

光纤激光器与放大器

董孝义

(南开大学现代光学研究所)

光纤中掺杂少量稀土元素后可成为激活介质,进而可制作成光纤激光器与放大器。本文简要阐明这种新颖激光及其放大的机制与初步理论,并指明一些因素对其性能的影响。作为光纤激光器的谐振腔,除沿用常规的法布里-珀罗腔外,还可使用光纤环形腔、双环反射器谐振腔及史密斯腔等。本文还对光纤激光放大、调 Q 、锁模、频率调谐等重要光纤激光技术作了扼要介绍。

长期以来,光纤只作为被动的传输介质使用,后来人们逐渐发现光纤具有非线性光学效应,可用来产生自相位调制、光孤子、受激喇曼和布里渊散射等,从而使其成为主动介质,并得到广泛应用^[1]。近年来人们又进一步发现,向光纤中掺杂某种稀土元素后可使之激活,成为激光介质,当使用适当泵浦源对其激励时即可形成激光放大和振荡^[2]。利用这种方法制作的激光器或激光放大器,波长可处于光纤通信最佳窗口,而且又能与通信光纤兼容,加之它又具有结构小巧、造价便宜、频带宽响应快、效率极高等一系列优点,因此这种新颖器件一经问世便引起了人们的广泛关注。最近光纤激光器与放大器发展极为迅速。例如,日本、美国近期已完成具有光纤放大器的长距离无中继光纤通信实验^[3]。这一事实表明,光纤激光器与放大器将引起光纤通信的深刻变革。

一、原理

众所周知,一般激光器是由激光介质和谐振腔组成。对于光纤激光器,激活介质即为掺杂光纤,如图1(a)所示。由此产生一系列新的特征:第一,由于光纤又是光的导波介质,在单模状态下泵浦光功率密度很大,且与激光能够充分耦合,故转换效率极高;第二,光纤的几何形状具有很高的体积/表面积之比值,易散热,

损耗小,因此光纤激光阈值很低;第三,实际上谐振腔的两个介质镜可以直接镀在光纤的两个端面上,如图1(b)所示,也可以采取方向耦合器的方式实现反馈,并由于光纤具有柔韧性和可挠性,因此光纤激光器可以设计得相当小巧;第四掺杂光纤的掺杂物(各种稀土离子)和承受掺杂的基质(如硅光纤、氟化物光纤等)具有相当多的可调参数和可选择性,因此可获得各种波长的激光,加之玻璃光纤的荧光谱很宽,因此还可以获得可观的调谐范围和相当好的单色性等。正因如此,光纤激光器才引起了人们的极高的研究兴趣和热情。

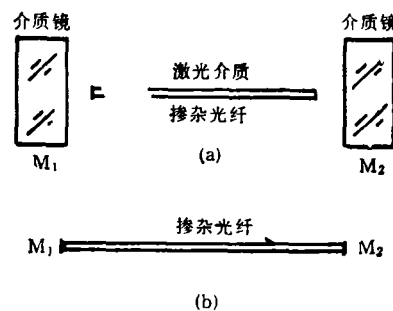


图 1

显然,由上述得知,对于光纤激光器与放大器的理论分析应基于激光理论^[4]与光纤理论^[5]的结合,这方面最好的例子是最近发表的关于三能级光纤激光放大理论^[6]。首先假定泵光光强、信号光光强和掺杂离子沿光纤的分布形式分

别为

$$\left. \begin{aligned} I_p(r, \theta, z) &= I_{p0}(z)f(r, \theta), \\ I_s(r, \theta, z) &= I_{s0}(z)g(r), \\ N_T(r, \theta, z) &= N_0 \cdot n(r), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $f(r, \theta), g(r)$ 反映光纤中的模式特征。对于阶跃型光纤, 它们分别表示为

$$\left. \begin{aligned} f(r, \theta) &= \begin{cases} J_l^2(ur/a) \cos^2 l\theta & r < a, \\ [J_l(u)/K_l(w)]^2 K_l^2 \\ \cdot (wr/a) \cos^2 l\theta & r > a; \end{cases} \\ g(r) &= \begin{cases} J_0^2(ur/a) & r < a, \\ [J_0(u)/K_0(w)]^2 \\ \cdot K^2(wr/a) & r > a, \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 a 为纤径, u, w 为光纤横向归一化传播常数。根据激光理论, 对于三能级系统, 假定介质 (即掺杂光纤) 是均匀饱和的, 则激光上、下能级的粒子数密度可由下式给出:

$$\left. \begin{aligned} N_T(r, \theta, z) &= \frac{N_T(r, \theta, z)}{1 + I_p(r, \theta, z)/I_0}, \\ N_L(r, \theta, z) &= \frac{N_T(r, \theta, z)}{1 + I_0/I_p(r, \theta, z)}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里 I_0 为介质的饱和强度。考虑到对泵光的吸收转化为对信光的增益, 令沿掺杂光纤单位长度的有效增益系数和泵光的有效吸收系数分别为 $[\alpha_s]_{\text{eff}}$ 和 $[\alpha_p]_{\text{eff}}$, 利用(1)–(3)式即可得到激光放大参数 R , 即

$$\begin{aligned} R &= \frac{\text{单位长度上的增益}}{\text{单位长度上吸收的泵功率}} \\ &= \frac{(\alpha_s)_{\text{eff}}}{(\alpha_p)_{\text{eff}} \cdot P_p^{(s)}} \\ &= \frac{\sigma_G}{\sigma_A P_0} \left[I_0 \left(\int_0^\infty n(r)g(r)[2A(r) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 1]rdr \right) / \left(\int_0^\infty n(r)A(r)rdr \right) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

Nd^{3+} 的重要荧光带是

$$\text{从 } {}^4I_{9/2} \text{ (基态)} \begin{cases} \rightarrow {}^2H_{9/2} \text{ 和 } {}^4F_{5/2}, & \text{中心波长} \sim 0.8 \mu\text{m}, \\ \rightarrow {}^4F_{3/2}, & \text{中心波长} \sim 0.90 \mu\text{m}. \end{cases}$$

$$\text{从 } {}^4F_{3/2} \text{ (激发态)} \begin{cases} \rightarrow {}^4I_{9/2}, & \text{中心波长} \sim 0.90 \mu\text{m}, \\ \rightarrow {}^4I_{11/2}, & \text{中心波长} \sim 1.06 \mu\text{m}, \\ \rightarrow {}^4I_{13/2}, & \text{中心波长} \sim 1.35 \mu\text{m}. \end{cases}$$

Er^{3+} 的重要吸收带是

其中

$$\begin{aligned} P_0 &= I_0 \pi a^2, \\ I_0 &= \pi a^2 \int_0^\infty g(r) 2\pi r dr, \\ A(r) &= \begin{cases} 1 - (1+a)^{-1} & l=0, \\ 1 - (1+a)^{-1/2} & l \neq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

利用这一结果可以推导出掺杂离子分布轮廓及泵光模式对光放大的影响, 以及激发态吸收对激光放大的影响等, 还可以进一步推导出激光振荡以及四能级系统的有关结果^[7]。但总的来说, 由于掺杂光纤激光器与放大器的影响因素多, 且较为复杂, 因此目前尚难以形成满意的理论, 研究工作有待进一步深化。

二、掺杂光纤激光器中的掺杂光纤

掺杂光纤是由掺杂物和作为掺杂物宿主的基质组成的。

1. 掺杂物

目前用于光纤激光器和放大器并产生实际意义的掺杂物主要是稀土元素的离子。稀土元素即镧系元素一共有 15 个, 在周期表中占据倒数第二行的位置。它们具有相同的外电子结构 $5s^2 5p^6 6s^2$, 4f 壳层内占据的电子数决定着元素的光学性质。稀土元素的离子多以三价状态出现, 如 $\text{Nd}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 等, 它们逸出二个 6s 和一个 4f 电子。

目前开展的掺杂光纤激光器与放大器研究主要集中在掺 Nd^{3+} 和掺 Er^{3+} 方面, 它们在玻璃基质中的吸收谱和荧光谱如图 2(a) 所示^[2]。图 2(b) 是有关的电子能级图。从中可以看出:

Nd^{3+} 的重要吸收带是

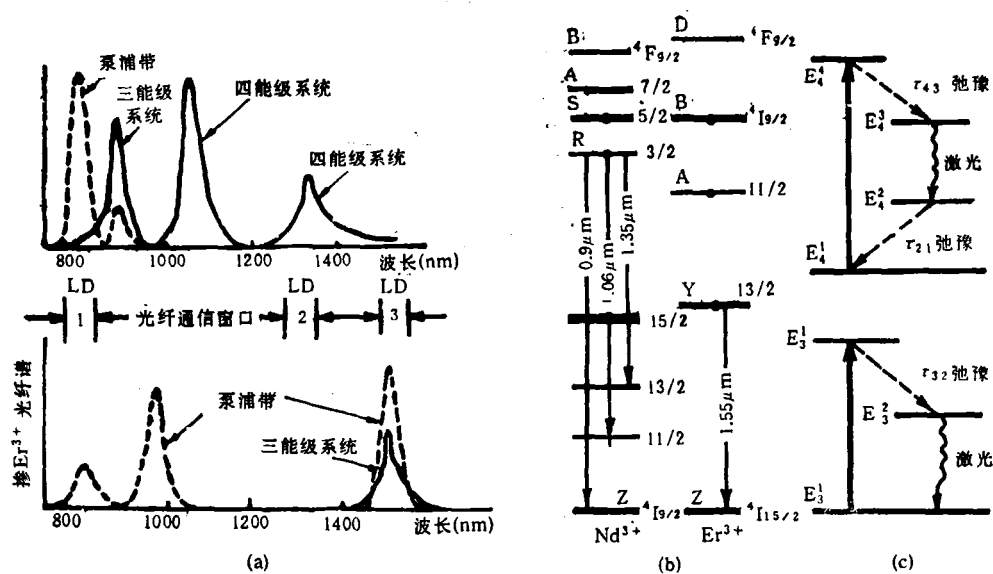


图 2

从 ${}^4I_{15/2}$ (基态) $\left\{ \begin{array}{l} \longrightarrow {}^4I_{9/2}, \text{ 中心波长} \sim 0.80 \mu\text{m}, \\ \longrightarrow {}^4I_{11/2}, \text{ 中心波长} \sim 0.98 \mu\text{m}, \\ \longrightarrow {}^4I_{13/2}, \text{ 中心波长} \sim 1.55 \mu\text{m}. \end{array} \right.$

Er^{3+} 的重要荧光带是

从 ${}^4I_{15/2}$ (激发态) $\rightarrow {}^4I_{15/2}$, 中心波长 $\sim 1.55 \mu\text{m}$. 从中可以看出, Nd^{3+} 的 $0.90 \mu\text{m}$ 和 Er^{3+} 的 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处吸收与荧光谱线重叠, 因此在该波长上形成的激光一定是三能级系统的. 三能级和四能级的区别是很重要的, 从图 2 不难看出, 前者的激光下能级即为基态, 而后者下能级则不是基态, 因此要实现激光上、下能级的“粒子数反转”, 前者则需要更多的泵光光子, 或者说它需要更高的阈值. 进而可以推论: 在不考虑光纤损耗的情况下, 作为光纤激光器来说, 四能级系统的激光阈值与掺杂光纤的长度成反比; 而三能级系统则不是这样, 考虑到光纤对激光光子的再吸收, 自然存在一最佳长度, 在这个长度上, 激光阈值最低.

实验表明, 掺杂浓度也存在一最佳值, 浓度过低或过高均不利于产生激光. 若掺杂过低, 在掺杂离子总有效数低于入射光子的区域, 基态可能被耗尽, 增益终止; 如果掺杂过高, 则会出现浓度抑制问题, 即在高掺杂时, 相邻离子间会出现非辐射交叉弛豫, 致使激光上能级有效

粒子数降低, 激光过程受到限制. 现有的实验数据表明, 对于硅光纤激光器, 最佳掺杂均为几百个 ppm 的浓度.

2. 光纤基质

光纤的基质材料是玻璃. 玻璃大都是由形成无序基体的共价键分子组成的. 稀土离子的掺杂, 实质上是作为改体填隙于玻璃网格之中. 玻璃基质对稀土离子的光谱能级施加两种影响: 一是导致斯塔克分裂, 使光谱出现亚结构; 二是致使能级展宽. 展宽的机制有声子展宽和基质电场扰动展宽, 前者为均匀展宽, 与温度有关, 后者则为非均匀展宽, 与温度无关, 展宽的性质与幅度对于激光的形成及其特征是至关重要的. 至今在光纤激光器与放大器的研究中主要使用了硅(玻璃)基质和氟化物(如氟化锆)玻璃基质, 后者在产生中红外波段的激光方面占有优势, 因而引起了广泛关注^[8].

三、光纤激光器的谐振腔

在光纤激光器中除采用图 1 所示的 F-P 腔结构外, 还较多地应用了光纤耦合器形式的新型谐振腔. 图 3 给出了三种有代表性的腔结构^[2].

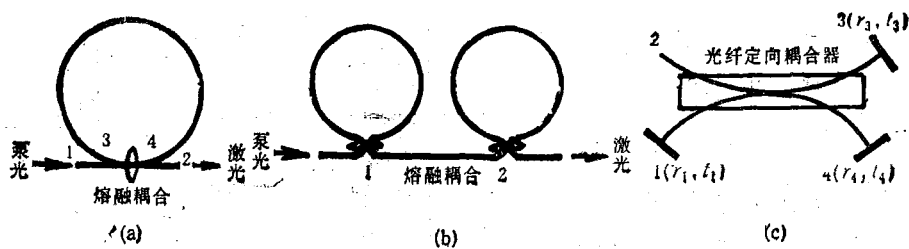


图 3

1. 光纤环形谐振腔

图 3(a) 是这种谐振腔的示意图,其核心部分是光纤定向耦合器,有关它的工作原理、制作方法已在很多文献中有过叙述^[2]. 这里主要是应用它的相干分束功能. 耦合器的两个臂(图中的 3, 4 点)连接在一起,构成了光的循环传输行程. 耦合器起到了反馈作用,并构成一环形谐振腔体. 腔的精细度由耦合比决定,耦合比低,精细度高,精细度越高,腔的贮能作用越强.

第一个采用环形腔的掺杂光纤激光器实验是 1985 年完成的. 环形腔是用掺钕光纤制作的,直径为 70cm, 光纤熔融耦合器的耦合比为 1:10 以下. 使用波长为 0.595 μm 的染料激光泵浦,阈值为几个 mW.

2. 光纤环反射器及其谐振腔

图 3(b) 所示是两个光纤环反射器构成的谐振腔. 对于一个光纤环来说,耦合器作用光可沿顺、逆时针两个方向传播. 如果令输入光功率为 P_{in} , 耦合比为 K , 在不计及耦合损耗时, 光纤的透射与反射光功率输出则分别为

$$\left. \begin{aligned} P_t &= (1 - 2K)^2 P_{in}, \\ P_r &= 4K(1 - K)P_{in}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

显然有 $P_t + P_r = P_{in}$. 当 $K = 0$ 或 1 时, 反射率 $r = P_r/P_{in}$ 为零, 而透射率 $t = P_t/P_{in} = 1$; 当 $K = 1/2$ 时, $r = 1$, 而 $t = 0$. 这说明该光纤环是一分布型反射器, 因此两个这样的环串接起来就成为一种新颖的谐振腔, 而且可以通过调节耦合比改变反射率来控制激光输出特性.

第一个采用这种双光纤环谐振腔的光纤激光器实验是在 1987 年完成的. 光纤环是掺钕光纤制作的, 全长 4.88m, 耦合器的剩余损耗仅

为 0.04dB, 因此(5)式可以使用. 实验中用波长为 0.806 μm 的半导体激光器泵浦, 阈值功率为 470 μW .

3. 福克斯-史密斯光纤谐振腔

这也是一种利用光纤耦合器的谐振腔, 但也使用了介质镜, 如图 3(c) 所示. 它是一对腔(图中 1-4 臂和 1-3 臂)借助光纤定向耦合作用构成了一复合谐振腔. 由于复合腔具有纵模抑制作用, 因此这种腔体是获得窄带输出的有力手段.

四、光纤激光技术

短短几年里, 光纤激光放大与振荡、光纤激光调谐、光纤激光线宽压缩以及光纤激光调 Q 和锁模等激光技术均得到广泛研究, 并且取得了一系列可喜的成绩.

1. 光纤激光器

到目前为止, 0.90 μm , 1.06 μm 和 1.35 μm 波长的掺 Nd^{3+} 光纤激光器和 1.55 μm 波长的掺 Er^{3+} 光纤激光器均已成功地进行了实验, 并希望很快实用化, 重金属掺杂氟化物光纤(如波长在中红外波段的掺钕、掺铥氟化锆光纤)激光器也取得明显的进展^[8]. 在这些工作中, 最引人注目的成就是, 在光纤通信最佳窗口上实现了 LD 泵浦的光纤激光振荡. 例如, Millar 使用波长 0.807 μm 的小型 LD 作泵浦, 完成了波长为 1.55 μm 的掺铒光纤激光器实验, 掺 Er^{3+} 浓度为 500ppm, 光纤直径为 3 μm , 长度为 1.3m, 阈值功率为 1mW^[9].

2. 光纤激光放大器

光纤激光放大器有三种应用模式, 即作为

激光功率放大使用、作为光中继器使用和作为光预放使用,其中第二种最有应用前景,如图4所示。在这几种模式中,均使用了光纤定向耦合器,以便将泵光方便地引入掺杂光纤。因此,要求它对于泵光波长有高的耦合率,而对信号光波长有低的耦合率,并确保行波传输。

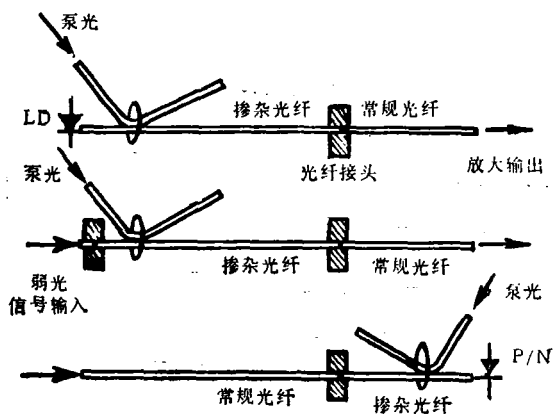


图 4

和光纤激光器情况类似,在光纤激光放大器中,掺 Er^{3+} 的光纤放大最引人关注。其主要原因是它可以作为光纤通信窗口的光中继器使用,以替代庞大的光-电-光中继,实现全光型通信。关于光纤激光放大器的研究工作已有很多报道,其中最出色的工作是最近完成的^[40]。Whitley 等人使用波长为 $0.807\mu\text{m}$ 的 LD 作泵浦,在功率为 15mW 时,在 $1.54\mu\text{m}$ 波长上实现 6dB 的增益,进一步增大功率,最高可达 18dB 的增益。

3. 光纤激光器的调谐

如上所述,由于稀土掺杂及各种基质的光纤具有相当宽的荧光谱,因此只要插入适宜的可调波长选择器即可在宽范围内得到相应波长的激光输出。最简单的方法是将图1所示的输出介质镜改为具有波长选择性的光栅反射器,调节光栅的方位,即可得到相关波长的激光输出。一个实例是,具有 600 线/ mm 的光栅作反射镜,用于掺钕光纤激光器,得到 800Å 的波长调谐量,用于掺铒光纤激光器,得到 250Å 的波长调谐量。

另一种获得调谐的方法是在光纤环耦合器

处通过改变温度而改变耦合比 K 的方法,如图5所示。用这种方法的实例是:温度改变量达 60°C 时,可得到 330Å 的波长调谐量^[41]。

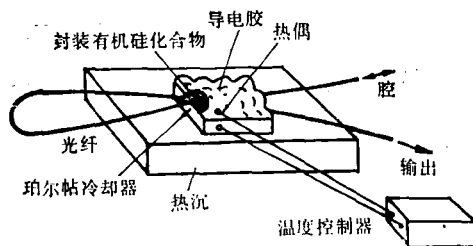


图 5

4. 光纤激光器的输出线宽压缩

为了获得非常窄的单谱线激光输出,目前已提出两种有效方法,如图6所示。其一是光栅反射器法。首先将光纤镶入石英块中一起抛光,直至露出纤芯为止,然后用光刻法在芯子区做出全息光栅,从而形成一种分布反馈作用,因此可以用来选频,用这种方法已得到线宽只有 2MHz 的单模激光输出^[42]。

另外一种方法即是采用上述福克斯-史密斯谐振腔法。由于这种腔是一种复合腔,只要适当地选择两个子腔长度的比例,就可以达到选模的作用。具体的实例是,两个子腔长度比是 $95\text{cm}/80\text{cm} \approx 1.2$,得到 $1.536\mu\text{m}$ 波长的激光输出,线宽为 8.5MHz ,这一结果比分布反馈式的半导体激光器要好。

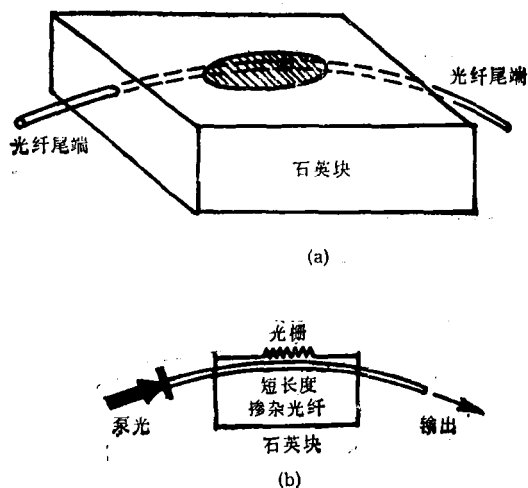


图 6

5. 光纤激光器的调Q与锁模

和其他种类激光器一样, 只要将调Q器件或锁模器件插入谐振腔内, 光纤激光器就会以调Q或锁模形式运转, 并相应地输出几十个 ns 或几十个 ps 甚至更窄的光脉冲。

光纤激光器的调Q运转实例^[13]: 使用声光调制开关, 方波调制度为40%, 高Q周期为5 μ s, 重复频率为0.1—1kHz, 结果在1.08 μ m波长上得到的激光脉冲输出, 其脉宽为200ns, 峰值功率为8.8W; 在0.90 μ m波长上得到的脉宽为70ns, 峰值功率为几W; 在1.55 μ m波长上得到的脉宽为32ns, 峰值功率为120W。

在光纤激光器锁模方面, 目前只有掺Nd³⁺光纤激光锁模的实验报道^[13]。在这一实验中使用的是声光锁模器, 并兼有调Q器件插入, 结果得到的光脉冲输出的脉宽为2ns以下, 脉冲能量为17pJ。

上述调Q或锁模均为在光纤腔内插入体形调制器件的情况下实现的, 显然这无法显示光纤激光器的优越性。因此需要发展光纤型锁模器和光纤型调Q器件, 这方面的研究工作已取得一些进展。

五、其他一些有意义的课题

在光纤激光器与放大器研究领域, 大量有实际或深远意义的课题不断被提出来, 其中一些课题的研究已获得可喜的成果, 除上述一些重要内容外, 值得提及的还有以下几个方面。

1. 重金属氟化物(HMFG)光纤激光器与放大器

这种器件的显著特点有: (1)通光窗口宽, 在0.3—7.0 μ m范围内有很好的透过率, 特别是在中红外区域, 极限损耗可以低至10⁻³dB/km; (2)易于成纤; (3)易于激活, 是稀土元素的理想掺杂宿主, 可以获得很高的浓度掺杂。由此可知, HMFG光纤制成的激光器件有很高的效率, 而且工作在中红外波段, 所以引起了人们的

广泛关注。目前有代表性的是掺稀土氟化锆光纤, 除掺Nd³⁺、掺Er³⁺的实验工作已获得成功外, 掺Ho³⁺、掺Tm³⁺的实验工作也有可喜的进展。其中, 掺Ho³⁺氟化锆光纤激光器获得波长2.08 μ m的中红外激光输出, 掺Tm³⁺氟化锆光纤激光器获得2.30 μ m的中红外激光输出^[2]。

2. 超荧光光纤激光器和放大器

利用掺杂光纤中的超荧光发射研制无腔镜光纤激光器与放大器, 也是近两年提出并取得可喜进展的一项重要课题。最近报道的结果是^[2], 使用16.8m长的掺钕光纤, 用0.81 μ m波长的染料激光泵浦, 在1.06 μ m波长上得到了10mW的激光输出, 带宽为170 \AA , 观察不到明显的阈值。

另外关于光纤双稳态器件的研究和光纤激发态吸收(ESA)的研究等都是引起人们兴趣的课题, 目前也取得一些进展。

综上所述, 光纤激光器与放大器是近几年获得迅速发展的高技术研究课题, 并日益拓宽其范围, 逐渐形成一新的研究领域。已取得的大量成果表明, 它在光纤通信、光信息处理等领域有广泛的应用前景, 并对其发展将产生重大促进作用。

- [1] 董孝义, 物理, 17(1988), 719.
- [2] U. Paul, IEE. Proceedings, Pt. J, 135-6(1988), 385.
- [3] K. Hagimoto et al., Conf. on Optical Fiber Commun., USA, (1989), PD15-1. (
- [4] A. E. Siegman, Laser, Oxford University Press, (1986).
- [5] 董孝义, 光波电子学, 南开大学出版社, (1987), 586—636.
- [6] J. R. Armitage, Appl. Opt., 27(1988), 4831.
- [7] M. J. F. Digonet et al., Appl. Opt., 24(1985), 333.
- [8] P. W. France et al., Br. Telecom. Techn. J., 5-2 (1987), 28.
- [9] C. A. Millar et al., Elect. Lett., 23(1987), 865.
- [10] J. T. Whitley et al., IEE. Conf. Publ., Pt. J, 292 (1988), 58.
- [11] C. A. Millar et al., IEE. Proceedings, Pt. J, 135-6 (1988), 303.
- [12] C. J. Goeta et al., IEEE. J. Lightwave Technol., 5 (1988), 1647.
- [13] I. P. Alcock et al., IEE. Proceedings, Pt. J, 134-3 (1987), 183.