

文章编号: 0258-7025(2004)05-0567-03

非均匀微结构光纤中超连续光的产生和传输

胡明列¹, 王清月¹, 栗岩锋¹, 王 专¹, 倪晓昌¹,

柴 路¹, 张志刚¹, 章若冰¹, 侯蓝田², 李曙光², 周桂耀²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
² 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 报道了利用自行拉制的具有大空气比、小纤芯的非均匀微结构光纤同纳焦耳量级的飞秒激光脉冲相互作用的试验研究。大空气比所带来的大折射率差能将传输的光场强烈地局域在纤芯中, 大大增强了非线性效应, 所以在 1~2 cm 的传输距离内, 便有白光产生, 传输 60 cm 后, 输入的 24 nm, 35 fs 飞秒脉冲就展宽成超过一个倍频程 (Octave) (390~1050 nm) 的超连续光谱, 并且由于其包层具有非均匀分布的大小不等的空气孔, 从而在传输过程中观察到由这种结构形成的非完全光子带隙影响下, 侧向光泄露呈现颜色变化的新现象。

关键词 光电子学; 微结构光纤; 飞秒脉冲激光; 超连续光谱; 光子带隙

中图分类号 TN 252 **文献标识码** A

Supercontinuum Generation and Transmission in a Random Distorted Microstructure Fiber

HU Ming-lie¹, WANG Qing-yue¹, LI Yan-feng¹, WANG Zhuan¹,
NI Xiao-chang¹, CHAI Lu¹, ZHANG Zhi-gang¹, ZHANG Ruo-bing¹,
HOU Lan-tian², LI Shu-guang², ZHOU Gui-yao²

¹Laboratory of Optoelectronics Information Science & Technology, Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
²Institute of Infrared Fiber and Sensor, Yanshan University, Qinhuangdao, Heibei 066004, China

Abstract A random distributed microstructure fiber is demonstrated, and supercontinuum light with a spectrum more than one octave (390~1050 nm) was generated in 60 cm microstructure fiber by the femtosecond pulse laser with a duration of 35 fs and a energy of several nanojoules per pulse. The large refractive-index step between silica and air allows light to be concentrated into a very small area and resulting in those enhanced nonlinear effects. Some new phenomena is observed when the supercontinuum light transmits in this fiber due to its incomplete photonic band gap, such as the color variation along the fiber.

Key words optoelectronics; microstructure fiber; femtosecond laser; supercontinuum; photonic band gap

1 引 言

传统光纤由两种不同折射率的物质构成, 纤芯的折射率高于包层的折射率, 通过全内反射将光束

约束在折射率高的纤芯中, 使得光束沿着光纤轴向传播。而微结构光纤也可以称作光子晶体光纤、多孔光纤, 是由单一物质构成, 由其包层中周期结构的空气孔形成的禁带将光束局域在纤芯。这可以视为

收稿日期: 2003-01-27; 收到修改稿日期: 2003-11-12

基金项目: 国家重点基础研究 (编号: G1999075201 和 2003CB314904), 国家自然科学基金 (编号: 60278003) 和国家高技术研究发展计划“863”基金 (编号: 2003AA311010) 资助项目。

作者简介: 胡明列 (1978—), 男, 四川广汉人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室博士研究生, 主要从事超快激光技术及其应用研究。E-mail: huminglie@yahoo.com

利用二维光子晶体的晶格缺陷来约束光束的传播方向。这种结构的光纤最早由英国 Beth 大学的 J. C. Knight 等提出^[1]，并由于其特有的性质而迅速成为最近研究的热点。

由于特殊的结构，微结构光纤将光场强烈局域在很小的纤芯中，极大地增强了非线性效应，不单单是自相位调制 (SPM)，诸如互相位调制 (XPM)、受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS) 以及四波混频 (FWM) 等等都可能发生，因而低功率飞秒激光脉冲在其中传播时，在很短的长度内就能够展宽成很宽的光谱，即超连续光谱^[2]。而且由于空气和材料之间较大的折射率差，微结构光纤具有很大的负波导色散，所以能够将零色散移至可见光波段^[3]，这些特性为获得更短的脉冲和超短脉冲的传输创造了极好的条件。需要特别提出的是，理论计算指出，光子晶体结构能够控制中心频率在带隙附近的光脉冲的群速和相速度，并可以在很短的长度内将脉冲压缩到几个光学周期的极短脉冲^[4]。

2 超连续光谱的产生

将传统光纤的拉制过程加以改进，我们将石英玻璃拉制成了微结构光纤。图 1 为实验所用的微结构光纤端面的电子扫描显微图，其芯径为几个微米，周围空气孔也在微米量级，占空比在 50% 以上。与均匀微结构光纤不同的是，这种光纤包层的空气孔排列很不均匀，大小也不一致，不具备严格的周期性。但是通过理论模拟证实，这种非均匀微结构光纤同均匀的微结构光纤有着相似的性质，也能将传播光束强烈地局域在很小的芯径区域，在强化的非线性效应作用下，在很短的长度内就能获得很宽的光谱。与此同时，光能在很宽的波长范围内保持单模，并且在一定的空气孔占空比和芯径大小的条件下，能将零色散移至可见光波段。

实验中使用的激光器为自行研制的具有自启动

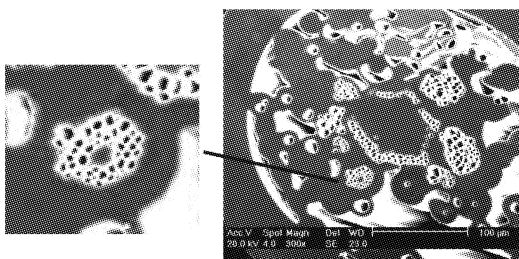


图 1 非均匀微结构光纤端面扫描电子显微图
Fig. 1 SEM of the distorted microstructure fiber

锁模、高稳定性、高输出功率的飞秒钛宝石激光器，其锁模的最高平均功率可以达到 1.7 W^[5]。实验中使用的平均功率为 600 mW，脉宽 35 fs，谱宽 24 nm，脉冲重复频率 84 MHz，单脉冲能量 6 nJ。使用 40 倍的耦合透镜，微结构光纤长度 60 cm (图 2)。

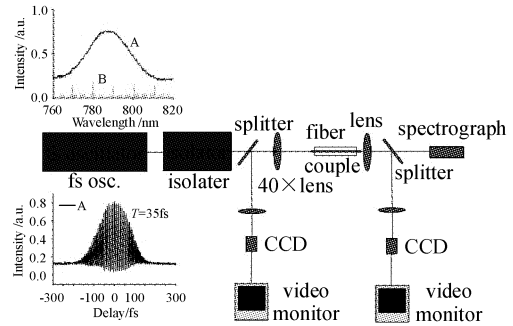


图 2 耦合系统装置图
Fig. 2 Setup of the couple system

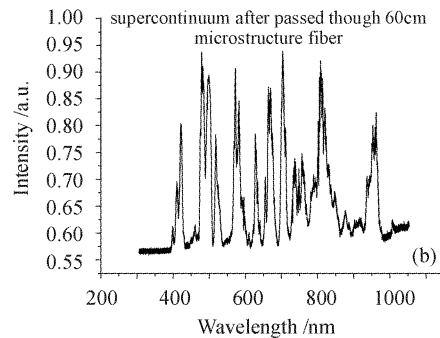
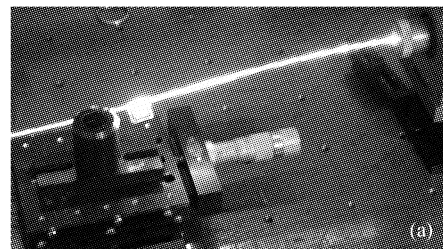


图 3 产生的超连续现象 (a) 和光谱 (b)
Fig. 3 Supercontinuum generation (a) and spectrum (b)

实验中针对这种非均匀微结构光纤复杂结构，采取了 CCD 监控和逐点扫描耦合的方法，将振荡级输出的飞秒脉冲激光耦合到图 1 中所示的纤芯区域。正如图 3(a) 所示，传输很短的距离 (1~2 cm)，超连续白光便产生了。但是由于不完全带隙的作用，在传播一段距离后得到的光谱具有明显分裂的多结构 (图 3(b))，而不同于周期结构微结构光纤所产生的超平坦的超连续光谱。实验中获得超连续最短波长可以达到 390 nm (图 4(a))，而且受到光谱仪响应波长的限制，最长波长只能测到 1050 nm，但

这已是一个超过一个倍频程(Octave)的超宽谱带,至少能达到 600 nm。还发现这种微结构光纤在 800 nm 处的光子禁带很宽,图 4(b)中在光纤输出端获得的光谱不仅达到 100 nm 宽,而且分布比较平坦,如果进一步压缩就有可能获得几个光学周期的超短脉冲。

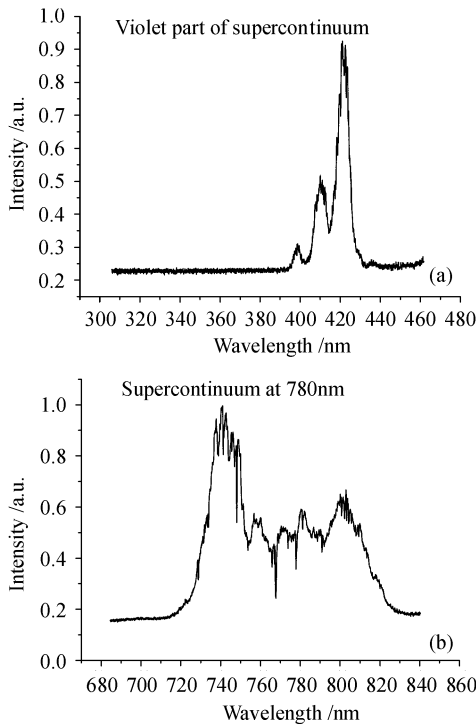


图 4 在 400 nm(a)和 800 nm(b)处的超连续光谱
Fig. 4 Spectrum at 400 nm (a) and 800 nm (b)

3 超连续光谱的传输

由于非均匀微结构光纤包层不是严格的周期结构,因此对不同位置和方向的入射,带隙结构并不相同,它被称作不完全的光子带隙,所以在传播过程中泄漏出不同色彩的光。如图 5(a)所示,正是由于在绿光区域有较大的带隙,所以整根光纤透射出绿光,而在光纤端面输出的光谱中绿光成分衰减很多,因此非均匀微结构光纤的光子带隙也是不均匀的。

控制过程中由于光纤拉制塔内的温度分布的不均匀和控制速度的不匀速,使得微结构光纤在纵向分布上也不是完全一致的,在不同段落的带隙结构不一样,所以观察到从光纤透射出的光便呈现出色彩的变化,在不同段有不同的颜色的光透射出来。

4 结 论

利用石英玻璃拉制的非均匀微结构光纤同均匀

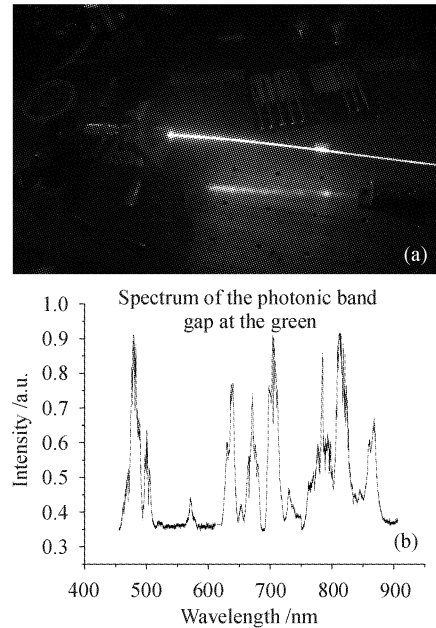


图 5 带隙泄漏现象(a)及输出光谱(b)
Fig. 5 Leak phenomena and spectrum affected by incomplete photonic band gap

微结构光纤具有同样强烈的非线性特点。30 fs 的超短脉冲激光在这种光纤中传输很短的距离便获得了超过 600 nm 的超连续光谱,而且还在这种光纤中观察到了均匀微结构光纤中所没有出现过的新现象,说明这种非均匀的微结构光纤同样具有很重要的研究和应用前景。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
 - 2 Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler, Andrew J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):25~27
 - 3 J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):807~809
 - 4 N. I. Koroteev, S. A. Magnitskii, A. V. Tarasishin *et al.*. Compression of ultrashort light pulses in photonic crystals: when envelopes cease to be slow [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**:191~202
 - 5 Sun Jinghua, Zhang Ruobing, Wang Qingyue *et al.*. High-average-power self-mode-locked Ti:sapphire laser self-started by a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):1019~1021
- 孙敬华, 章若冰, 王清月等. 半导体可饱和吸收镜启动的高功率飞秒掺钛蓝宝石激光器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):1019~1021