

掺 Er^{3+} 石英光纤中倍频效应的实验研究*

华一敏 李 劬 陈英礼 陈益新

(上海交通大学应用物理系, 200030)

摘要: 采用一种新的光纤倍频两步激光预处理方法处理掺 Er^{3+} 石英光纤, 并获得 8.8% 的峰值倍频转换效率。测定了掺 Er^{3+} 光纤的有效倍频长度, 探讨了掺 Er^{3+} 光纤产生高转换效率倍频光的物理过程。倍频光的脉宽是基频光波的 0.7 倍和短光纤中倍频光峰值功率随泵浦激光峰值功率平方变化的实验结果表明, 倍频光是通过二阶非线性过程产生的。

关键词: 倍频, 光纤, 掺铒光纤

Experiment on second harmonic generation in Er^{3+} doped silica fibers

Hua Yimin, Li Qu, Chen Yingli, Chen Yixin

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

Abstract: In order to obtain high efficient SHG in fibers, a new method of two-stage laser preparation was used to prepare Er^{3+} doped silica fibers. The maximum peak power conversion efficiency measured was 8.8%. The length dependence of frequency-doubled light in Er^{3+} -doped silica fibers was studied, and the mechanism of high efficient SHG in Er^{3+} doped silica fibers was discussed. The experimental results showed that the pulse width of SH light is 0.7 times as long as that of IR light and that the SH power is quadratically dependent on the IR power in short fibers, and confirmed that the SH light is generated through a second-order nonlinear process.

Key words: second harmonic generation, fiber, Er^{3+} -doped fiber

由于石英玻璃体是一种拥有反演对称、长程无序的非晶材料, 因此石英玻璃光纤中不存在电偶极矩产生的二阶非线性现象。并且由于基波和二次谐波之间的色散以及光纤各个导模间的传播速度差相当小, 光纤中的位相匹配条件很难满足。所以光纤中只有微弱的和频及倍频效应。但是, 最近 U. Osterberg 和 W. Margulis 在经过激光预处理(峰值功率 20 kW)的 $\text{GeO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 光纤中发现高效率(>5%)的倍频现象^[1]。这一现象的发现, 对基础理论的研究和实用化器件的开发都具有重大意义。

本文尝试了一种新的既能缩短处理时间又能获得高倍频效率的两步激光预处理方法预处理掺 Er^{3+} 石英光纤, 测量掺 Er^{3+} 石英光纤的有效倍频长度、倍频光的脉宽和倍频光峰值功率随泵浦激光峰值功率变化关系, 探讨掺 Er^{3+} 光纤产生高转换效率倍频光的物理过程。

泵浦光源是锁模重复率 82 MHz、锁模脉宽 130 ps、调 Q 重复率 3 kHz、调 Q 包络宽度 250 ns、准连续输出 1064 nm 波长的 Nd:YAG 激光器。用于预处理的 532 nm 种子激光通过 KTP 晶体或高效倍频光纤产生。光纤长度几十厘米至一米, 光纤的参数见表 1。我们用 S-20 光电倍增管测量激光预处理过程中 532 nm 倍频光随时间的增长曲线, 用标定的快响应硅 PIN 光电二极管测量峰值倍频转换效率, 并在宽带示波器上观察倍频光的时域脉冲波形。

目前有两种倍频光纤激光预处理方法。U. Osterberg 和 W. Margulis 首次提出的一种方法是只用 1064 nm 激光耦合进光纤进行预处理^[1]。峰值功率 20 kW 的锁模调 Q 准连续激光照射 $\text{GeO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 光纤数小时后, 该光纤可产生转换效率大于 5% 的倍频光。R. H. Stolen 和 H. W. K. Tom 随后提出另一种激光预处理光纤方法, 他们将峰值功率 3.5 kW 的 1064 nm 激光和 10 W 的 532 nm 种子激光耦合进光纤进行预处理, 只需照射 5 min, 光纤的倍频转换效率就达到 0.03%^[2]。

我们按照上述两种激光预处理方法分别处理了掺 Er^{3+} 光纤 (No. 1): (1) Osterberg 方法: 峰值功率 10 kW 的锁模调 Q 准连续 1064 nm 激光耦合进光纤, 连续照射 150 min, 光纤产生的倍频光按指数关系增强了四个数量级 (图 1, 曲线 A) 倍频转换效率达到 2.3% (图 1, 实验点 a); (2) Stolen 方法: 将 KDP 晶体产生峰值功率 100 W 的 532 nm 种子激光与峰值功率 10 kW 的 1064 nm 激光一起耦合进光纤, 照射 10 min, 然后只把 1064 nm 激光耦合进光纤, 这时光纤的倍频转换效率已达到 0.2% (图 1, 实验点 b1)。

用 Osterberg 方法预处理光纤时间长的原因是, 开始照射时主要是光纤芯区-包层界面效应产生微弱的非位相匹配 Cerenkov 辐射倍频光, 然后通过正反馈过程使倍频光增强并形成导模倍频光, 逐渐完成写 $\chi^{(2)}$ 光栅过程。而 Stolen 的种子激光预处理方法速度快的原因是, 532 nm 种子激光较强, 光纤中光辐照产生缺陷的速度较快。但由于较强的 532 nm 种子激光会擦除已形成的 $\chi^{(2)}$ 光栅^[3], 并且由于 532 nm 种子激光同 $\chi^{(2)}$ 光栅产生倍频光的位相差是不同的, 因此我们认为用种子激光预处理方法形成 $\chi^{(2)}$ 光栅的周期性位相匹配条件不如只用 1064 nm 激光预处理方法的好。

为了既缩短预处理时间又提高倍频转换效率, 我们采用一种新的两步激光预处理方法预处理掺 Er^{3+} 光纤。先用 Stolen 方法处理 10 min, 使光纤产生较强的倍频光 (图 1, 实验点 b1), 然后采用 Osterberg 方法只把 1064 nm 激光耦合进光纤, 连续照射 14 min, 这时倍频效率接近饱和。光纤产生的倍频光按指数关系又增强了约一个数量级 (图 1, 曲线 B), 倍频转换效率也达到 2.3% (图 1, 实验点 b2)。比较曲线 A 和放大 6 倍时间尺度的曲线 B, 可以看出

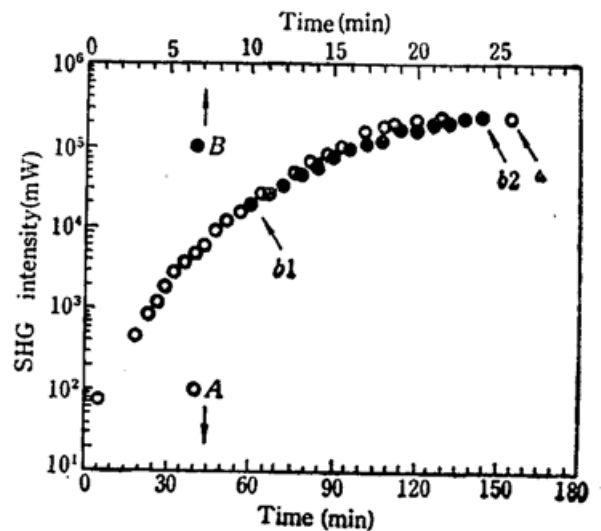


Fig. 1 Output intensity of second harmonic light generated in a Er^{3+} -doped fiber as a function of time. Curve A is the data of self-preparation process, and curve B is that of two stage preparation process. Efficiency of the second harmonic generation at data a, b1 and b2 is 2.3%, 0.2% and 2.3%, respectively

两条曲线重合, 都按指数关系变化, 说明光纤内发生的物理过程是一样的。两步激光预处理方法先使掺 Er³⁺ 石英光纤在外加的基波和二次谐波种子激光作用下快速产生 $\chi^{(2)}$ 光栅, 然后只用 1064 nm 基波激光照射使已形成 $\chi^{(2)}$ 光栅的周期性位相匹配条件达到最佳, 从而快速获得最高倍频转换效率的倍频光。因此, 用两步激光预处理方法节省时间, 使光纤倍频转换效率达到极大值只需要 24min。对另一种长度为 35cm 的掺 Er³⁺ 石英光纤 (No. 2) 用此方法预处理, 倍频转换效率达到 8.8% (表 1), 仅次于 M. O. Farries 在退火的单模保偏 GeO₂/P₂O₅/SiO₂ 光纤中获得的 13% 倍频转换效率^[4]。

Table 1 Parameters of filters and conversion efficiency of SHG

No.	Core	Dopants			Length (cm)	Peak pump power (kW)	Conversion efficiency (%)
	Er ³⁺ (ppm)	GeO ₂ (mol%)	2a (μ m)	Δn (%)			
1	230	8.5	5.2	1.25	35	10	2.3
2	25	8.6	5.7	1.26	35	10(24)	5.9(8.8)

为了确定掺 Er³⁺ 石英光纤中有效产生倍频效应的长度, 我们对经过激光预处理的光纤 (No. 1) 进行截断试验。将激光预处理时的光纤出射端作为入射端, 激光预处理时的光纤入射端逐渐截断并作为出射端, 测量倍频光的强度。实验测量曲线如图 2 所示。激光预处理时的光纤入射端处产生的倍频光是高效率的, 截去 8cm 后倍频光强度下降了 90%, 截去 36 cm 后倍频光强度下降了 99.9%。因此, 有效的倍频主要位于激光预处理时光纤入射端处 36 cm 的区域内。这个实验结果同普通石英光纤中的实验结果是一致的^[5]。

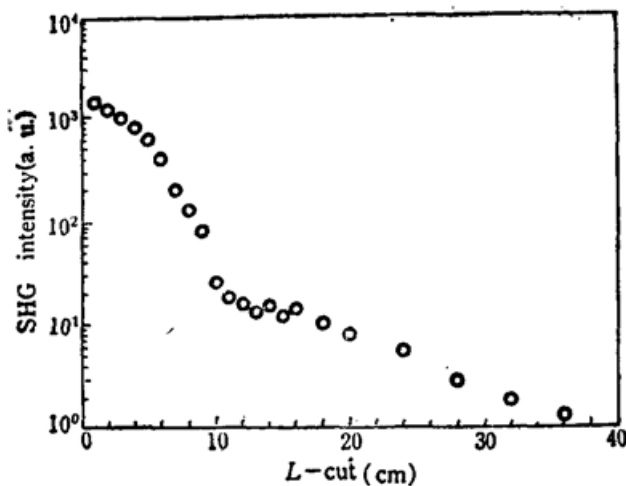


Fig. 2 Second harmonic light intensity generated by a Er³⁺-doped fiber during the readout stage versus the length of cut part of the fiber. The end of the fiber, which was the input one at the preparation stage, was gradually taken off

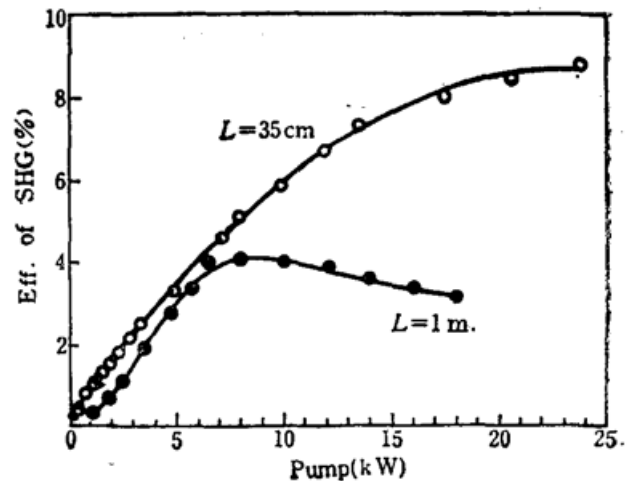


Fig. 3 Efficiency of the second harmonic generation versus IR input peak power.

为了进一步验证掺 Er³⁺ 石英光纤中的倍频效应是通过二阶非线性过程产生的。我们测量了倍频光的脉宽和倍频光强度随泵浦激光功率的变化关系。由于经过预处理后的倍频光纤能在很低峰值功率的基波激光泵浦下产生倍频光, 考虑到仪器的时间分辨率, 我们用 Q 包络宽

度为 250 ns 的调 Q 激光泵浦已激光预处理过的光纤 (No. 1), 用快响应硅 PIN 光电二极管和宽带型示波器观察倍频光的波形。测得 532 nm 倍频光的脉宽为 175 ns, 是基频光波的 0.7 倍。这一实验结果说明, 532 nm 倍频光是通过二阶非线性过程产生的。已激光预处理的光纤 (No. 2) 倍频光强度随 1064 nm 锁模调 Q 泵浦激光功率变化的测量曲线如图 3 所示。对于长度为 35 cm 的短光纤, 倍频光峰值功率随泵浦激光峰值功率的平方变化。这一实验结果也说明, 掺 Er^{3+} 石英光纤中的倍频效应是通过二阶非线性过程产生的。而在长度为 1 m 的长光纤中, 由于产生倍频光的区域主要在激光预处理的光纤入射端一侧, 并且倍频光峰值功率也很高, 光纤将产生 532 nm 倍频光的受激喇曼散射 (尤其是靠近出射端一侧) 等其它非线性效应, 倍频光不再按平方律关系变化, 出现饱和。

光纤中掺入适量 Er^{3+} 离子有利于提高倍频转换效率。R. Astier 等人实验发现 Er^{3+} 掺杂量从 3 ppm 增加到 13 ppm, 掺 Er^{3+} 石英光纤倍频光的强度增加两个数量级, 但他们未报道倍频转换效率^[6]。本文中 Er^{3+} 掺杂量为 25 ppm 掺 Er^{3+} 石英光纤的倍频转换效率可达 8.8%, 而 Er^{3+} 掺杂量为 230 ppm 掺 Er^{3+} 石英光纤的倍频转换效率为 2.3%。我们认为在倍频过程中石英光纤内的 Er^{3+} 有以下几个作用。首先, 由于掺 Er^{3+} 石英光纤在 1064 nm 激光泵浦下会通过基态双光子吸收和受激态单光子吸收产生波长为 468 nm 的频率上转换荧光^[7], 而短波长的光有利于产生光致折变效应, 因此激光预处理时 Er^{3+} 离子产生的 468 nm 荧光将加快光纤中周期性位相匹配 $\chi^{(2)}$ 光栅的形成。其次, 通过 1064 nm 双光子吸收跃迁到 $^2H_{11/2}$ 能带尾的受激态 Er^{3+} 离子, 在光纤内的倍频光共振作用下发射 532 nm 光子返回基态, 这个过程有利于提高倍频转换效率。但由于 Er^{3+} 的基态吸收, 过多掺杂 Er^{3+} 离子 (几百 ppm) 将导致倍频转换效率下降。

本文的实验结果表明, 两步激光预处理方法可在 30 min 内快速制备高倍频转换效率的掺 Er^{3+} 石英光纤, 倍频光是通过二阶非线性过程产生的, 适量 Er^{3+} 离子的掺杂有利于提高倍频转换效率, 最高的倍频转换效率为 8.8%。由于位相匹配条件和纤内高功率密度倍频光产生的其它非线性效应等因素限制了倍频转换效率。

中国建筑材料科学研究院提供本实验用的掺 Er^{3+} 石英光纤, 谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 U. Osterberg, W. Margulis, *Opt. Lett.*, **12**(1), 57~59(1987)
- 2 R. H. Stolen, H. W. K. Tom, *Opt. Lett.*, **12**(8), 585~587(1987)
- 3 Arunas Krotkus, Walter Margulis, *Appl. Phys. Lett.*, **52**(23), 1942~1944(1988)
- 4 M. C. Farries, Nonlinear guided wave phenomena: physics and applications. 1989 Houston Technical Proceedings, P. 246
- 5 M. C. Farries, P. ST. J. Russell *et al.*, *Electr. Lett.*, **23**(7), 322~324(1987)
- 6 R. Astier, G. Boyer, M. Franco, A. Mysyrowicz, OLEO'90, Anaheim, California, U. S. A., May 1990, paper QM07.
- 7 Yi-Min Hua, Qu Li *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **12**(3), 67~70 (1992)