

# Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 掺杂对石英光纤中 倍频的影响\*

华一敏 李 劬 陈英礼 陈益新  
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

## 提 要

实验研究了掺 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 石英光纤中的倍频过程. 测量了不同 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 掺杂量的光纤倍频转换效率和光纤倍频预处理前后 Er<sup>3+</sup> 发射可见荧光的强度, 探讨了 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 掺杂对光纤中倍频过程的影响.

关键词 倍频, 光纤, 掺铒光纤, 掺镱/铒光纤.

## 1 引 言

自从 Osterberg 和 Margulis 在经过激光预处理 (峰值功率 20 kW) 的 GeO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光纤中发现高效率 (>5%) 的倍频现象<sup>[1]</sup> 以来, 许多研究小组进行了大量的理论<sup>[2,3]</sup> 和实验<sup>[4~7]</sup> 工作, 研究光纤中高转换效率倍频过程的物理机制, 探索制备高效倍频光纤的方法.

Tsai<sup>[4]</sup> 等人研究了石英光纤激光预处理前后的电子自旋共振谱, 发现高倍频转换效率的光纤中只有 GeE' 色心缺陷的浓度上升, 这种缺陷是光照产生的. Saifi 和 Andrejco<sup>[5]</sup> 研究了石英光纤中锗、磷的掺杂对倍频效率的影响, 他们的实验结果表明, 仅掺磷光纤不会产生高效转换效率的倍频光; 磷和锗共掺后光纤倍频转换效率为 1.5%, 高于仅掺锗光纤产生的. 而目前最高的光纤倍频转换效率为 13%, 是 Farries 在单模保偏 GeO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光纤中获得的<sup>[6]</sup>.

Astier 等人<sup>[7]</sup> 实验研究了掺 Er<sup>3+</sup> 石英光纤中的倍频现象. 他们比较了 Er<sup>3+</sup> 掺杂量为 3 ppm 和 13 ppm 光纤的倍频光强度, 发现后者光强增加二个数量级 (未报道倍频转换效率), 而 Er<sup>3+</sup> 掺杂量大于 100 ppm 的光纤倍频效率下降到低于未掺 Er<sup>3+</sup> 光纤的倍频效率. 他们认为 Er<sup>3+</sup> 从二方面影响石英光纤的倍频效率: (1) Er<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> - <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 能级间光学跃迁与倍频光 (2Ω) 形成近共振; (2) 倍频光 (2Ω) 近共振条件增强了三阶非线性极化率 χ<sup>(3)</sup>.

本文将用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<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 石英光纤, 测量其倍频转换效率和光纤倍频预处理前后 Er<sup>3+</sup> 发射可见荧光的强度, 并探讨 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 掺杂对光纤中倍频过程的影响.

收稿日期: 1991年6月20日; 收到修改稿日期: 1991年9月9日

\* 国家自然科学基金和上海交通大学青年科学基金资助项目.

## 2 实验装置和结果

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。用于倍频预处理的 532 nm 种子激光通过 KTP 晶体或高效倍频光纤产生。实验用的 Er<sup>3+</sup>/GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 和 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>/GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 掺杂光纤是中国建筑材料科学研究院用溶液法生长的。表 1 中列出了这些光纤的 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 掺杂量及其它参数。图 1 是 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 的简化能级图。我们用 S-20 光电倍增管测量 Er<sup>3+</sup> 发射的可见荧光强度, 用标定的快响应硅 PIN 光电二极管测量 1064 nm-532 nm 峰值倍频转换效率。标定硅 PIN 光电二极管的方法是: 用标定的功率计测量锁模激光的平均功率, 算出光脉冲的峰值功率, 同时在 Tektronix 7904 A 示波器上读出硅 PIN 光电二极管产生的锁模波形峰值, 由此得到示波器波形峰值转换成光脉冲峰值功率的比例系数。对于锁模调 Q 激光, 只要适当衰减被测激光使硅 PIN 光电二极管工作在线性区域, 就能算出锁模调 Q 激光的脉冲峰值功率。从光纤出射的 1064 nm 和 532 nm 光经三棱镜色散后, 分别通过标定的衰减片照射到二个硅 PIN 光电二极管, 在示波器上同时读出这二束光的锁模调 Q 波形的峰值, 计及硅 PIN 光电二极管的光谱响应特性和各自总的衰减系数(测量值), 就能得到峰值倍频转换效率。

### 2.1 倍频光纤的制备与转换效率的测量

为了既缩短倍频光纤预处理时间又提高倍频转换效率, 实验采用了一种新的两步激光预处理方法: 首先将 1064 nm 和 532 nm 种子激光同时耦合进光纤处理 10 min<sup>[2]</sup>, 使光纤产生较强的倍频光, 然后只把 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(见文献[13])。并对表 1 中各种浓度的掺杂光纤用这个方法进行倍频预处理, 测量了这

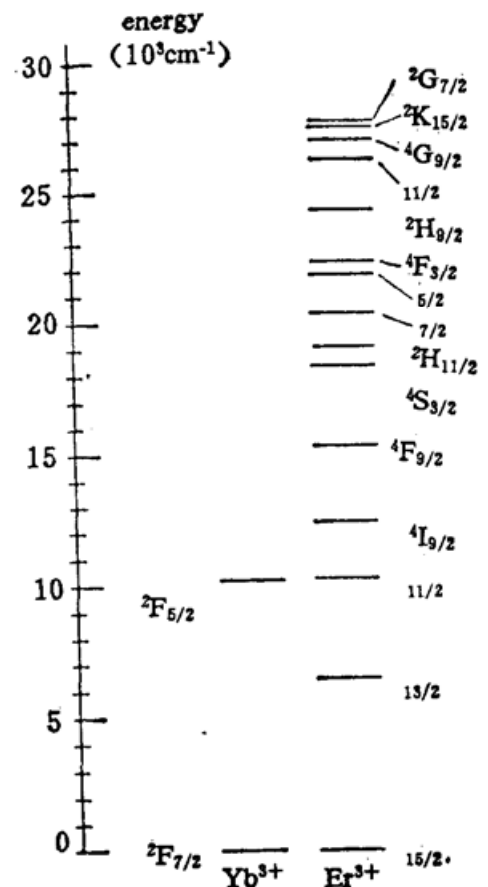


Fig. 1 A simplified energy level diagram of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> ions

Table 1 Parameters of Fibers and Conversion Efficiency of SHG

No.	Core Dopants				Length (cm)	Peak Pump Power (kW)	Conversion Efficiency (%)
	Yb <sup>3+</sup> /Er <sup>3+</sup> (ppm)	GeO <sub>2</sub> (mol%)	2a (μm)	Δn (%)			
1	—/ 25	8.6	5.7	1.26	35	10(24)	5.9(8.8)
2	—/ 230	8.5	5.2	1.25	35	10	2.3
3	400/1200	4.8	7.6	0.70	25	10	4.6
4	900/2700	4.5	8.0	0.65	25	10	0.1

些光纤的峰值倍频转换效率, 其结果一并列入表 1. 获得最高的倍频转换效率为 8.8% (表 1, 光纤 No. 1). 另外, 重复性试验表明, 同种光纤均可达到相同的倍频转换效率; 能够产生倍频的光纤放置几十天后再测量, 倍频转换效率略有下降, 但用 1064 nm 锁模调 Q 激光照射几分钟就能恢复.

## 2.2 光纤倍频预处理前后 $\text{Er}^{3+}$ 发射可见荧光强度的测量

在 1064 nm 激光泵浦下, 掺  $\text{Er}^{3+}$  石英光纤中的  $\text{Er}^{3+}$ , 会通过 1064 nm 双光子吸收和受激态吸收过程, 跃迁到  $^4G_{9/2}$  态, 接着产生  $^4G_{9/2} - ^4I_{13/2}$  跃迁, 发射频率上转换蓝色 (466 nm) 荧光<sup>[8]</sup>; 而在掺  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  石英光纤中, 通过  $\text{Yb}^{3+}$  共振吸收 1064 nm 光子和能量转移过程, 或  $\text{Er}^{3+}$  的 1064 nm 双光子吸收过程, 将  $\text{Er}^{3+}$  激发到高能态, 高能态的  $\text{Er}^{3+}$  再通过能量转移过程或受激态吸收过程, 激发到  $^4F_{9/2}$ 、 $^4S_{3/2}$  和  $^4G_{9/2}$  态, 接着发射波长为 667、546 和 467 nm 的频率上转换可见荧光, 跃迁到低能态<sup>[9]</sup>.

为了分析  $\text{Er}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  两种离子掺杂对光纤中倍频过程的影响, 实验测量了光纤长度 60 cm 和纤内功率 60 mW 不变条件下,  $\text{Er}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  两种掺杂石英光纤倍频预处理前后  $\text{Er}^{3+}$  发射的可见荧光强度. 为了避免高峰值功率锁模调 Q 准连续激光产生的其它非线性效应与频率上转换过程相混淆, 可以用连续输出的 1064 nm 激光作为泵浦源, 耦合进光纤产生频率上转换荧光. 掺  $\text{Er}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  两种石英光纤激光预处理前后上转换荧光光谱的测量结果如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 从图中的曲线可以看出, 能产生高转换效率倍频光的光纤产生的蓝色荧光强度下降.

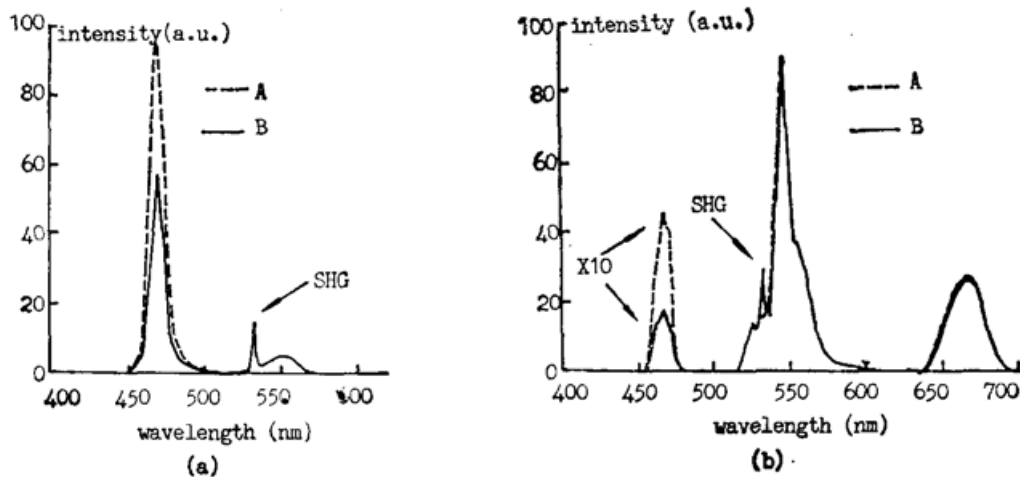


Fig. 2 Upconverted fluorescence spectra emitted from an  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber (Fig. 2(a)) and from a  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  co-doped fiber (Fig. 2(b)) under the CW excitation at 1064 nm. The curves A and B in both figures were measured before and after the fibers were prepared to generate efficient SHG, respectively

## 3 讨 论

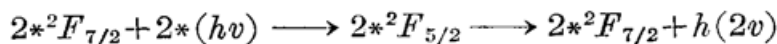
从表 1 中列出的光纤倍频效率测量值可以看出,  $\text{Er}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂对光纤中的倍频过程有影响. 在  $\text{GeO}_2$  浓度 8.6 mol% 的光纤 (No.1) 中掺 25 ppm  $\text{Er}^{3+}$  可提高倍频效率; 而在几乎同样  $\text{GeO}_2$  浓度 (8.5 mol%) 的光纤 (No. 2) 中过多  $\text{Er}^{3+}$  掺杂 (230 ppm) 将使倍频效率

下降; GeO<sub>2</sub> 浓度下降(4.8 mol%)、Er<sup>3+</sup> 掺杂过多(400 ppm)的光纤的倍频效率将会进一步下降,但是 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺后的光纤(No.3)也能产生较高的倍频效率。

Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 可通过以下几个方面影响光纤中的倍频过程。首先,短波长的光有利于光纤产生光致折变效应<sup>[10]</sup>。Lucek 等人发现<sup>[11]</sup>,一根模位相匹配(LP<sub>01</sub>(Ω)模与 LP<sub>31</sub>(2Ω)模的有效折射率几乎相等)的椭圆芯径掺 Ge 石英光纤,在 1064 nm 激光泵浦下的倍频效率为 10<sup>-11</sup>%,用 514.5 nm 连续氩离子激光照射(不加外电场)后,该光纤的 1064 nm 激光倍频效率可提高 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> 倍。而无模位相匹配的光纤用氩离子激光照射后,1064 nm 激光倍频效率无变化。因此,短波长的光照产生的缺陷能提高位相匹配光纤的倍频效率。所以在激光预处理过程中,Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 两种掺杂光纤内产生的荧光,尤其是蓝色荧光,能加快光照产生 Ge E' 色心缺陷的速率,有助于光纤中周期性位相匹配  $\chi^{(2)}$  光栅的形成。

其次本文的荧光谱强度测量结果证明,由于光纤产生了 532 nm 倍频光,将使部分 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 能态上的 Er<sup>3+</sup> 在 532 nm 光场作用下受激发光、跃迁返回基态,从而减少了在 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 受激态再吸收一个红外光子跃迁到 <sup>4</sup>G<sub>9/2</sub> 态的几率,所以蓝色(<sup>4</sup>G<sub>9/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 光学跃迁)荧光强度下降。因此,这个实验现象证明 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 光学跃迁与倍频光(2Ω)形成的近共振,能增强 532 nm 倍频光的强度。但是,由于基态(<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>-<sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>)光学吸收与倍频光(2Ω)也是近共振的,吸收与发射 532 nm 光子两种过程共存并且互相竞争,因此过多的掺杂 Er<sup>3+</sup>(几百 ppm)将导致倍频转换效率下降(见表 1 的实验结果)。

第三,由于 Yb<sup>3+</sup> 的吸收峰与 1064 nm 泵浦激光波长较接近,掺 Er<sup>3+</sup> 光纤中再加入 Yb<sup>3+</sup> 后, Yb<sup>3+</sup> 可通过两种途径提高光纤的倍频效率:一种途径是通过 Yb<sup>3+</sup> 共振吸收 1064 nm 光子和能量转移过程,将 Er<sup>3+</sup> 激发到 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 与 <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> 高能态,Er<sup>3+</sup> 近共振跃迁发光,增强 532 nm 倍频光的强度;另一种途径是通过近共振联合发光过程<sup>[12]</sup>:



即两个基态 Yb<sup>3+</sup> 各自吸收一个 1064 nm 光子跃迁到激发态 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>,然后合并能量发射一个倍频光子返回基态,所以这个过程也能提高光纤的倍频效率。

因此,利用红外激光泵浦下稀土离子 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 能级间跃迁发射的荧光,在 GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 光纤中掺入适量的稀土离子 Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup>,可加快光纤中周期性位相匹配  $\chi^{(2)}$  光栅的形成,并能提高光纤的倍频转换效率。

中国建筑材料科学研究院提供本实验用的掺 Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 石英光纤,谨此致谢!

## 参 考 文 献

- [1] U. Osterberg, W. Margulis, *Opt. Lett.*, 1987, **12** (1): 57~59
- [2] R. H. Stolen, H. W. K. Tom, *Opt. Lett.*, 1987, **12** (8): 585~587
- [3] M. C. Farries, P. St. J. Russell *et al.*, *Electron. Lett.*, 1987, **23** (7): 322~324
- [4] T. E. Tsai, M. A. Saifi *et al.*, *Opt. Lett.*, 1989, **14** (18): 1023~1025
- [5] M. A. Saifi, M. J. Andrejco, *Opt. Lett.*, 1988, **13** (9): 773~775
- [6] M. C. Farries, *Nonlinear guided wave phenomena: physics and applications*, Houston Technical Proceedings, 1989: 246
- [7] R. Astier, G. Boyer, *et al.*, *CLEO' 90*, Anaheim, California, U. S. A., May 1990: QM07
- [8] 华一敏,李劬等. *光学学报*, 1992, **12** (3): 261~264

- [9] 华一敏, 李劬等. 中国激光, 1992, **19** (3): 213~215  
[10] F. Bilodeau, D. C. Johnson *et al.*, *Opt. Lett.*, 1990, **15** (20): 1138~1140  
C. P. Kuo, U. Osterberg *et al.*, *Appl. Opt.* 1990, **29** (30): 4430~4431  
[11] J. K. Lucek, R. Kashyap *et al.*, *J. Mod. Opt.*, 1990, **37** (4): 533~543  
[12] R. Bonneville, F. Auzel, *Optics Comm.*, 1976, **18** (1): 51  
[13] 华一敏, 李劬等. 中国激光, 1992, **19** (5): 377~380

## Influence of $\text{Er}^{3+}$ and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ doping on SHG in silica fibers

HUA YIMIN LI QU CHEN YINGLI CHEN YIXIN

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

(Received 20 June 1991; revised 9 September 1991)

### Abstract

Second harmonic generation in  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  doped silica fibers has been demonstrated. The maximum peak power conversion efficiencies of fibers with various  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  doping have been measured. The visible fluorescence spectra emitted from  $\text{Er}^{3+}$  ions have also been recorded before and after the doped fibers were prepared to generate efficient SHG. And the influence of  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  doping on SHG in silica fibers were discussed.

**Key words** second harmonic generation, fiber,  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber,  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -doped fiber.