

# 1018 nm 掺镱光纤激光器

谢璐<sup>1,2</sup> 陈瑰<sup>1,2</sup> 王一礴<sup>1,2</sup> 廖雷<sup>1,2</sup> 蒋作文<sup>1,2</sup> 戴能利<sup>1,2</sup> 李进延<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学, 湖北 武汉 430074  
<sup>2</sup> 武汉国家光电实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 由 1018 nm 光纤激光器组成的同带抽运结构激光器是实现单根掺镱光纤达到输出极限的方法之一。由于 Yb<sup>3+</sup> 在发射光谱短波长处有相对较大的吸收截面, 掺镱激光器一般很难工作于波长 1030 nm 以下。为获得高效率 1018 nm 光纤激光器, 最根本的方法是调整掺镱光纤的光谱性质, 使光纤发射次峰尽量靠近 1018 nm。对 Yb<sup>3+</sup> 在石英光纤中光谱性质的改变机理进行了研究, 通过共掺杂的方法获得了高性能 1018 nm 掺镱光纤, 其预制棒发射次峰位于 1008 nm, 光纤发射次峰位于 1021 nm。相较普通掺镱光纤, 光纤发射次峰蓝移了 18 nm, 1018 nm 处截面差值大。1018 nm 激光的光-光转换效率达到 68%。

**关键词** 激光器; 掺镱光纤; 共掺杂; 1018 nm 激光

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0714002

## Ytterbium-Doped Silica Fiber Laser at 1018 nm

Xie Lu<sup>1,2</sup> Chen Gui<sup>1,2</sup> Wang Yibo<sup>1,2</sup> Liao Lei<sup>1,2</sup>

Jiang Zuowen<sup>1,2</sup> Dai Nengli<sup>1,2</sup> Li Jinyan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)  
(<sup>2</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** The upper limit of output power for single-mode laser from a single ytterbium-doped fiber can be reached using a tandem pumping configuration. Ytterbium-doped fiber laser is difficult to operate below 1030 nm due to the relatively large absorption cross sections. In order to get highly efficient ytterbium-doped fiber laser, the most basic method is to regulate the fluorescence properties of fiber and make the emission subpeak approach 1018 nm. The mechanism of how Yb<sup>3+</sup> ions fluorescence properties change in silica fiber is studied and a 1018 nm ytterbium-doped fiber is obtained by co-doped method. The emission subpeaks of the preform and fiber are at 1008 nm and 1021 nm, respectively. The emission subpeak of the fiber is 18 nm, which is shorter than that of normal Yb-doped fiber, and the difference of emission cross sections is larger. Its optical-optical conversion efficiency at 1018 nm is up to 68%.

**Key words** lasers; ytterbium-doped fibers; co-doped; 1018 nm laser

**OCIS codes** 140.3615; 060.2290; 060.3510

## 1 引 言

近年来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率已经从最初的几百毫瓦上升到了数千瓦水平。研究表明,由单根掺镱光纤组成的单模光纤激光器,其

输出功率上限为 36 kW。其中,激光器同带抽运结构是单根光纤达到输出极限的实现方法之一。通常,掺镱光纤激光的输出中心波长为 1.08  $\mu\text{m}$ ,镱离子实际的光谱范围为 1.01~1.062  $\mu\text{m}$ 。由于镱离子发射光谱在短波长处有相对较大的吸收截面,掺镱激

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-03-06

基金项目: 国家 863 计划(2013AA031501)

作者简介: 谢璐(1989—),女,硕士研究生,主要从事特种光纤及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: sa.guaro@163.com

导师简介: 李进延(1972—),男,博士,教授,主要从事特种光纤及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: lji@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

光器一般很难工作于 1030 nm 波长以下<sup>[1]</sup>。用特殊波长激光器取代常用抽运源,可获得更高功率的光纤激光器。2009 年,IPG 公司报道了 10 kW 同带抽运结构的单模光纤激光:1070 nm 激光器由 1018 nm 光纤激光器抽运,1018 nm 激光器由 975 nm 半导体激光器抽运<sup>[2]</sup>。

1018 nm 激光器可以作为高功率掺镱光纤激光器的抽运源进一步提高掺镱光纤激光器输出功率,也有助于扩展掺镱光纤激光器光源范围,并对特殊波长光纤研究制备具有启示作用。另外,1018 nm 激光器具有应用于冷放大的潜力,目前冷放大主要由激光制冷实现。

1018 nm 同带抽运的优势在于:1)尽管掺镱光纤在 1018 nm 处的吸收比 975 nm 处要小得多,但 1018 nm 光纤激光器比半导体抽运要亮得多。并且,它可以耦合入相对更小的光纤内包层内,因此抽运光可以更好地被纤芯吸收。2)激光器的量子亏损率为  $\eta = 1 - (h\nu_1/h\nu_2)$  ( $h$  为普朗克常数,  $\nu_1, \nu_2$  分别为激光和抽运频率)。用 975 nm 激光二极管(LD)抽运 1070 nm 掺镱激光器,其量子亏损率为 9%;而用 1018 nm 抽运,其量子亏损率小于 5%,低量子数亏损可以有效地减少热问题<sup>[3]</sup>。另外,同带抽运可以有效抑制高阶模增益,有助于激光器单模输出<sup>[4]</sup>。

特殊波长激光器通常利用窄带介质膜反射镜、光栅或棱镜对等组成色散腔的方法,但这些方法大部分是通过改变谐振腔结构<sup>[5]</sup>或损耗<sup>[6]</sup>,或选择不同的光栅来实现<sup>[7-8]</sup>。为了使系统结构更为简单实用,最根本的方法是通过改变掺镱光纤的共掺材料来改变其光谱性质,使光纤的发射峰尽量靠近 1018 nm,提高 1018 nm 掺镱光纤激光器的斜率效率和输出功率。

## 2 材料对 $\text{Yb}^{3+}$ 光谱影响机理

### 2.1 计算方法

1018 nm 光纤激光器的效率与光纤在 1018 nm 的发射和吸收截面差值有关。其中,吸收截面  $\sigma_{\text{abs}}$  可以通过测量样品的吸收光谱得到:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{2.303 \lg(I_0/I)}{Nl}, \quad (1)$$

式中  $\lg(I_0/I)$  为吸收度,  $I_0$  为入射光强,  $I$  为出射光强,  $N$  是单位体积中  $\text{Yb}^{3+}$  浓度(每立方厘米的离子个数),  $l$  为样品的厚度。

受激发射截面  $\sigma_{\text{emi}}$  通过吸收光谱得到,其计算公式为

$$\sigma_{\text{emi}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{Z_l} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right), \quad (2)$$

式中  $Z_l/Z_u$  为配分函数比,一般采用近似值 4/3。  $E_{Z_l}$  是零线能量,对应  $^2F_{5/2}$  和  $^2F_{7/2}$  的最低斯塔克能态能量差,相当于  $hc\lambda_p^{-1}$ , 其中  $\lambda_p$  为峰值波长,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为热力学温度。由倒易法确定的受激发射截面  $\sigma_{\text{emi}}$  仅取决于吸收光谱,与荧光光谱测量结果无关,从而避免了荧光光谱测量中再吸收引起的误差。

### 2.2 影响机理

改变掺杂材料可使掺镱光纤在 1018 nm 处获得尽可能大的激光输出和斜率效率,也就是使掺镱光纤在波长 1018 nm 处发射截面与吸收截面的差值尽可能大,达到  $\text{Yb}^{3+}$  发射次峰蓝移的目的。本文主要从三个方面对特殊波长掺镱光纤进行研究:共掺离子、稀土掺杂离子与光纤光学特性的依赖关系;最佳共掺配方;各离子的最佳浓度。

掺镱光纤的光谱性质主要由  $\text{Yb}^{3+}$  和基质决定,其中  $\text{Yb}^{3+}$  本身的性质起主导作用。基质对  $\text{Yb}^{3+}$  光谱的影响主要表现在两个方面:一是引起斯塔克能级分裂。由于电场的非均匀性分布的影响,消除了原来存在的能级简并度,因此对给定的电子跃迁,光谱上将出现精细结构。第二个影响是使能级加宽。由于基质作用而使离子能级加宽的机制比较复杂,有多种因素可对其产生影响。在掺杂离子 ( $\text{Yb}^{3+}$ ) 和基质(石英)已定的情况下,不同共掺材料改变精细结构中各能级的能量差  $\Delta_1 \sim \Delta_6$  (如图 1 所示),从而使  $\text{Yb}^{3+}$  具有不同特征的吸收和发射光谱。因此可以根据实际需要改变共掺材料以调节掺镱光纤的光谱性质。

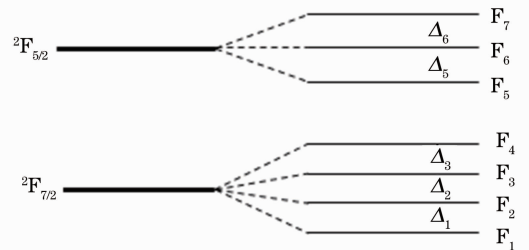


图 1  $\text{Yb}^{3+}$  精细结构能级

Fig. 1  $\text{Yb}^{3+}$  fine structure energy level

$\text{Yb}^{3+}$  在不同玻璃基质中吸收光谱的差别不大。玻璃基质对  $\text{Yb}^{3+}$  的作用,主要是配位体对  $\text{Yb}^{3+}$  的作用<sup>[9]</sup>。玻璃中  $\text{Yb}^{3+}$  的配位数一般是不变的,主要起作用的是  $\text{Yb}^{3+}$  与配位体之间共价键成分的多少。氧化物玻璃中,这种共价键成分决定于氧离子极化程

度,即取决于阴离子团对  $\text{Yb}^{3+}$  的作用程度,一般随玻璃结构单元中心原子电负性下降,中心离子与  $\text{O}^{2-}$  的作用变弱,阴离子团对  $\text{Yb}^{3+}$  的作用大小依次为  $[\text{ClO}_3]^- < [\text{PO}_3]^- < [\text{BO}_3]^- < [\text{SiO}_4]^- < [\text{BO}_4]^-$ 。从左到右,吸收带波长向长波长方向移动,吸收带增多,线宽增大,吸收系数增加。因此,不同共掺杂对掺镱光纤吸收光谱位置的影响很小。掺 P 会减少光纤的吸收, B 在光纤和玻璃中会同时呈现  $\text{B}^{3+}$  和  $\text{B}^{4+}$  状态,不便于控制。选择共掺可以达到减小 1018 nm 吸收的目的,但 Al 之外的掺杂剂会减少积分吸收<sup>[10]</sup>。

在一定范围内,  $\text{Yb}^{3+}$  浓度对荧光强度的影响很大,随着浓度的增加,荧光强度逐渐上升,但当浓度增加到一定值时,会造成荧光淬灭,荧光强度很快下降。所以应当选择适当的掺镱浓度,使荧光强度达到最大。

在大多数无机玻璃中,  $\text{Yb}^{3+}$  处于网络结构的空隙,因而具有较高的配位数,并主要是以离子键与阴离子( $\text{O}^{2-}$ )连接。一般来说,  $\text{Yb}^{3+}$  周围配位场的对称性都较低,而  $\text{Yb}^{3+}$  配位场越不对称,发射截面越大<sup>[11]</sup>。配位场对称性取决于两个方面:1)玻璃网络形成体的种类;2)是否存在网络修饰体及其数目多少。如果系统中网络形成体、修饰体间的场强相差较大,  $\text{Yb}^{3+}$  团的非对称度增大,从而增大斯塔克能级分裂使发射截面增大。例如,网络形成体间的阳离子场强差<sup>[12]</sup> 递减顺序为  $\text{B-Nb} > \text{P-Nb} > \text{Ge-B} > \text{Si-B}$ ,在有两种形成体(含量近似相同)的掺镱玻璃系统中,其发射截面的大小顺序为:  $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3\text{-RO} > \text{P}_2\text{O}_5\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-RO} > \text{Ge}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-RO} > \text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-RO}$ 。

对掺镱光纤来说,在纤芯和包层中加入共掺杂剂不仅影响光纤的发射和吸收特性,还可有效改变其折射率分布,而且与光纤的背景损耗密切相关。由于工艺以及光纤本身特性等限制,掺镱光纤不能大量掺入修饰离子,可共掺的离子有限。而掺镱光纤在 1018 nm 处的发射截面小,吸收截面却相对较大,导致激光器在该处的斜率效率低,所以微小的共掺修饰影响也可以大大提高 1018 nm 激光器的性能。

### 2.3 各元素对光纤光谱的影响

为获得高性能 1018 nm 掺镱光纤, P 是合适的共掺杂剂,它既可以使发射峰蓝移又可以增大发射截面<sup>[12]</sup>,同时,掺入  $\text{Al}^{3+}$  可改善光纤的激光特性<sup>[13]</sup>。

共掺杂剂 Al 被认为是提高纤芯稀土掺杂浓度最关键的成分。通过在纤芯中掺入  $\text{Al}^{3+}$  可改善光

纤的激光特性,  $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Si}^{4+}$  可以互相替代,当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  少量存在时,都以  $[\text{AlO}_4]$  四面体存在与  $[\text{SiO}_4]$  形成玻璃骨架,  $[\text{SiO}_4]$  和  $[\text{AlO}_4]$  配位体形状相似。但由于  $[\text{AlO}_4]$  有多余的负电价,按结晶化学电中性原则,必须吸引正离子来保持平衡,因此会在一定程度上增加玻璃网络致密性,同时  $[\text{AlO}_4]$  对正离子相对于  $[\text{SiO}_4]$  有更大的需求,因此提高了稀土离子(RE)在玻璃中的溶解度,避免了稀土因高掺杂带来的团簇效应,减小因析晶导致背景损耗的增加<sup>[13]</sup>。通过掺入 Al 可以增大斯塔克能级分裂值使稀土离子的吸收和荧光光谱展宽,从而增加抽运波长的带宽和增大输出激光的可调谐范围<sup>[14]</sup>。实验表明,大量掺 Al 会导致稀土荧光中心的红移,减小 1018 nm 处的吸收。

共掺杂剂 P 可以增大  $[\text{YbO}_6]$  配位的不对称度,使发射波长蓝移;  $[\text{PO}_3]^-$  阴离子团对  $\text{Yb}^{3+}$  作用较小,使吸收波长向短波长移动,吸收系数减小。光纤石英基质中,重掺 P,虽然提高了纤芯的折射率,但能提高 RE 的掺杂浓度避免团簇发生,避免稀土离子析晶<sup>[12,15]</sup>,同时也能提高 1018 nm 光纤性能。

Ge 是石英光纤最常用的掺杂剂,一般 Ge 元素的掺杂可以极大地减小光纤背景损耗,但不利于光谱的蓝移。

## 3 光纤制备

实验制备了不同共掺材料的光纤预制棒(掺杂材料分别为 Yb/Al、Yb/P、Yb/P/Ge),并测试其光谱性质进行比较分析,如表 1 所示。常规掺镱石英光纤(Yb/Al)中,  $\text{Yb}^{3+}$  的溶解度比 Yb/P 共掺光纤低,因此 Yb/Al 样品中  $\text{Yb}^{3+}$  浓度为 0.06 mol/L。由于 P、Ge 采用气相掺杂方式掺入,故采用体积流量单位 mL/min。

表 1 样品掺杂浓度

Table 1 Dopant concentration of samples

	Yb/Al	Yb/P	Yb/P/Ge
Dopant concentration of Yb / (mol/L)	0.06	0.12	0.12
Dopant concentration of Al / (mol/L)	0.3	--	--
Dopant concentration of P / (mL/min)	--	200	200
Dopant concentration of Ge / (mL/min)	--	--	20

实验采用改进化学气相沉积和液相掺杂法制备掺镱石英光纤。掺磷预制棒制备步骤为:1)对纯石英薄壁管内壁进行抛光处理后,通入混合气体:  $\text{SiCl}_4$ 、 $\text{POCl}_3$ 、 $\text{O}_2$  和 He,采用正向沉积方式沉积包

层;2)包层层积完毕抛光,通入  $\text{SiCl}_4$ 、 $\text{POCl}_3$  和  $\text{O}_2$  或  $\text{GeO}_2$ ,反向沉积芯层。随后对反应管进行抛光处理,同时进行反向磷补偿;3)将反应管用含有共掺离子和稀土离子的  $\text{HCl}$  混合液浸泡约 5 h,并将反应管匀速旋转;4)溶液浸泡充分后,通入  $\text{Cl}_2$  和  $\text{O}_2$ ,烘干处理,随后在  $\text{He}$ 、 $\text{Cl}_2$  和  $\text{O}_2$  的混合气氛下缩棒;5)经过精密机械加工,将预制棒加工为所需形状;6)采用拉丝塔对光纤预制棒拉制成普通双包层有源光纤。

#### 4 测试结果与分析

将制备的预制棒切片进行荧光测试,图 2 为荧光光谱,可以看出,相比普通掺镱预制棒(Yb/Al)的 1024 nm, P/Ge 共掺预制棒切片荧光次峰蓝移至 1012 nm 次峰,单掺磷预制棒切片荧光次峰蓝移幅度最大。

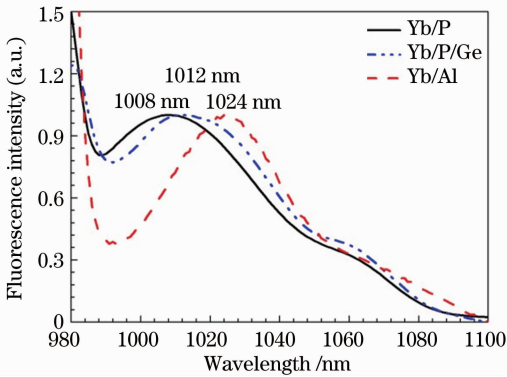


图 2 预制棒切片荧光次峰光谱

Fig. 2 Subpeak in fluorescent spectra of preform slice

将 Yb/P、Yb/Al 光纤分别拉制为 15/130、10/130 光纤,相同长度条件下,利用 PK2500、Zolix 光纤特性综合测试仪测试吸收和荧光光谱。由于纤芯

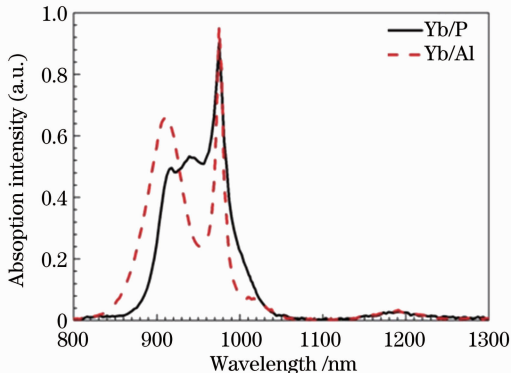


图 3 Yb/P 和 Yb/Al 光纤的吸收光谱

Fig. 3 Fiber absorption spectra of Yb/P and Yb/Al

尺寸及掺杂浓度不同,对光纤吸收、荧光光谱进行归一化处理(如图 3 和图 4 所示)。从吸收谱可以看出, P 使掺镱光纤 915 nm 处吸收变得平滑,1018 nm 附近吸收与常规掺镱光纤基本相同。从荧光光谱可以看出, Yb/P 共掺光纤的荧光次峰蓝移了 18 nm,位于 1021 nm 处。两根光纤 1018 nm 处荧光强度与最大值比值分别为 0.99 和 0.66。

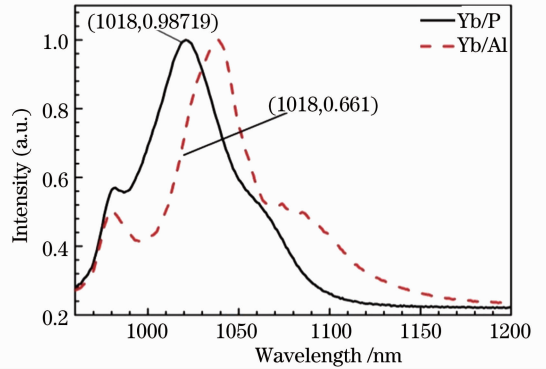


图 4 Yb/P 和 Yb/Al 光纤荧光光谱

Fig. 4 Fiber fluorescent spectra of Yb/P and Yb/Al

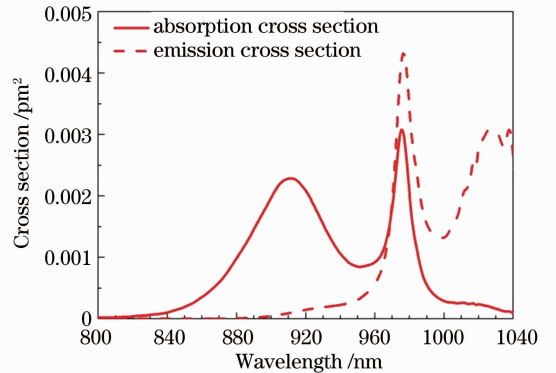


图 5 Yb/Al 光纤的吸收和发射截面

Fig. 5 Absorption and emission cross sections of Yb/Al fiber

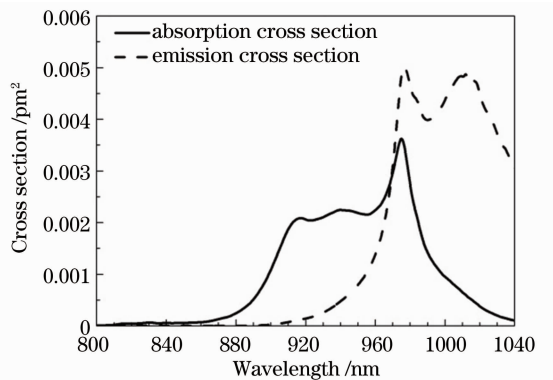


图 6 Yb/P 光纤的吸收和发射截面

Fig. 6 Absorption and emission cross sections of Yb/P fiber

为了比较 1018 nm 处发射截面与吸收截面差,根据测试的吸收光谱分别计算 Yb/P、Yb/P 光纤的吸收截面,再利用倒易法计算发射光谱,如图 5、6 所示。表 2

表 2 1018 nm 处光谱性质

Table 2 Spectroscopic properties at 1018 nm

	$\sigma_{\text{emi}} / (10^{-3} \text{ pm}^2)$	$\sigma_{\text{abs}} / (10^{-4} \text{ pm}^2)$	$\Delta / (10^{-3} \text{ pm}^2)$
Yb/P	4.72	4.38	4.28
Yb/Al	2.50	2.33	2.27

对 Yb/P 光纤进行激光测试,采用 975 nm 半导体激光器抽运,测试结构如图 7 所示。在增益光纤长度为 7 m 时,输出功率最大且剩余抽运光较少,当抽运光功率为 22 W 时,有 13.6 W 的激光输出,光-光转换效率达到了 68%;当抽运功率为 44 W

为两光纤 1018 nm 处光谱性质,可以看出, Yb/P 光纤在 1018 nm 处的发射截面与吸收截面差  $\Delta$  相较 Yb/Al 光纤大,有利于光纤在 1018 nm 激光输出。

时,输出功率为 22.8 W,光-光转换效率为 62.8%。抽运光功率为 47 W 时,激光输出的光谱如图 8 所示,中心波长为 1018.3 nm,谱宽为 0.076 nm。图 9 为 7 m Yb/P 光纤激光器功率输入输出关系。

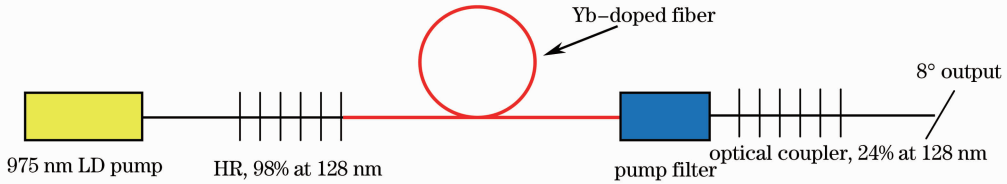


图 7 光纤激光测试示意图

Fig. 7 Structure of fiber laser testing

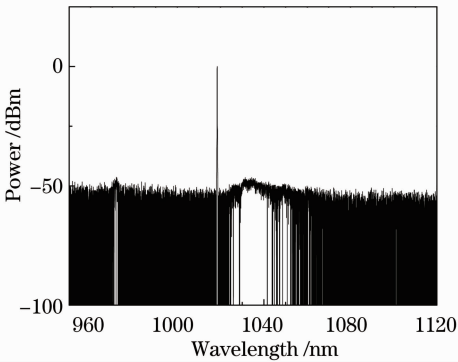


图 8 7 m 长增益光纤激光光谱

Fig. 8 Fiber laser spectroscopy of 7 m-length ytterbium fiber

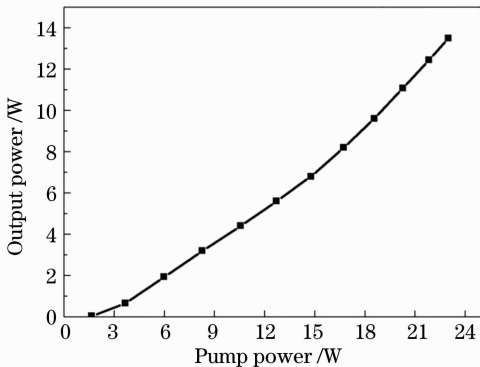


图 9 7 m Yb/P 光纤激光器输入输出关系

Fig. 9 Relationship between pump power and output power of Yb/P fiber laser

## 5 结 论

实验制备了不同共掺材料的掺镱石英光纤,比较其光谱可知,为了获得高性能 1018 nm 掺镱光纤,P 是合适的共掺剂。制备的 Yb/P 光纤相较普通掺镱光纤,发射次峰蓝移了 18 nm,1018 nm 处截面差值大,1018 nm 激光的光-光转换效率可达到 68%。另外,实验结果还说明了 Al 和 Ge 对掺镱石英光纤光谱的影响,为同带级联抽运奠定了基础,对特殊波长光纤制备具有启示作用。

为获得高性能 1018 nm 掺镱石英光纤,除改善其光谱性质外,还应考虑光纤的背景损耗、数值孔径、增益系数等参数。因此,实验下一步将考虑在 Yb/P 共掺的基础上优化浓度比,共掺其他元素进一步改善 1018 nm 掺镱光纤的性能并在激光器上应用。

## 参 考 文 献

- 1 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper, *et al.*. Efficient superfluorescent light sources with broad bandwidth [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 1997, 3(4): 1097-1099.
- 2 Z Li, J Zhou, B He, *et al.*. Diode-pumped 1018-nm ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(9): 91401.
- 3 S Matsubara, K Uno, Y Nakajima, *et al.*. Extremely low quantum defect oscillation of ytterbium fiber laser by laser diode pumping at room temperature [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Optical Society of America, 2007, TuB4.

- 4 C A Codemard, J Nilsson, J K Sahu. Tandem pumping of large-core double-clad ytterbium-doped fiber for control of excess gain [C]. OSA/ASSP/LACSEA/LS&C, 2010, AWA3.
- 5 Zhang Panzheng, Fan Wei, Wang Xiaochao, *et al.*. Mode-locking and multiwavelength operation from all-fiber ytterbium doped laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302001.  
张攀政, 范 薇, 汪小超, 等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302001.
- 6 Chen Bai, Chen Lanrong, Fan Wei, *et al.*. Tunable operation in ytterbium-doped cladding fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(9): 835–838.  
陈 柏, 陈兰荣, 范 薇, 等. 掺 Yb 双包层光纤激光器波长调谐输出[J]. 光子学报, 1999, 28(9): 835–838.
- 7 Hou Guofu, Li Yigang, Lü Kecheng, *et al.*. Widely tunable Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(12): 1510–1513.  
侯国付, 李乙钢, 吕可诚, 等. 宽带可调谐掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的研究[J]. 光子学报, 2002, 31(12): 1510–1513.
- 8 Sun Hongzhi, Liang Jianzhong, Hu Yimei, *et al.*. A high efficient tunable Yb doped double cladding fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1372–1374.  
孙宏志, 梁建中, 胡宜梅, 等. 高效率可调谐掺镱双包层光纤激光器研究[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1372–1374.
- 9 H Takebe, T Murata, K Morinaga. Compositional dependence of absorption and fluorescence of Yb<sup>3+</sup> in oxide glasses [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(3): 681–687.
- 10 J Kirchhof, S Unger. Codoping effects in fibers for active applications [C]. Optical Fiber Communication Conference, 1999, 2: 196–198
- 11 M Weber, J Lynch, D Blackburn, *et al.*. Dependence of the stimulated emission cross section of Yb<sup>3+</sup> on host glass composition [J]. IEEE J Quantum Electron, 1983, 19(10): 1600–1608.
- 12 X L Zou, H Toratani. Evaluation of spectroscopic properties of Yb<sup>3+</sup>-doped glasses [J]. Phys Rev B, 1995, 52 (22): 15889–15897.
- 13 N T T Nguyen. The Role of Aluminum in Rare Earth-Doped Sol-Gel Silicate Glasses [D]. Hamilton College, 2007
- 14 Yan Fengpin, Wang Lin, Wei Huai, *et al.*. Investigation of codoping Al<sup>3+</sup> in ytterbium-doped silica-based fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1793–1797.  
延风平, 王 琳, 魏 淮, 等. 石英基掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤中 Al<sup>3+</sup> 共掺特性的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1793–1797.
- 15 J Kirchhof, S Unger, A Schwuchow, *et al.*. Dopant interactions in high-power laser fibers [C]. SPIE, 2005, 5723: 261.

栏目编辑: 宋梅梅