

Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂全光纤环形激光器

彭江得 岳超瑜 黄翊东 周炳琨
(清华大学 电子工程系)

提 要

本文报道利用 Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂单模光纤首次研制成功的环形谐振腔结构的可调谐(调谐范围宽于 70 nm)全光纤激光器的设计原理及其实验结果。

关键词: 光纤, 掺杂, 激光器, 调谐。

一、前 言

迄今国外报道的光纤激光器均采用在光纤两端贴反射镜(或直接镀膜)的法布里-珀罗谐振腔结构,为调谐激光波长,必须在腔内附置衍射光栅^[1],因而不可避免地引进很大的腔内损耗,更无法与光纤系统直接耦合。

作者曾报道过首次研制成功的一种新型可调谐 Nd³⁺ 掺杂光纤环形激光器^[2],其结构十分简单,仅用一个可调光纤耦合器,不仅将掺杂单模光纤连成环形谐振腔以产生激光振荡,调整耦合器还可实现对工作波长的连续调谐。在整个激光器内,不存在如反射镜及光栅一类的附加光学元件,不仅腔内损耗极低,其激射特性远优于国外报道的光栅调谐式法布里-珀罗腔光纤激光器,而且其输出端可直接与光纤焊连,易于实现全光纤网络。

最近,作者又研制成工作波长的调谐范围宽达 70 nm 的 Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂全光纤环形激光器^[3],本文详细介绍其设计原理及实验结果。

二、设计原理

可调谐全光纤环形激光器的工作原理基于掺 Er³⁺/Yb³⁺ 光纤荧光谱的宽带特性、光纤环形腔的谐振特性和光纤耦合器耦合系数的波长依赖关系。

稀土离子在石英玻璃的网状结构中跃迁谱展宽,在适当波长的光泵浦下,掺 Er³⁺/Yb³⁺ 石英光纤在 1540 nm 波长附近有一条很宽的荧光谱带,两个峰值分居 1537 nm 和 1553 nm 附近(参见图 5 所示光谱),容易实现激光器波长的连续调谐。又因该谱区恰与 1536 nm 附近的吸收带重合,说明 Er³⁺ 离子的激射跃迁属三能级系统,故要求有足够强的泵浦光功率,以使 1536 nm 附近的光吸收漂白。

将一段掺 Er³⁺/Yb³⁺ 光纤研制成磨抛拼接型可调耦合器,使交叉耦合的一对输入和输出光纤端相连成环,构成光纤环形谐振腔^[4],如图 1 所示。当短波长的泵浦光从 1 端注入耦

合器时,因耦合系数小,绝大部分泵浦光直通到光纤环内被稀土离子吸收,被激发的 Er³⁺ 离子产生较长波长的荧光辐射,并通过耦合器 2、3 端间的强耦合,在光纤环内经多次循环,形成顺、逆时针两个方向的受激光振荡,分别从 4 端和 1 端输出激光。因耦合器的耦合系数随波长而变,且与两光纤间的距离有关,激光振荡应在荧光谱区内对应于耦合系数最大的波长处产生,调节耦合器的光纤间隙,则最大耦合系数所对应的波长发生改变,使输出激光波长得调谐。于是,利用单个耦合器便可同时实现泵浦光的直通注入、激射光的振荡和工作波长的调谐等三个功能。因此,精心设计和制作可调光纤耦合器是实现可调谐全光纤环形激光器的关键。

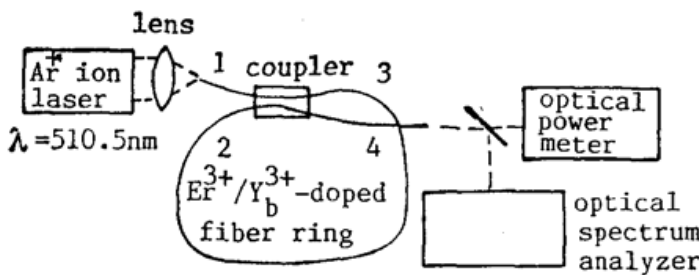


Fig. 1 Experimental configuration of a fiber laser using a fiber ring resonator

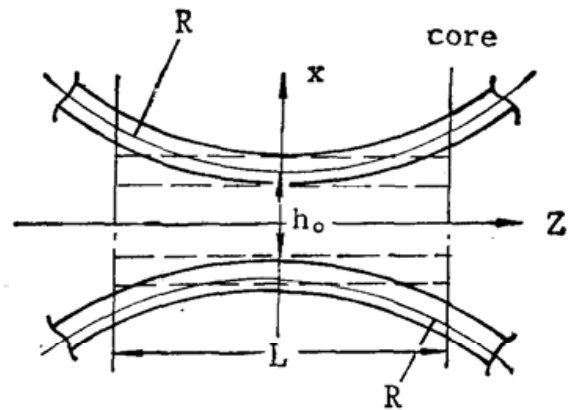


Fig. 2 Geometry of the curved-fiber coupler showing the effective interaction length L

实际的磨抛拼接型光纤耦合器通常取弧形弯曲光纤对称结构,如图 2 所示。根据模耦合理论,从一根光纤耦合器到另一根光纤的光功率百分比(即光功率耦合比)可表示为^[5]

$$K = \sin^2(OL), \tag{1}$$

式中 L 为总功率耦合比与弧形光纤耦合器相等的等效平行光纤耦合器的作用区长度, O 为光纤间距等于弧形光纤耦合器中心光纤间距最小值的等效平行光纤耦合器的耦合系数, O 是波长的函数,且与两光纤中心轴间距 h 有关,在弱导条件下可近似为^[5]

$$O = \frac{\lambda u^2}{2\pi n_1 a^2 V^2} \frac{K_0(vh/a)}{K_1^2(v)}, \tag{2}$$

式中 a 为光纤芯半径, n_1 为光纤芯折射率, u 和 v 为归一化横向模参量, V 为归一化频率且满足 $V^2 = u^2 + v^2$, K_v 为 v 阶第二类变态贝塞耳函数。等效作用长度 L 与弧形光纤弯曲半径 R 及纤芯半径 a 有关,且亦为波长的函数。当弯曲弧度不很大时,可近似为

$$L \approx (\pi a R / v)^{1/2}, \tag{3}$$

因横向模参量 v 随波长的增大而减小,故 L 随波长的增大而增大。

根据(1)~(3)式,选择合适的光纤间距 h 和光纤弯曲半径 R 即可控制 O 和 L 的大小,进而调整耦合器对不同波长光波的耦合比。图 3 给出 R 与 h/a 取不同值时,乘积 OL 与波长 λ 的关系。对于光泵浦环形光纤激光器,希望泵浦光纤直注入到光纤环内并被吸收,以形成有效的泵浦,故耦合比 K_0 应尽可能小,相反,对于激散光,则要求能通过耦合器形成闭合器谐振光路,故相应的耦合比 K_1 应有较大的值。根据(1)式,耦合器参量的设计应满足如下关系

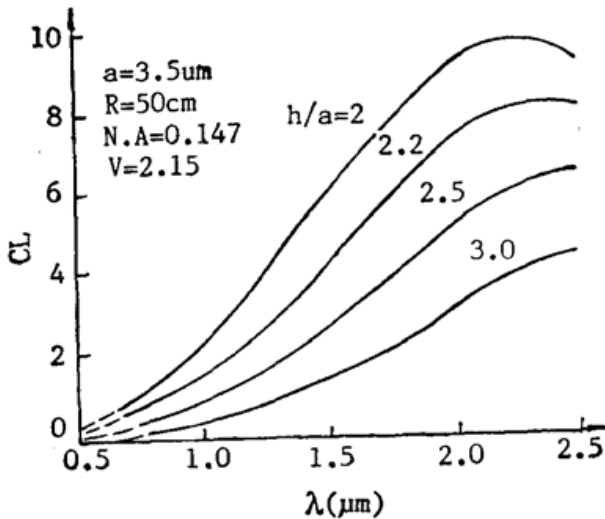


Fig. 3 Theoretical dependence of the product CL on the wavelength

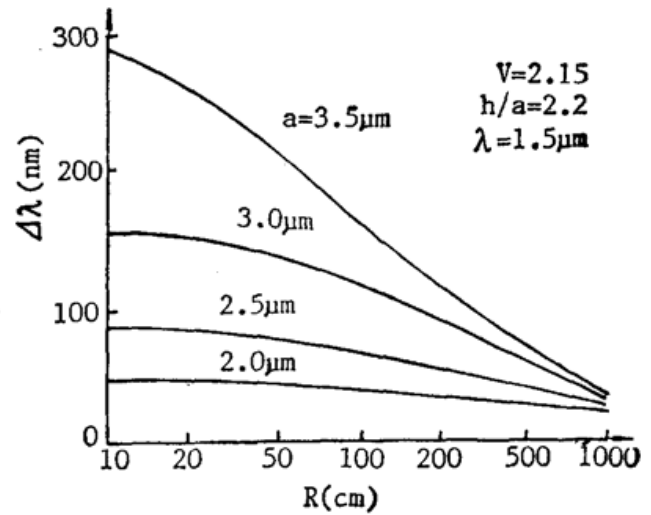


Fig. 4 Theoretical dependence of the bandpass width of the fiber coupler on the radius of curvature R and the fiber core radius a

$$\left. \begin{aligned} C_p L_p &\approx m\pi, \quad (m=0, 1, 2, \dots) \\ C_l L_l &\approx (2n+1) \frac{\pi}{2}, \quad (n=0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于可调谐光纤激光器,耦合器的设计还应考虑其对激光波长的选择性,它由耦合器的带通宽度 $\Delta\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|$ 决定, λ_1 和 λ_2 分别为相邻最大和最小耦合比对应的波长。根据(1)式,相应的耦合系数应满足如下条件

$$|C_1 - C_2|L = (\pi/2), \quad (5)$$

由此得到 $\Delta\lambda$ 的表示式

$$\Delta\lambda = \frac{(\pi/2)}{\left| C \frac{\partial L}{\partial \lambda} + L \frac{\partial C}{\partial \lambda} \right|_{\bar{\lambda}}} \quad (6)$$

显然, $\Delta\lambda$ 越小,则耦合器的波长选择性越好,相应的输出激光谱线越窄,波长调谐的连续性越好。从(6)式可见,要求 C 和 L 及其随波长的变化率取值要大,利用(2)式和(3)式,得到 $\Delta\lambda$ 与耦合器结构参量的关系如图4所示。由图4可见,研制耦合器宜采用芯半径 a 较小的光纤,尽量增大光纤弯曲半径 R ,并尽可能减小两光纤间距 h ,这就给耦合器的磨抛工艺提出了苛刻的要求。目前掌握的磨抛工艺已能使光纤包层厚度精确减薄到 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。

以本文报道的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{2+}$ 掺杂光纤激光器为例,光纤芯半径 $a = 3.5 \mu\text{m}$,耦合光纤弯曲半径 $R = 50 \text{ cm}$,取 $(h/a) = 2.2$ 。对于泵浦波长(514.5 nm), $C_p L_p \approx 0.2$,即 $K_p \approx 0.9$,可见进入耦合器的泵浦光仅损耗4%;对于激光波长(1540 nm), $C_l L_l \approx 4.6$,得 $K_l \approx 0.99$,相应的耦合器带通宽度 $\Delta\lambda \approx 214 \text{ nm}$ 。若采用更小芯径的光纤,并增大弯曲半径,则波长选择性可望大幅度改善。

三、实验结果

国产 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂单模光纤数值孔径 $N.A. = 0.147$,测得泵浦光(514.5 nm)的吸收衰减为 1500 dB/km ,在激光波长(1540 nm)的衰减约为(250 dB/km),做成周长为 1 m 和

8 m 的环形谐振腔。实验装置如图 1 所示。Ar⁺ 离子激光(514.5 nm)通过透镜从环形光纤腔 1 端注入,用光功率计(Photodyne 33×LA)和扫描光谱仪(AQ1417B)从 4 端监测输出的光功率和光谱。当耦合器失谐时,不形成谐振腔,从 4 端观察到荧光,图 5(a)给出光谱仪上显示的荧光谱。调节耦合器,使光纤环形腔处谐振状态,从光谱仪上观察到极窄的激射谱线。微调耦合器改变两光纤间距 h ,泵浦光耦合系数变化极小,而激射光相应的耦合系数改变较大(参见图 3),在几乎整个荧光谱带内观察到激射谱线的连续变化,如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示。应当指出的是,在 1537 nm 的短波谱区,只测得两条断续的谱线,未获得连续的波长调谐,这是因为该谱区的增益带宽比耦合器的带通宽度要窄得多,激射跃迁只能在增益峰值附近发生。与此相反,在 1553 nm 的波谱区,荧光带展布较宽,而且在较长波长边,由于 Er³⁺ 离子低能级的分裂变为准四能级系统,因而形成渐衰的荧光带尾,获得从 1551.2 nm 直到 1602.2 nm 工作波长的连续调谐,且长波边的谱线明显展宽,如图 5(e)所示。

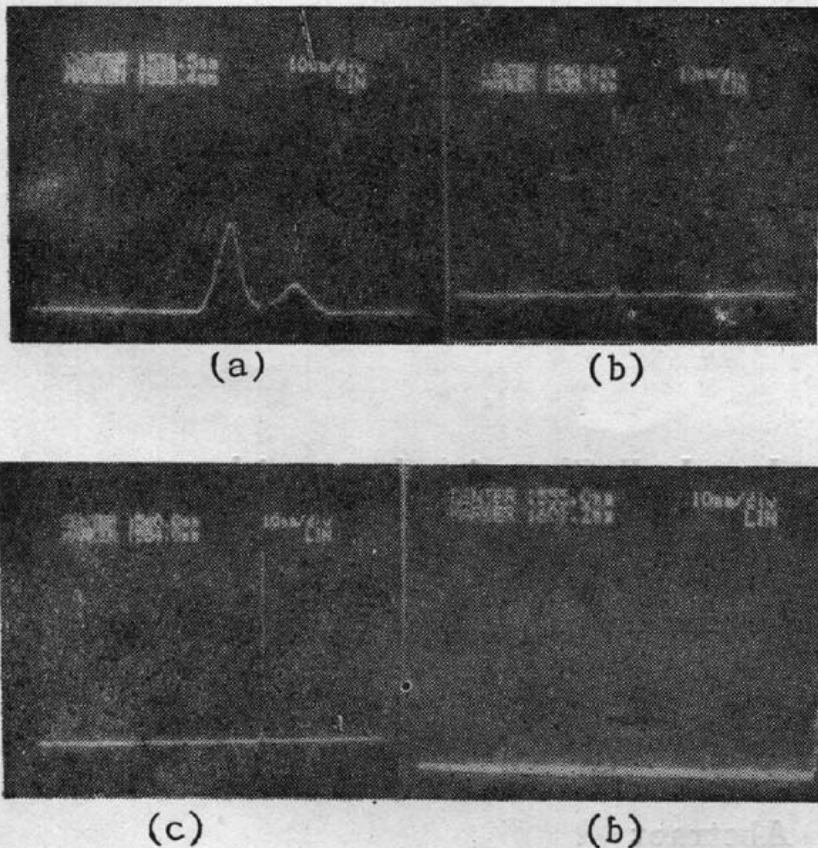


Fig. 5 Output spectrum of a tunable Er³⁺/Yb³⁺-doped fiber laser:

(a) fluorescence spectrum, (b), (c) and (d) lasing spectrum

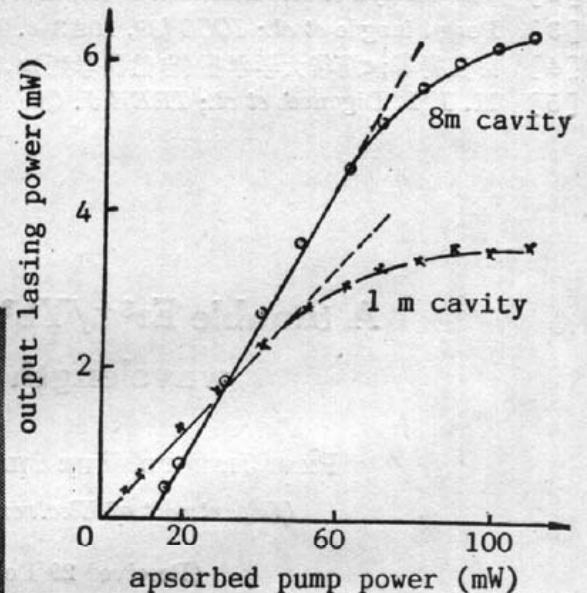


Fig. 6 CW lasing characteristics of a Er³⁺/Yb³⁺-doped fiber ring laser operating at 1.554 μm

掺 Er³⁺/Yb³⁺ 光纤激光器的功率特性示于图 6,对于 1 m 长的器件,阈值光功率为 1.9 mW,斜率效率为 6.1%。迄今国外报道的 5145 nm 波长泵浦的可调谐掺 Er³⁺ 光纤激光器采用光栅调谐的法布里-珀罗腔结构,腔长 0.96 m 的器件阈值光功率竟高达 30 mW,而斜率效仅 0.6%^[1]。从比较可知,全光纤激光器的特性远比分离元件结构的器件要好得多。还应指出,由于该 1 m 长激光器的耦合器加工质量欠佳,其性能并未达到最佳值。图 6 中所示另一只腔长 8 m 的器件,虽然因光纤长度增加致使阈值升高到 14.2 mW,然而斜率效率却提高到 10.2%。从图 6 所示功率特性还可看到,当泵浦功率过大时,输出激光功率曲线偏离线性,这是由于光纤掺杂浓度较低引起的功率饱和所致。

四 结 论

一种环形谐振腔结构的新型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂全光纤可调谐激光器研制成功, 具有阈值低、效率高、波长调谐范围宽的优良特性, 并可与光纤系统直连, 对于今后发展全光纤激光技术有重要意义。如进一步实现单纵模运转并采用最佳泵浦波长(980 nm)的半导体激光泵浦源, 则该激光器的特性可望获得大幅度提高, 并将在光纤通信和光纤传感等技术领域获得重要应用。

中科院上海硅酸盐研究所吴方东等同志提供了优质的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂光纤; 清华大学陈抗美同志为加工耦合器付出了辛勤的劳动, 作者谨向他们致以衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] I. Reekie *et al.*; *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**, No. 7 (Jul), 956~960.
- [2] Yue Chaoyu *et al.*; *Electron. Lett.*, 1989, **25**, No. 2 (19 Jan), 101~102.
- [3] Peng Jiangde *et al.*; *IOOC '89*, 10A3-4, Kobe, Japan,
- [4] 彭江得等;《清华大学学报(自然科学版)》, 1989, **28**, No. 53 (Apr), 70~75.
- [5] M. J. I. Digonnet *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 746~754.

A tunable $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped all-fiber ring laser with wavelength tuning range of >70 nm

PENG JIANGDE, YUE CHAOYU, HUANG YUDONG AND ZHOU BINGKUN
(Department of Electronic Engineering, Qinghua University, Beijing)

(Received 29 December 1989; revised 25 April 1990)

Abstract

A novel tunable all-fiber laser using $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped single-mode fiber ring resonator has been demonstrated. In our specially designed all-fiber configuration, a tunable fiber coupler was used not only for coupling the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber to become a ring resonator but also for wavelength tuning. In addition, there are not any reflective elements in the laser so that the excess loss was very low. A wavelength tuning range of >70 nm was obtained. The design and experimental results are reported in this paper.

Key words: fiber; dope; laser; tuning.