

多孔微结构光纤中飞秒激光脉冲超连续谱的产生*

李曙光^{1)†} 冀玉领¹⁾ 周桂耀¹⁾ 侯蓝田¹⁾ 王清月²⁾
胡明列²⁾ 栗岩峰²⁾ 魏志义³⁾ 张 军³⁾ 刘晓东³⁾

¹⁾ 燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

²⁾ 天津大学精密仪器与光电子工程学院教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

³⁾ 中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2003 年 1 月 14 日收到, 2003 年 3 月 10 日收到修改稿)

报道了利用 800nm 飞秒激光脉冲在多孔微结构光纤中产生超连续谱展宽的现象, 连续谱展宽范围为 440—890nm. 基于标量波近似理论对微结构光纤包层的有效折射率和基模的有效面积以及光纤的色散特性进行了计算, 发现微结构光纤具有特殊的控制色散和波导特性的能力, 对超连续谱展宽的机理进行了初步解释. 本文的理论分析和实验结果有较好的一致性, 认为即使包层由无序填充气线组成的多孔微结构光纤也可以出现超连续谱展宽效应.

关键词: 多孔微结构光纤, 超连续谱, 有效折射率, 色散

PACC: 4270Q, 7155J, 7830, 3320K

1. 引 言

近年来, 人们对多孔光子晶体光纤的研究产生了极大的兴趣^[1-8]. 多孔光纤一般可以分为两大类, 即包层孔穴做有序排列的光子晶体光纤^[1-7]和包层具有无序空气孔穴分布的多孔光纤^[8]. Monro 等人^[8]曾从理论上预言这种包层具有无序空气孔穴分布的多孔光纤亦可以传导光, 这种无序多孔光纤具有以前周期性多孔光纤所具有的许多特点, 特别是在整个波长范围内支持单模传播的特性, 并预言了在 1.55 μm 通信窗口这种多孔光纤的损耗、非线性和色散特性. 由于多孔微结构光纤所具有的色散和非线性光学特性以及在很大的波长范围的单模操作特性, 多孔微结构光纤的实用化要求人们对其导光机理和各种光学特性进行研究. 特别是最近报道的利用具有周期性石英-空气结构的光子晶体光纤产生超连续谱的现象^[9-11]引起了人们的极大关注, Coen 等人^[9]对利用 60ps 抽运脉冲产生的白光超连续谱用光子晶体光纤中的受激拉曼散射(SRS)和参数四波混频来解释, 其中抽运脉冲的自相位调制效应可

以忽略, Husakou 和 Herrmann 等人^[10, 11]通过理论和实验认为超连续谱的产生是由于光子晶体光纤中零色散波长附近的高阶孤子裂变成红移的低频孤子和蓝移的非孤子辐射而产生的, 这是一种新的光谱展宽机理. Knight 等人^[12]报道了不仅可以在光子晶体光纤中产生超连续谱, 而且可以通过光纤锥(optical fiber tapers)产生超连续谱, 一般来说超连续谱是强光脉冲通过非线性材料产生的一种非线性光学现象. 纤芯中极高的功率密度成为产生超连续谱的一个重要因素, 不管是光子晶体光纤还是光纤锥都能够起到把高功率密度限制在纤芯中的作用^[12-16].

本文为我们最新研制的微结构光纤产生超连续谱的结果, 这是一种包层由无序填充气线组成的实芯全石英光纤, 这种光纤与 Monro 理论上设计^[8]的多孔光纤类似, 我们称之为多孔微结构光纤, 实验发现利用这种光纤可以在整个可见光区甚至近红外区产生超连续谱, 并对其光谱展宽机理进行了初步解释.

2. 实验及结果

本文利用钛蓝宝石(Ti:sapphire)飞秒激光脉冲

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-715-001-0212)和国家自然科学基金(批准号: 10227401)资助的课题.

† E-mail: lissggg@163.com

研究了自己研制的多孔微结构光纤的非线性和超连续展宽效应. 光纤截面的电子显微图如图 1 所示, 图 1(a) 和 (b) 为两种芯径不同、包层空气填充率也不同的微结构光纤的截面. 实验中所用微结构光纤纤芯直径为 $2.4\mu\text{m}$, 包层空气穴的平均节距为 $1.8\mu\text{m}$, 包层气线的平均直径为 $1.0\mu\text{m}$ — $1.5\mu\text{m}$, 包层空气填充率为 30% — 83% , 光纤长度为 15cm ; 实验中输入脉冲激光的中心波长是 800nm , 谱宽 12nm , 脉冲宽度 100fs , 激光功率 200mW . 图 2 为纤芯直径 $d = 2.4\mu\text{m}$, 空气填充率分别为 $f = 47.3\%$ (图 2(a)) 和 $f = 71.7\%$ (图 2(b)) 的微结构光纤的在输入脉冲参数相同时产生超连续谱的照片, 实验发现输入的激光脉冲只需要走 1.5 — 2.0cm 就可以产生白光. 从图中可以看出: 空气填充率为 $f = 47.3\%$ (图 2(a)) 的光纤亮度比 $f = 71.7\%$ (图 2(b)) 的光纤的亮度要强得多.

多. 说明包层低空气填充率的光纤的带隙泄漏比较严重, 这种无序孔穴的微结构光纤只能形成不完全光子带隙. 图 3(a) 和 (b) 为分别相应于图 2(a) 和 (b) 的微结构光纤的输出谱线, 从图中可以看出 $f = 47.3\%$ 的微结构光纤超连续展宽的波长范围为 440nm — 890nm , 而 $f = 71.7\%$ 的微结构光纤超连续展宽的波长范围大约为 440nm — 1040nm , 并且输出谱线的幅度值比前者要高(相应地从光纤侧面的光能量泄漏就小). 由于光谱测量仪测量范围的限制, 实际上光谱展宽的范围可能到达紫外区. 从图 2 和图 3 的结果也说明微结构光纤对光的限制效应(或光子带隙效应)与包层空气填充率的大小有很大的关系, 较高空气填充率的光纤更容易把光能量限制在纤芯中.

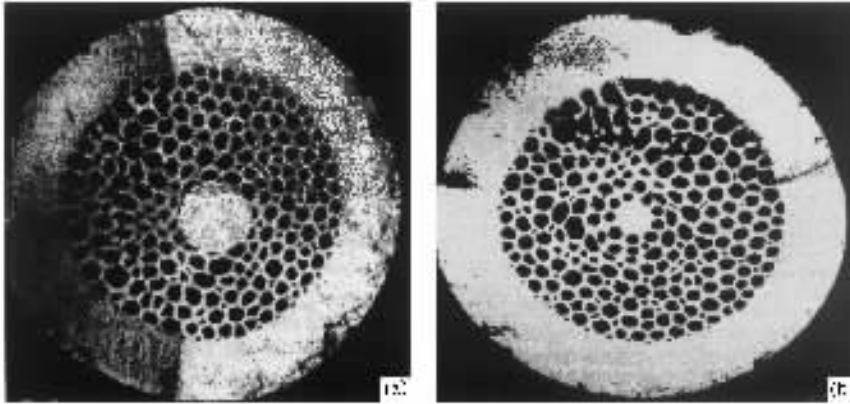


图 1 多孔微结构光纤截面的电子显微图 (a) 芯径 $d = 4.8\mu\text{m}$, 空气填充率 $f = 73\%$ (b) 芯径 $d = 2.4\mu\text{m}$, 空气填充率 $f = 65.3\%$

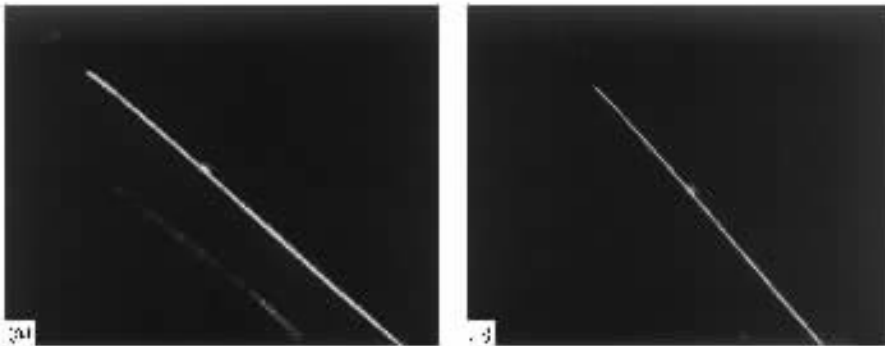


图 2 多孔微结构光纤产生超连续谱的现象(输入激光脉冲的中心波长 800nm , 谱宽 12nm , 脉冲宽度 100fs , 激光功率 200mW , 光纤长度 15cm , 纤芯直径 $d = 2.4\mu\text{m}$, 空气填充率(a) $f = 47.3\%$ (b) $f = 71.7\%$)

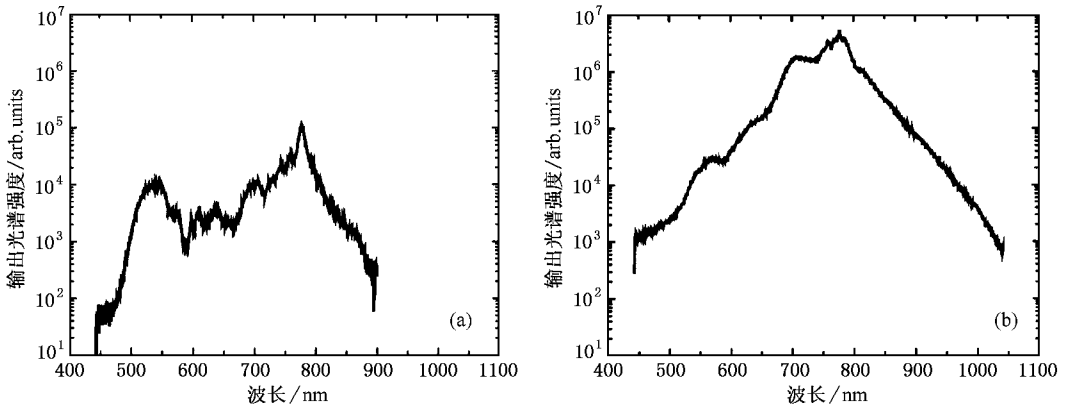


图3 多孔微结构光纤的输出激光脉冲谱(参数同图2)

实验研究表明:即使光纤的包层是由沿着整个光纤的无序的填充气线组成,只要包层中气线尺度的分散性和空气的体积分数满足一定的条件也可以形成一定程度的光子带隙,至少是不完全光子带隙,把光能量集中在纤芯中,从而出现强的非线性效应,产生频带较宽的超连续谱,其光谱范围基本覆盖整个可见光区甚至达到近红外区。下面从理论上对微结构光纤的超连续谱的产生进行解释。

3. 理论解释

微结构光纤对光场的限制使得纤芯中光功率密度增大的效应可以根据有效折射率模型按照传统阶跃折射率光纤的导光模式来解释^[5,6]。与光在纤芯中定域性有直接关系的是光纤中波导模的有效面积,借鉴传统的阶跃折射率光纤(step-index fibers)的波导模的有效尺寸计算公式^[17],我们可以得到微结构光纤波导模的有效半径计算公式

$$r_{\text{eff}} = r_c + \lambda / [2\pi \sqrt{n_c^2 \cos^2 \phi - n_{\text{eff}}^2}], \quad (1)$$

$$S_{\text{eff}} = \pi \cdot r_{\text{eff}}^2, \quad (2)$$

其中 r_c 为纤芯半径, λ 是真空中波长, n_c 为纤芯折射率, n_{eff} 为包层的有效折射率, ϕ 是描述纤芯模的入射角, S_{eff} 为导波模式的有效面积。考虑到材料色散的影响,可以利用描述材料色散的 Sellmeier 方程来计算石英介质的折射率^[18]

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (3)$$

对于石英介质一般取 $m = 3$, ω_j 为谐振频率, B_j 为

谐振强度^[18]。利用基于电磁场分布的标量波理论计算光纤包层的有效折射率^[15],把具有无序填充气线的包层区域等效为一系列的外半径为 R ,内半径为 r 空芯石英介质圆柱,对这种具有对称边界条件的圆形单元胞进行计算,得到包层区域基本模式的传播常数 β_{cl} ,再根据下式计算包层的有效折射率:

$$n_{\text{eff}} = \beta_{\text{cl}} / k, \quad (4)$$

其中 k 为光波矢,这样就得到了光纤包层有效折射率随波长和空气填充率的变化关系,如图 4(a)所示。对三种具有相同纤芯半径 $r_c = 1.2 \mu\text{m}$ 而不同空气填充率($f = 47.3\%$, 65.3% , 71.7%)的微结构光纤进行计算得到了导波模式的有效面积 S_{eff} 随波长的变化关系,如图 4(b)所示。从图中可以看出随着包层空气填充率的增大,其有效折射率降低,对于芯径相同的微结构光纤其有效导波模式面积 S_{eff} 随包层空气填充率 f 的增大而减小,这有利于把高的功率密度限制在纤芯中,这与我们在实验中观测到的超连续展宽程度相一致,即有效导波模式面积 S_{eff} 小的光纤($f = 71.7\%$)比有效导波模式面积 S_{eff} 大($f = 47.3\%$)的光纤在其他条件相同的情况下对光谱的展宽效率要高,同时输出的光强度也比较强(如图 3 所示)。另外,从包层有效折射率随波长的变化关系可以看出,随着波长的增大,三种空气填充率包层的有效折射率都减小,这将有利于在较宽的波长范围同时实现单模传播,关于这一点可以利用传统阶跃折射率光纤的单模传输条件解释^[18]。微结构光纤的单模传输特性与 Birks 等人^[21]对光子晶体光纤的单模传播特性的预言相一致。

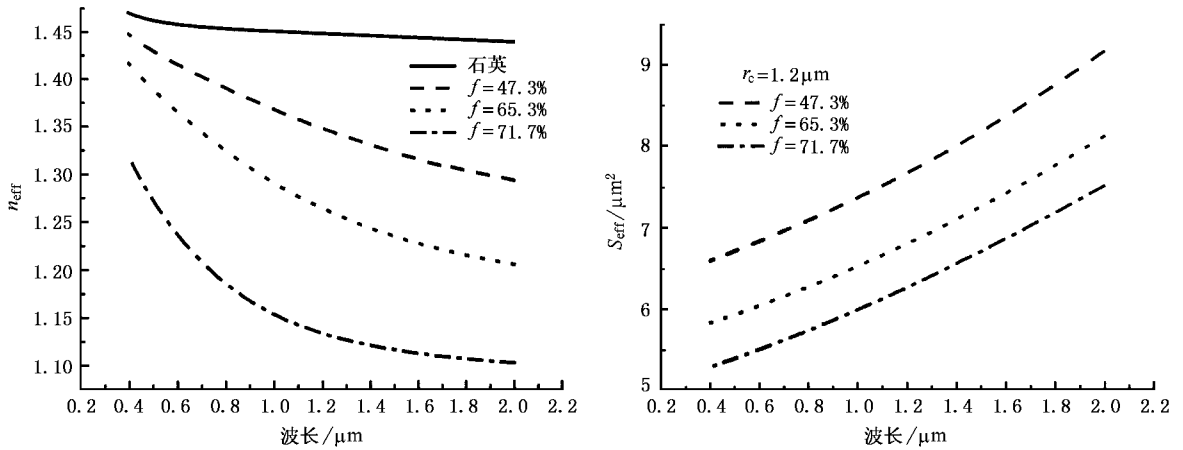


图4 (a)包层有效折射率 n_{eff} 随波长 λ 和空气填充率 f 的变化 (b)导波模式有效面积 S_{eff} 随波长和包层空气填充率 f 的变化

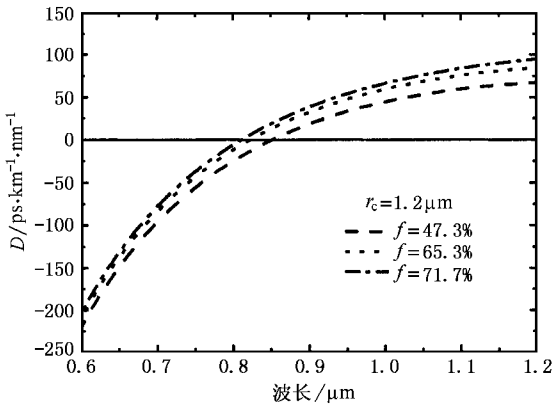


图5 微结构光纤的色散系数 D 随光波长 λ 和包层空气填充率 f 的变化关系

图5给出了利用标量波理论所计算的三种不同空气填充率的微结构光纤色散特性。通过计算发现:对于空气填充率 f 为 47.3%、65.3%、71.7% 的微结构光纤,其零色散点分别位于 850nm、820nm、803nm 附近。随着空气填充率的增大,微结构光纤的零色散点向短波方向移动,当然零色散点的位置还与芯径和包层空气线的尺度有关。实验发现在光纤芯径相同的情况下,当输入脉冲的波长在光纤的零色散波长附近时,谱线的展宽效应最显著。即光谱展宽的效率对非线性介质的色散特性很敏感,这是由于色散可以引起不同频率成分之间的相位失调,导致群延迟和脉冲时间展宽效应,导致光纤走离长度(walk-off length)减小^[18],所谓走离长度是指光脉冲时延宽度为输入脉冲宽度的 2 倍时在光纤中所需传播的距离。所以色散的存在导致纤芯中功率密度降低而影响连续谱的展宽效率。另一方面,微结构光纤的色散

特性极大地依赖于其波长和微结构尺度(包层节距和空气填充率),可以通过调节光纤的微结构和空气填充率设计所需要的零色散光纤。

前面讨论了有效模式面积和零色散点位置与光谱展宽效率的关系。从根本上来讲,除了光纤纤芯大小外,影响微结构光纤有效模式面积和零色散点位置的一个很重要的因素是包层空气填充率 f ,只要具有合适的包层空气填充率,就可以进一步控制光纤的有效模式面积和色散特性,为产生非线性效应提供极高的功率密度。进一步对这种高功率密度所导致光谱展宽可以解释为:在光纤零色散波长附近高阶孤子发生演化和破裂,众所周知在零色散波长附近高阶色散(即 $\frac{d^3\beta}{d\omega^3}$)开始起主要作用^[18],这时每出现一个基本孤子就释放一个与该孤子相位匹配的蓝移非孤子辐射,同时产生一个低频光孤子,由于在脉冲与介质相互作用过程中产生的基本孤子具有不同的中心频率,与之相匹配的辐射以不同的频率间隔产生,同时向低频和低频两个方向展宽而形成超连续的白光,甚至可以扩展到紫外和近红外区,这种解释与 Husakou 和 Hermann 等人^[10,15]的理论预言相一致。

另外,由于光纤包层空气线大小及其分布的无序性,包层径向的不完全光子带隙的形成可以定性地向无序光子定域化理论来解释^[19-24],如果光纤径向方向无序气隙的折射率变化的长度与光的波长可比拟,光子受到散射体的多重强散射而产生干涉,光子沿径向的平均自由程 l 非常小^[23-27],使得光子沿光纤径向的传播受到极大的抑制,这样就可以把极高的光功率密度限制在纤芯中从而为超连续谱的产

生提供了前提条件,而我们实验中所用的微结构光纤,其包层空气线的平均直径大约为 $1.0\mu\text{m}$ — $1.5\mu\text{m}$,与产生连续谱的输入波长在同一数量级.虽然光纤包层空气穴是无序分布的,但仍然接近于准周期,亦可以用准完全光子带隙效应来解释^[28,29].

4. 结论和展望

本文报道了多孔微结构光纤中产生超连续谱的现象,基于标量波近似理论对微结构光纤包层的有效折射率 n_{eff} 和基模的有效面积 S_{eff} 进行了计算,发现微结构光纤包层有效折射率随波长的增大而减小,这有利于微结构光纤在极宽的波长范围实现单模传播,光纤的有效导波模式面积 S_{eff} 的大小是影响强非线性效应的重要因素,光纤包层空气填充率越大,其有效导波模式面积 S_{eff} 越小(即光场的定域性越强),纤芯中的功率密度越高,非线性效应越显著.通过对微结构光纤的色散特性的计算,发现微结构光纤具有特殊的控制色散和波导特性的能力,通过对微结构尺度和纤芯大小的调节,其零色散波长可以向短波方向移动,甚至可以出现在可见光区.微结构光纤超连续谱的产生即光谱的展宽机理可用零色散波长附近高阶光孤子的演化和破裂来解释.本文的理论分析和实验结果有较好的一致性,认为不仅具有周期结构包层的光子晶体光纤中可以产生

强非线性效应而出现超连续谱^[9-15],即使包层是由无序填充气线组成的多孔微结构光纤也可以出现类似的超强非线性和超连续谱展宽.本文所报道的包层具有无序孔穴分布的微结构光纤产生超连续谱的结果也是对 Monro 等人^[8]理论预言的一个很好的验证.

由于微结构光纤能够在很大程度上把光能量限制在纤芯中,可以利用相对较低的激光功率脉冲在纤芯中产生高强度的功率密度,在这种条件下输入功率为几个纳焦甚至是亚纳焦的激光脉冲就可以产生超连续展宽.这种结果可能会导致一些光学计量领域观念的革命性变革,相反,芯径较大,包层空气填充率较小的微结构光纤具有较大的有效模式面积,这种光纤可以作为高功率光纤激光器或放大器,实现高功率激光传送和激光焊接,虽然传统光纤也能表现出相似的特性,但是微结构光纤具有扩展带宽和短波长应用的独一无二的优势,因为这种光纤可以保证在较大的波长范围实现单模传输,特别是在较短的波段实现单模传播的特性.利用微结构光纤的超连续展宽特性可以为生物组织超高分辨的相干层析成像提供良好的光源^[15],可以制成激光频谱仪进行色散和传感方面的测量,为进一步实现真正的全波通信和全光器件的产生以及光学计算机等全光学“集成电路”的大规模应用创造条件.

- [1] Knight J C *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Birks T A *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [3] Fedotov A B, Yakovlev V V, Zheltikov A M 2002 *Laser Phys.* **12** 268
- [4] Knight J C *et al* 1998 *Science* **282** 1476
- [5] Cregan R F *et al* 1999 *Science* **285** 1537
- [6] Barkou S E, Broeng J *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 46
- [7] Zheltikov A M, Naumov A N 2001 *Quantum Electron.* **31** 471
- [8] Monro T M *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 206
- [9] Coen S, Chau A H L, Leonhardt R *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1356
- [10] Husakou A V and Herrmann J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 203901
- [11] Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 173901
- [12] Wadsworth W J, Blanch A O, Knight J C *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2148
- [13] Fedotov A B, Naumov A N, Zheltikov A M *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2156
- [14] Apolonski A, Povazay B, Unterhuber A *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2165
- [15] Husakou A V, Herrmann J 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2171
- [16] Naumov A N, Fedotov A B, Zheltikov A M *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2183
- [17] Snyder A W, Love J D 1983 *Optical Waveguide Theory* (New York: Chapman and Hall)
- [18] Wu C Q 2000 *Optical Waveguide Theory* (Peking: Qinhua University Press) [in Chinese] 吴重庆 2000 光波导理论(北京:清华大学出版社)
- [19] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [20] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [21] Wiersma D S, Bartolini P, Lagendijk A, *et al* 1997 *Nature* **390** 671

- [22] Thijssen M S , Sprik R , Wijnhoven J *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2730
- [23] Zhang D Z *et al* 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 2431
- [24] Zhang Z Q *et al* 1996 *Phys. Rev. B* **54** 11891
- [25] Liu X D , Hou L T , Wang H T , Li S G 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1353
- [26] Liu X D , Li S G , Hou L T , *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2117 [in Chinese] 刘晓东、李曙光、侯蓝田等 2002 物理学报 **51** 2117]
- [27] Liu X D , Li S G , Hou L T *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2123 [in Chinese] 刘晓东、李曙光、侯蓝田等 2002 物理学报 **51** 2123]
- [28] Wang H , Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 [in Chinese] 王辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [29] He Y J , Su H M , Tang F Q , Dong P , Wang H Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 [in Chinese] 何拥军、苏惠敏、唐芳琼、董鹏、汪河洲 2001 物理学报 **50** 892]

Supercontinuum generation in holey microstructure fibers by femtosecond laser pulses^{*}

Li Shu-Guang^{1†} Ji Yu-Ling¹⁾ Zhou Gui-Yao¹⁾ Hou Lan-Tian¹⁾
 Wang Qing-Yue²⁾ Hu Ming-Lie²⁾ Li Yan-Feng²⁾
 Wei Zhi-Yi³⁾ Zhang Jun³⁾ Liu Xiao-Dong³⁾

¹⁾*Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China)*

²⁾*Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science , School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering , University of Tianjin , Tianjin 300072 , China)*

³⁾*Optical Physics Laboratory , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)*

(Received 14 January 2003 ; revised manuscript received 10 March 2003)

Abstract

It is reported that the supercontinuum spectrum can be generated in holey microstructure fibers by femtosecond laser pulses with a 800nm center wavelength. Broadband continua extending from 440 to 890nm are generated in holey microstructure fibers. Based on the theory of scalar approximation , the effective refractive index of the cladding and effective area for the fundamental space-filling mode and chromatic dispersion of fibers are calculated. It is found that the holey microstructure fibers have specifically the ability of controlling dispersion and waveguide property. The mechanism of supercontinuum generation in holey microstructure fibers is explicated preliminarily. The theoretic analysis is in good accordance with the experimental result. It is considered that supercontinuum broadband spectrum can be generated in holey microstructure fibers even if their cladding constitutes of random gas-line.

Keywords : holey microstructure fibers , supercontinuum spectra , effective refractive index , chromatic dispersion

PACC : 4270Q , 7155J , 7830 , 3320K

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-715-001-0212) and by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10227401).

[†]E-mail : lissggg@163.com