

·激光技术·

白光激光的产生及特性

陈亚楠, 高鹏, 杨光达

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要:通过对激光作用于透明介质原理分析得知, 飞秒激光脉冲在透明介质中传输会发生许多的非线性效应, 使激光脉冲频谱产生极大的展宽, 而形成白光辐射。探讨了白光辐射的光谱特性与锥角辐射现象, 对上述分析与探讨进行了实验验证, 实验结果表明, 当激光功率达到一定值时, 通过石英玻璃等固体透明介质后, 可在接收屏上出现明显的白光光斑, 其白光光谱覆盖了可见光到近红外波段, 且具备良好的相干性。

关键词: 飞秒; 非线性; 光谱展宽; 白光

中图分类号: O433.5⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)01-0018-02

Generation and Characteristic of White Light Laser

CHEN Ya-nan, GAO Peng, YANG Guang-da

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: By analyzing the effect of laser in transparent media, the femtosecond laser pulses transmitting through transparent media can produce many nonlinear effects, which greatly expands the laser pulse frequency spectrum and produce the white light radiation. The spectrum characteristic of white light radiation and cone angle radiation are discussed. The above analysis and discussion of experiments show that the white light spot appears on the receiving screen, and white light spectrum covers from visible to near infrared bands with good coherence, when laser power reaches a certain value and laser transmits through the solid transparent media, such as quartz glass.

Key words: femtosecond; nonlinear; spectrum expansion; white light

飞秒激光脉冲宽度小、峰值功率高, 在透明介质会产生诸多非线性效应, 其频谱被极大地展宽, 形成方向性、相干性良好的超连续谱白光激光, 这种白光频谱覆盖可见光和近红外波段。文中对飞秒激光在透明介质中产生白光激光的机理和白光激光进行了简要的介绍, 并通过实验验证白光激光部分特性^[1]。

1 基本原理分析

激光作用透明介质, 当激光辐照的功率密度达到一定数值时, 材料中的电子可以吸收光子而获得

高于带隙的能量从而发生电离生成自由电子, 改变材料的介电常数, 使其折射率重新分布^[2]。

在高功率激光作用下, 材料的介电常数 ε (或折射率 n) 与激光强度 E 有关, 即有

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{1}{2} \varepsilon_2 |E|^2 \quad (1)$$

$$n = n_0 + \frac{1}{2} n_2 |E|^2 \quad (2)$$

式中, ε_0 为材料线性介电系数; n_0 为材料线性折射率; ε_2 为材料非线性介电系数; n_2 为材料非线性折射率。激光电场矢量的平方与激光强度成正比。

由式(1)、式(2)可以看出, 入射强度分布为高

收稿日期: 2010-12-27

基金项目: 国家部委基金

作者简介: 陈亚楠(1980-), 男, 北京人, 学士, 工程师, 研究方向为光电工程。

斯型的激光束,造成介质的折射率也有类似的分布,因此光束中心分布的相速度变小,而在边缘部分则较大,使光波的等相位面变成凹面,光束逐渐汇聚成很细的光丝,即激光束轴与边缘处的场强不同造成了介质的中心折射率高、边缘折射率低的传输通道,也就是说通道中的空气成为一种类似正透镜的介质,具有使光线汇聚的作用,这样就产生了自聚焦现象。

激光的自聚焦过程会使激光的强度不断增加,当其强度达到使传输介质电离的临界值时,介质被电离,产生了低密度的等离子体,而等离子体对折射率的影响是通过下式起作用的

$$\Delta n_p = -\omega_p^2 / 2\omega^2 \quad (3)$$

$$\omega_p = [4\pi e^2 n_e(I) / m_e]^{1/2} \quad (4)$$

式中, ω_p 为等离子体频率; n_e 为等离子体密度。

则等离子体引起透明介质的相位变化为

$$\Delta\varphi = (\omega_p^2 / 2\omega^2) / (2\pi/\lambda)L \quad (5)$$

产生的等离子体对折射率的贡献相对于三阶非线性效应来说是负的,类似于一个负透镜,等离子体的这种负透镜效应可以使激光光束散焦。激光束的自聚焦和等离子体的散焦作用同时存在,当这两种效应达到一个动态的平衡时,激光束能够在透明介质中形成等离子体细丝。

在这个动态平衡过程中,激光的能量密度不断增加,介质材料电子密度随之增大,激光脉冲串经过介质,把激光脉冲在时间上分为不同的层,不同层的光将会聚焦在各自的焦点上,后面的激光脉冲串的“每一层”遇到的将是突然增加的电子密度,结果就造成了光谱在短波方向很大的展宽。又因为电子密度梯度从小到大连续变化,结果就使频率有一个连续的增加,形成了短波方向上的连续谱。

在等离子体散焦时,电子密度会缓慢减少,使频率有一定的减小,造成长波方向一定的展宽,但相对于短波方向来说要小得多。

从上面分析可以看出,高峰值功率激光在透明介质中传输,光谱会产生极大展宽,尤其是短波方向上,而飞秒激光由于其脉冲宽度小,峰值功率高,容易与传输介质产生自聚焦、多光子电离等效应发生自相位调制,从而产生光谱展宽效应,此外,常用的飞秒激光的频率在近红外,那么光谱短波方向的展宽就会覆盖可见光区域,即形成白光辐射^[3-5]。

2 光特性

2.1 白光光谱特性

飞秒激光在透明介质(大气)中传输时,通过调整激光单脉冲能量,产生不同的光谱展宽效应,对此过程进行数值模拟的结果如图1所示。从图1中可以看出,不同单脉冲能量的飞秒激光,经过大气透明介质发生光谱展宽。

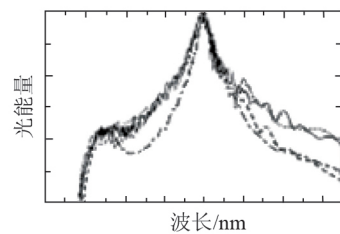


图1 飞秒激光在空气中产生超连续光谱的模拟

2.2 白光相干性

通过杨氏双缝干涉实验可以证明,飞秒激光在透明介质中传输时产生的白光辐射具有很好的相干性。对测到的超连续谱白光的相干长度与非相干光源白炽灯泡发出的相应波长光的相干长度进行了比较,发现其结果与传输介质无关,也就是说这种相干超连续谱白光的产生具有普遍性。因为超连续谱白光所有波段的相对相干长度实际上是和所用800 nm激光的相对相干长度是一样的。所以,从产生的超连续谱白光的相干长度的角度来说,可以认为它就是白光激光脉冲。

2.3 锥角辐射现象

当高峰值功率飞秒激光脉冲在透明介质中传输时,形成了等离子体通道,少部分激光能量集中到了光丝中,另外有一部分能量从通道中以一定的角度辐射出来,这种锥角辐射现象具有独特的特点:(1)波长越短,对应的辐射角越大,形成越往四周波长越短的彩色光环;(2)辐射角与通道的位置无关;(3)辐射光小于激光中心波长;(4)辐射光为相干光。

3 实验

针对高功率飞秒激光经过透明介质产生白光激光,设计验证实验示意图如图2。实验中,衰减组

(下转第39页)

- [3] R Penndorf. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectra region between 0.2 and 20 μm and their application to atmospheric optics[J]. Opt.Soc.Am., 1957, 47: 176-182.
- [4] ITU. Development of a weather-model for free space optical propagation[R]. ITU Document 3J/78-E, 2004.
- [5] E M Patterson, J B Gillespie. Simplified ultraviolet and visible wave-length atmospheric propagation model[J]. Appl. Opt., 1989, 28: 425-429.
- [6] A Ferrero. A theoretical study of atmospheric propagation of laser and return light for stand-off laser induced breakdown spectroscopy purposes[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2008, 63: 305-311.
- [7] Thomas J Karr. Synthetic aperture ladar for planetary sensing[J]. Proc. of SPIE, 2003, 5151: 44-52.
- [8] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I):离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 997-1000.
- [9] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II):空间相位偏置发射望远镜[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1197-1200.
- [10] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(III):双向环路发射接收望远镜[J]. 光学学报, 2008, 28: 1405-1410.
- [11] 郭亮,邢孟道,梁毅,等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1183-1190.
- [12] 张瑜,杨豪强,张明高. 激光在大气中的传输损耗实用计算方法[J]. 光通信技术, 2007, 31(3): 62-64.
- [13] 时建群,魏山城,韩雪云,等. 激光大气传输吸收衰减效应研究[J]. 河南师范大学学报, 2008, 36(3): 56-58.
- [14] 刘波涛. 大气对激光传输的影响[J]. 光散射学报, 2007, 19(1): 43-48.
- [15] 阴俊燕,尹福昌,陈明,等. 影响激光大气传输因素分析[J]. 红外与激光工程, 2008(S3).

(上接第 19 页)

件控制激光单脉冲能量,聚焦光学系统将激光光斑聚焦到石英玻璃上,使飞秒激光在经过石英介质时产生自聚焦效应,发生自相位调制,导致光谱展宽。

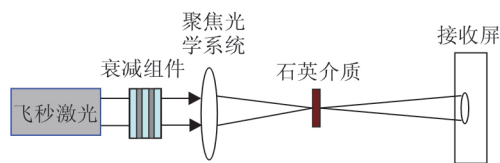


图2 飞秒激光经过石英玻璃产生白光实验示意图

实验结果表明,当到达石英玻璃等固体透明介质时,当激光功率达到一定值时,在后面的接收屏上出现明显的白光光斑,如图3所示。

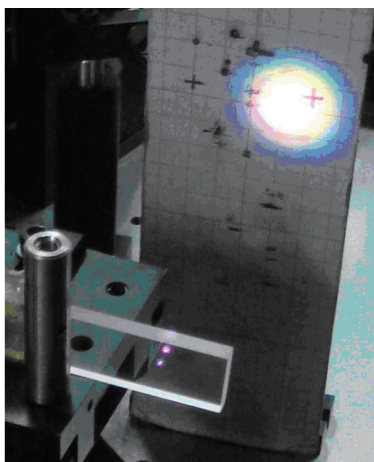


图3 飞秒激光通过石英介质产生白光激光

由图3可以看出,白光激光光斑边缘从内到外,按照波长由长到短分布,并且通过实验验证得到:白光光谱覆盖了可见光到近红外波段,且具备良好的相干性。

4 结论

通过对激光在透明介质中传输的简要理论分析,得到白光激光产生的机理和特性,结合实验研究,验证了白光激光产生机理和部分白光辐射特性。证明了这种白光激光具有良好的相干性,决定了其远距离传输效果必将优于其他可见光宽谱光源,此外相比传统激光器,白光激光又具备光谱极宽的特性。

参考文献

- [1] 成纯富,王晓方,鲁波. 飞秒光脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输和超连续谱产生[J]. 物理学报, 2004, 39(3): 210-214.
- [2] 陈笑,苏玉成,王义全,等. 大气中飞秒激光等离子体丝上荧光特性的研究[J]. 中央民族大学学报, 2009, 18(1): 12-15.
- [3] Fibich G, Ilan B. Self-focusing of elliptic beams: an example of the failure of the aberrationless approximation[J]. J. Opt. Soc. Am., 2000, B17(10).
- [4] Jisha C P, Kuriakose V C, Porsezian K. Variational approach to spatial optical solitons in bulk cubic-quintic media stabilized by self-induced multiphoton ionization[J]. Phys. Rev., 2005, E71: 056611.
- [5] 强希文,刘晶儒. 超短强激光脉冲大气传输效应建模[J]. 激光与红外, 2005, 34(3): 12-15.