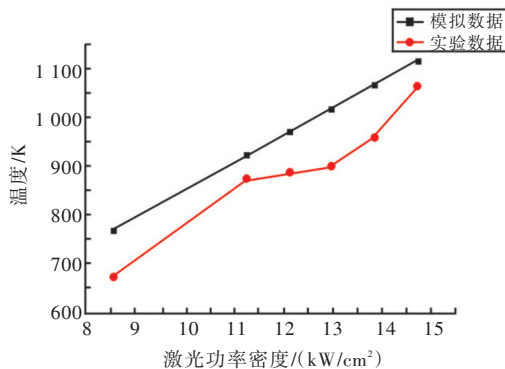


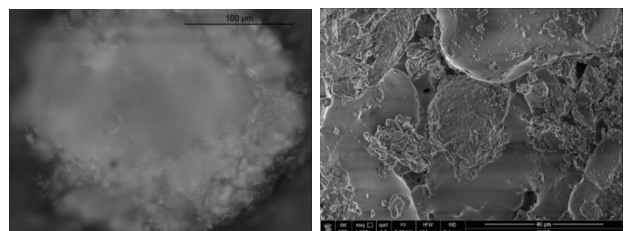
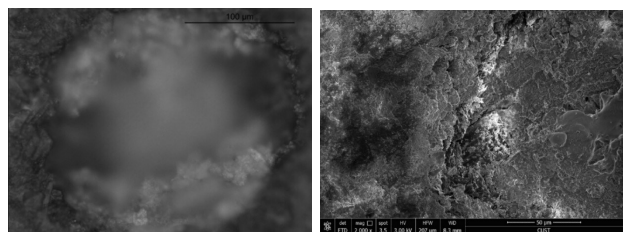
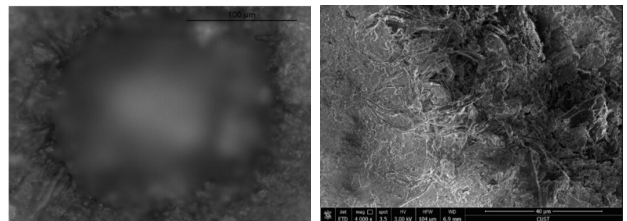
图6 模拟和试验中最高温度随激光功率密度变化曲线

从图6中可以看出,模拟温度略高于试验温度。这是由于在模拟过程中对材料及边界条件都进行了一系列的假设,例如对假设边界满足绝热条件

及忽略各表面热辐射及热对流损失等。而实验过程中这些假设都是不存在的,因此实验温度一定会低于模拟温度。根据图6中数据可计算出模拟温度与实验温度最大相对误差为12.49%,这说明数值模拟与实验结果具有较好的吻合度,因此可以证明有限元模型的正确性。

2.3 烧蚀形貌

芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的烧蚀后样品利用金相显微镜及扫描电子显微镜进行分析。当功率密度为8.539 kW/cm²时,复合材料温升不能使丁腈橡胶基体分解,因此图7不再赘述。图7a、图7c、图7e、图7g、图7i是利用金相显微镜拍摄,并且与激光功率密度8.539 kW/cm²、11.248 kW/cm²、12.131 kW/cm²、12.956 kW/cm²、13.839 kW/cm²及14.722 kW/cm²顺次对应。图7b、图7d、图7f、图7h、图7j是利用扫描电子显微镜拍摄,与激光功率密度8.539 kW/cm²、11.248 kW/cm²、12.131 kW/cm²、12.956 kW/cm²、13.839 kW/cm²及14.722 kW/cm²顺次对应。



(a) $I=11.248 \text{ kW/cm}^2$ (b) $I=11.248 \text{ kW/cm}^2$
(c) $I=12.131 \text{ kW/cm}^2$ (d) $I=12.131 \text{ kW/cm}^2$
(e) $I=12.956 \text{ kW/cm}^2$ (f) $I=12.956 \text{ kW/cm}^2$

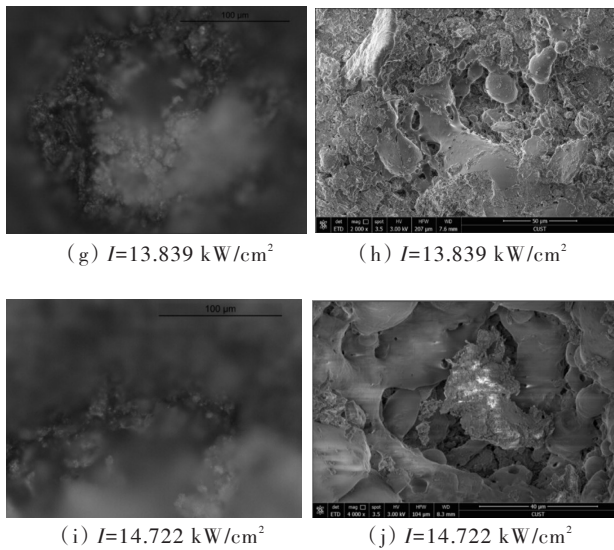


图7 烧蚀形貌图像

当激光瞬间作用在芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料上时,由于复合材料靶材局部受到突加载荷作用,突加载荷对复合材料的各质点扰动不可能同时发生,而要逐步从局部扰动区传送到未受扰动区,这在复合材料靶材中形成了应力波。应力波在复合材料靶材中传播时,幅度会衰减,后沿会变宽,当它由后自由面反射时,形成了拉深波,拉深波与入射波相互作用,将会造成材料局部损伤,引起层裂效应。从图7b及图7d中可以清晰观察到层裂效应这一现象。其中,图7b中可观察到抽离丁腈橡胶基体的芳纶纤维,这是由于芳纶纤维具有较高的结晶度致使纤维表面光滑,并且芳纶纤维具有较高的强度及韧性。当激光瞬间作用在复合材料上时,由于力学作用芳纶纤维被瞬间抽离丁腈橡胶基体。从图7d中可以看出,激光作用区域的端口非常整齐,这是由于复合材料的损伤是整体焦化碳化后的损伤,没有纤维拔出的痕迹。从图7b、图7d、图7f、图7h、图7j中可观察到熔融挥发后的丁腈橡胶基体,这是由于激光与复合材料相互作用时,激光能量在复合材料中迅速沉积,当某个局部温度升高到丁腈橡胶基体的熔点时,作为高分子有机化合物的丁腈橡胶基体将发生热分解反应。随着激光频率的增大,吸收激光能量的复合材料靶材将会在不同深度形成体热源,因此从图7f、图7h、图7j中可以看出,丁腈橡胶基体的熔融深度逐渐加深。当激光频率足够大时,材料迅速升温导致局部温度达到芳纶纤维的点燃温度,因此在图7a、图7c、图7e、图7g、图

7i中可观察到芳纶纤维的焦化、碳化现象。并且随着激光频率的增大,复合材料的烧蚀斑也逐渐增大,不同深度的芳纶纤维也依次出现焦化碳化现象。

3 结论

通过数值模拟与试验验证相结合的方法,对芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料在脉冲激光作用下的热损伤进行了研究,得出以下几点结论:

(1)有限元模型能够有效地模拟芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料在脉冲激光作用下的温度场分布。

(2)随着激光功率密度的增大,芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的温度逐渐升高;(3)不同激光功率密度作用下的芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的温度在光斑中心处最大并随着各位置到中心距离的增大而减小;(4)随着激光功率密度的增大,芳纶纤维增强丁腈橡胶基复合材料的焦化碳化面积逐渐增大,熔融深度随之加深。

参考文献

- [1] Landau H G. Heat conduction in a melting solid[J]. *Quart. Appl. Math.*, 1950, 8(1):81-94.
- [2] Goodman T R. The heat-balance integral and its application to problems involving a change of phase[J]. *Trans. ASME*, 1958, 80:335-342.
- [3] Zien T F. Integral solutions of ablation problems with time dependent heat flux[J]. *AIAA J*, 1978, 16(12):1287-1295.
- [4] 强希文.强激光与靶材相互作用的力学效应研究[J]. *激光与红外*, 2000, 30(3):141-144.
- [5] 吴非,雷勇军,周建平,等.强激光辐照下圆柱薄壳非线性振动分析[J]. *强度与环境*, 2005, 32(4):33-38.
- [6] 姜楠等.脉冲激光辐照 CCD探测器的应破坏效应数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(10):1009-1007.
- [7] Pan C T, Hocheng H. The anisotropic heat-affected zone in the laser grooving of fiber-reinforced composite material [J]. *Materials Processing Technology*, 1996, 62:54-60.
- [8] Alexander Wolvnski, Thomas Herrmann, Patrick Mucha, et al. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. *Physics Procedia*[J]. 2011, 12:292-301.
- [9] Puretzky A A, Geohegan D B, Schittenhelm H, et al. Time-resolved diagnostics of single wall carbon nanotube synthesis by laser vaporization[J]. *Applied Surface Science*, 2002, 197/198:552-562.

- [10] ZHANG Ning, LIU Cang-li, SUN Cheng-wei. The thermal-coupling effect of CW COIL beam on composites[R]. AIAA, 95-1930.

- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2005:44-45.

(上接第21页)

现,用一级点时,调节频率过程中会有二倍、四倍、六倍谱的出现。在调节声波频率的过程中,可以看出,频谱仪上对应的谱线频率有 98.250 000 MHz、196.500 000 MHz、98.298 156 MHz、197.266 666 MHz、296.200 000 MHz,基本符合二倍,四倍,六倍的规律,与理论吻合。

参考文献

- [1] 李明,李冠成.声光效应实验研究[J].应用光学, 2005, 26(6):23-27.
- [2] 李武军,王晓颖.声光 Naman-Nath 衍射特性的研究[J].大学物理, 2009, 28(9):25-27.
- [3] 刘闯.声光脉冲延时自外差拍频实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] Kohanzadeh Y, Auston D H. Measurement of low-absorption coefficients using the beat frequency shift between transverse modes of a laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1970, QE-6(7):475-477.

- [5] Weksler M, Vager Z, Neumann G. Measurement of a very high displacement sensitivity of the beat frequency in an He-Ne laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1980, QE-16(7):785-790.
- [6] Jettappa, Richard Rodrigues, Sharma Seshadri. Frequency error estimation in nonlinear systems using beats[J]. ASME Des Eng Div Publ DE. 1991, 37:91-96.
- [7] Pelusi M D, Liu H F, Novak D. THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser[J]. Appl. Phys. Lett, 1997, 71(4):449-451.
- [8] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Veloeimetry using heterodyne techniques[J]. Proc. SPIE, 2005, 5580:593-599.
- [9] 程乃平.声光信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:195.
- [10] 李港.驻波型声光调制器的理论研究[J].北京:北京工业大学学报, 1998, 24(1):49-54.

(上接第25页)

频谱覆盖范围更宽的超连续光源,这为白光激光的研究提供了帮助,可见波段内的超连续光源将会在激光显示等新一代显示技术中发挥巨大的作用,同时对于可见波段内的多种复杂体系的探测分析也提供了理论和实验的研究基础。

参考文献

- [1] Yin S S, Kim J H, Zhan C, et al. Supercontinuum generation in single crystal sapphire fibers[J]. Optics Communications, 2008, 281(5): 1113-1117.
- [2] Nakaema W M, Hao Z, Rohwetter P, et al. Supercontinuum generation in a sapphire fiber and comparison with a compact PCF based light source[C]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: JThB97.
- [3] Wang Q, Geng J, Luo et al. T. Mode-locked 2 μm laser with highly thulium-doped silicate fiber[J]. Opt. Lett., 2009, 34

- (23):3616-3618.
- [4] Alexander Sell, Günther Krauss, Rüdiger Scheu, et al. 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation[J]. Optics Express, 17(2).
- [5] 阮双琛,闫培光,郭春雨.光子晶体光纤超连续谱光源[J].深圳大学学报:理工版, 2011, 28(4):295-301.
- [6] 刘双龙,陈丹妮,刘伟.基于全正色散光子晶体光纤的超连续谱光源[J].物理学报, 2013, 62(18):184210-1-184210-7.
- [7] 冀翔,王小林,周朴.声光调Q纳秒脉冲全光纤超连续谱光源[J].强激光与粒子束, 2013, 25(1):119-122.
- [8] 谭方舟,刘江,孙若愚.基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器[J].中国激光, 2013, 40(4).
- [9] 沈君凤,罗风光.光子晶体光纤产生的超连续谱[J].光子学报, 2014, 43(1):0106007-1-0106007-4
- [10] 李超,朱启华,赵磊.中红外超连续谱在氟化物光纤中的产生[J].强激光与粒子束, 2014, 26(10):101005-1-101005-3.