

普通单模石英光纤中频率上转换过程的研究^{*}

胡 巍 刘东峰 陈国夫 王贤华 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘 要 介绍了在普通通讯用单模 $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ 石英光纤中从近红外到可见光的频率上转换过程。利用 1.313 μm 的调 Q 锁模 Nd:YLF 激光脉冲泵浦单模石英光纤, 产生了 588 nm 的黄光, 峰值功率达 20 W, 对应 0.09% 的转换效率。同时在 460 nm~560 nm 范围内有三波混频的兰绿光产生, 其光谱呈多峰结构。实验中还观察到兰绿光与黄光之间强度上的竞争现象。

关键词 单模石英光纤, 频率上转换, 三波混频。

1 引 言

由于光纤通讯的应用潜力, 近十年来人们对石英光纤中的各种非线性过程十分注意。已经发现了多种过程可以实现从近红外到可见光的频率上转换, 包括红外泵浦光与其各级拉曼光之间的二倍频与和频过程^[1, 2], 三倍频与三波混频过程^[3], 以及四光子混频等参量过程。近年在掺杂稀土元素单模石英光纤中也观察到从近红外到可见光的频率上转换, 其发光过程则是 Nd^{3+} , Er^{3+} 等掺杂离子的激发态吸收形成的放大自发辐射和超辐射过程^[4, 5]。

最近, Vermelho 等人在纯石英纤芯的单模石英光纤中观察到从 1.064 μm 和 1.319 μm 的 Nd:YAG 激光脉冲到 580 nm~610 nm 左右黄光的频率上转换现象^[6~8], 这一过程产生的黄光中心波长与泵浦光的波长无关, 而与光纤的零色散波长有关, 既与光纤结构有关, 是石英材料本身的性质。同时, 黄光信号具有与泵浦光脉冲相当的脉宽, 其光谱宽度基本不变, 并以 LP_{02} 模式在光纤中传播, 这些特征说明不是荧光跃迁过程。该文中没有给出圆满解释。在本文对 $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ 单模光纤中的频率上转换进行了研究, 除观察到 588 nm 黄光外, 还有与之竞争的 460 nm~560 nm 兰绿光的产生。

2 实验装置

实验中采用一台调 Q 锁模运转的 Nd:YLF 激光器作为泵浦源, 其输出波长是 1.313 μm , 锁模脉冲宽度为 100 ps, 重复频率为 76 MHz, 调 Q 脉冲包络宽有 1.5 μs , 重复率是 1.0 kHz。经 25 \times 显微物镜耦合进光纤中的最大平均功率约 300 mW, 对应调 Q 脉冲包络中心处的锁模脉冲的峰值功率有 25 kW。利用一台 1 m 的光栅单色仪测量光纤出射端的光谱。分别

^{*} 本项目获国家自然科学基金及国家攀登计划飞秒激光技术和超快过程研究资助。

用光电倍增管和 Ge 光电二极管接收可见光和红外光信号。

测试中使用的单模光纤是西安西古公司提供的通常通讯用单模石英光纤。其零色散波长在 $1.305\ \mu\text{m}$, 芯径约为 $9.5\ \mu\text{m}$, 截止波长是 $1.2\ \mu\text{m}$, 在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处的损耗小于 $0.5\ \text{dB/km}$ 。

3 结果与讨论

图 1 给出了在 $21\ \text{m}$ 长光纤, 平均泵浦功率 $240\ \text{mW}$ 时的典型可见光光谱。图中黄光的中心波长在 $588\ \text{nm}$, 光谱宽度约 $5.6\ \text{nm}$, 且在不同泵浦功率下谱宽没有明显的变化。可以看到其光谱呈现明显的不对称, 在短波方向有较长的拖尾, 并和 $560\ \text{nm}$ 处的绿光光谱相接。黄光在光纤中以 LP_{02} 模式传输, 这意味着黄光的产生是有相位匹配的要求的。利用 PIN 探测器可以看到黄光信号仍是与泵浦光一样的脉冲链形状, 具有很短的脉冲宽度, 远快于探测器与示波器的响应。

在 $460\sim 560\ \text{nm}$ 间的兰绿光具有 $100\ \text{nm}$ 以上的连续谱, 且有多多个光谱峰, 各个峰的频率间隔是均匀的, 约为 $550\ \text{cm}^{-1}$ 。兰绿光的光谱强度远小于黄光的光谱强度, 而其谱宽远大于黄光, 两者的发射功率基本一样。兰绿光在光纤中以多模形式传输, 在光纤端面出射时发散角很大。高功率时用肉眼可以看到从光纤侧面漏出的兰绿光。

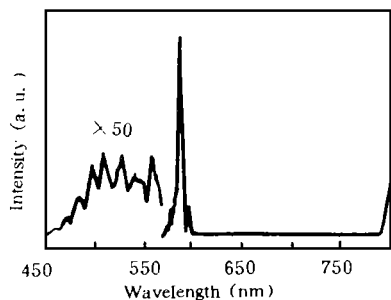


Fig. 1 The spectrum of visible radiation exiting from $21\ \text{m}$ long fiber at pump power of $240\ \text{mW}$

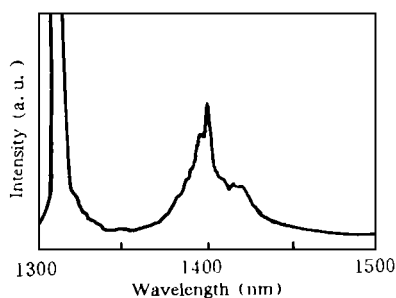


Fig. 2 The spectrum of infrared radiation exiting from $21\ \text{m}$ long fiber at pump power of $240\ \text{mW}$

作者认为兰绿光是泵浦光与其拉曼(Raman)光之间三波混频的结果。图 2 给出了同时测量的红外发射谱。图中拉曼-斯托克斯光的中心波长在 $1.41\ \mu\text{m}$ 处, 对应拉曼频移为 $520\ \text{cm}^{-1}$ 。基频光(Ω)与拉曼光($\Omega = \Omega - \omega$)的三波混频产生 3Ω , $2\Omega + \Omega$, $\Omega + 2\Omega$, 3Ω 等多个频率, 各频率之间的差值均为拉曼频移^[3]。若有二阶、三阶拉曼光则可以形成更多的等频率间隔的光谱峰。在 $460\sim 560\ \text{nm}$ 间各个光谱峰的间隔是 $550\ \text{cm}^{-1}$, 与实际的拉曼频移 $520\ \text{cm}^{-1}$ 是很接近的。同时也注意到, 按以上的解释, 应该有 $1.68\ \mu\text{m}$ 左右的三阶拉曼光才可能产生 $560\ \text{nm}$ 的可见光, 而在实验中只观察到一阶拉曼光, 没有高阶拉曼光。因此, 这一现象还有待进一步探索。

$588\ \text{nm}$ 处黄光的产生过程中有明显的阈值。光纤越短, 阈值越高。对 $21\ \text{m}$ 长光纤, 泵浦阈值功率为 $70\ \text{mW}$ 。当光纤变为 $9\ \text{m}$ 时, 阈值功率上升到 $140\ \text{mW}$ 。而在 $3\ \text{m}$ 光纤中, 阈值功率已经高于 $300\ \text{mW}$ 。图 3 给出了 $21\ \text{m}$ 长光纤中黄光信号强度与泵浦功率的关系, 在双对数座标中表现为折线。当泵浦功率小于 $130\ \text{mW}$ 时, 黄光的信号强度与泵浦功率的 6.6 次幂成正比, 即

$$P_s \propto P_{\text{pump}}^{6.6}$$

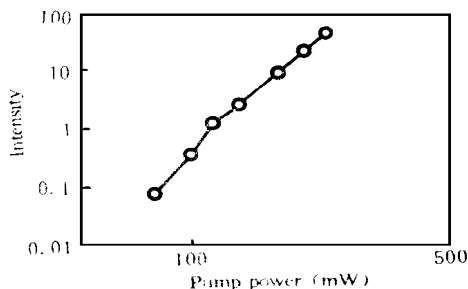


Fig. 3 Signal intensity of yellow light as a function of pump power in 21 m long fiber

当泵浦功率大于 130 mW 时, 有一些饱和, 黄光的信号强度与泵浦功率的 5.3 次幂成正比, 即

$$P_s \propto P_{\text{pump}}^{5.3}$$

这一饱和现象可能是由于拉曼效应。在高功率下, 拉曼效应可以使超过一半的泵浦能量转移到斯托克斯光^[9], 从而限制了黄光的强度增长。在 300 mW 泵浦下, 21 m 光纤中到 0.27 mW 的黄光, 对应脉冲链中心处的脉冲的峰值功率约有 20 W, 上转换效率为 0.09%。与文献[6]相比, 本文的转换效率更低, 同样长光纤的阈值功率更高。

兰绿光的强度变化基本上是泵浦功率的三次方关系, 较黄光的变化缓慢。在泵浦功率低于 100 mW 时, 黄光的光谱强度就低于 560 nm 绿光的强度了。

在实验中还观察到兰绿光和黄光之间的竞争行为。当泵浦功率稳定在 240 mW 时候, 在光纤输出端用肉眼可看到颜色的变化, LP₀₂ 模的黄光与发散角很大的兰绿光交替出现。黄光亮时兰绿光就变暗, 反之一样。变化的时间间隔并无规律, 从小于 1 s 到将近 1 min。前面所给出的光谱实际是竞争过程平均的结果。这说明黄光的产生与拉曼斯托克斯光有关, 拉曼光参与的三波混频过程影响了黄光的产生。在参考文献[8]中, 利用环形腔将拉曼光反馈回光纤中, 使黄光的强度增加了数倍。这与本文的结论是一致的, 但具体过程仍不清楚。

本文观察到光纤经长时间强激光照射后其可见光光谱发生了变化, 参见图 4。主要的变化是 483 nm 处光谱强度的显著增加, 而其他结构没有变化。这是光学预处理使对应这一波长的相位匹配情况得到了改善。类似的光学预处理最先是 by Osteberg 等人在研究石英光纤中 1.064 μm 倍频时发现的^[1, 2]。本文也在 656 nm 处观察到非常微弱的 1.313 μm 倍频光。经过近十小时的强光预处理, 倍频信号没有变化。

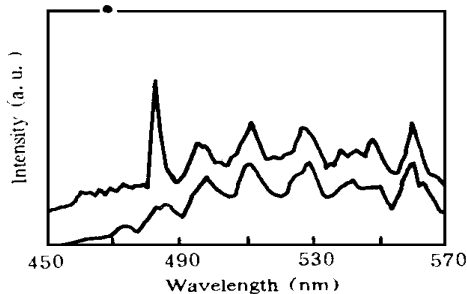


Fig. 4 The radiation spectrum measured before (bottom) and after (top) the optical preparation

结 论 本文研究了 GeO₂/SiO₂ 单模光纤中从 1.313 μm 激光脉冲到 588 nm 黄光和 460~560 nm 范围内兰绿光的频率上转换, 并观察到黄光与兰绿光之间的竞争行为, 以及光学预处理对上转换过程的影响。作者认为兰绿光是泵浦光与其拉曼光之间三波混频的结果。而黄光的产生仍无法解释。一方面, 黄光中心波长与泵浦光的波长无关, 而与光纤的零色散波长有关, 说明这是石英材料本身的性质, 掺杂 Ge 使转换效率下降, 阈值功率增加。另一方面, 黄光信号具有与泵浦光脉冲相当的脉宽, 其谱宽不变, 并以 LP₀₂ 模式传播, 说明不是荧光跃迁过程。黄光的产生还与拉曼斯托克斯光有关, 其阈值行为也可由拉曼效应的阈值行为来解释。总之, 这些现象有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Ulf Osterberg, W. Margulis, Dye laser pumped by Nd:YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(8) : 516~518
- [2] Ulf Osterberg, W. Margulis, Experimental studies on efficient frequency doubling in a glass optical fiber. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(1) : 57~59
- [3] J. M. Gabriagues, Third-harmonic and three-wave sum-frequency light generation in an elliptical-core optical fiber. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(3) : 183~185
- [4] Gerard Mo Nmomo, Bernard Dussardier, Eric Maurice *et al.*, Fluorescence and superfluorescence line narrowing and tunability of Nd³⁺ doped fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(10) : 2361~2367
- [5] D. L. Nicacio, E. A. Gouveia, A. M. Reis *et al.*, Generation of intense green light through amplified spontaneous emission in Er³⁺ doped single mode optical fiber pumped at 1.319 μm . *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(11) : 3634~2638
- [6] M. V. D. Vermelho, A. M. Reis, E. A. Gouveia *et al.*, Efficient frequency upconversion of 1.319- μm radiation into intense yellow light at 580 nm in pure SiO₂-core monomode optical fiber. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18) : 1496~1498
- [7] M. V. D. Vermelho, D. L. Nicacio, E. A. Gouveia *et al.*, Efficient frequency upconversion of 1.064- and 1.319- μm Nd:YAG laser pulses into intense visible light in silica-based optical fiber. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, **10**(10) : 1820~1823
- [8] M. V. D. Vermelho, J. M. Hickmann, E. A. Gouveia *et al.*, Intense picosecond pulse generation in 580~610 nm region from a pure SiO₂-core fiber ring oscillator synchronously pumped by a Nd:YAG laser at 1.319 μm . *Opt. Comm.*, 1995, **113**(1) : 449~452
- [9] A. S. Gouveia-Neto, A. S. Gomes, J. R. Taylor, High efficiency single pass soliton Raman compression in an optical fiber around 1.4 μm . *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12) : 1035~1037

Frequency Upconversion in Germanosilicate Single-Mode Optical Fiber

Hu Wei Liu Dongfeng Chen Guofu Wang Xianhua Hou Xun

(State Key Laboratory of Transient Optical and Technology,

Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 1 October 1995)

Abstract Generation of visible light at 588 nm with peak power as high as 20 W through efficient frequency upconversion of 1.313 μm Q-switched and mode-locked Nd:YLF laser pulse in a standard communication single-mode germanosilicate optical fiber is reported. The conversion efficiency is measured to be 0.09% in 21 m fiber at 24 kW peak pump power. A blue-green light with multi-peak continuous spectrum structure at 46~560 nm generated by three-wave sum-frequency is also observed. The frequency upconversion process of blue green light is competing with the process of generation visible light at 588 nm.

Key words frequency upconversion, germanosilicate single-mode fiber, three-wave sum-frequency.