

## 第三章 光纤激光器中的双稳态现象

双稳态激光器，是光开关，光存储等研究领域的关键部件<sup>[17][18]</sup>。目前已提出多种方法在光纤环中获得双稳态激光。如 Yuri Mitnick 等人对双向泵浦干涉的研究等<sup>[19][20]</sup>。

当以掺铒光纤为增益介质的光纤激光器满足一定条件时，其输出激光就能观察到双稳态现象。双稳态区间的宽度与掺铒光纤的参数（掺杂浓度，长度等）以及光纤激光器主环损耗都有着密切的关系。基于传统的三能级模型，并通过引入“无用泵浦损耗”这一新概念，我们能够通过具体计算得出这一双稳态确实存在的结论，并且通过调整计算参数，能够定性的讨论前述参数对双稳态区间大小的具体影响。这些计算结论都能与实验结果符合。

### 3.1 光纤激光器中的双稳态实验研究与实验解释

得到光纤激光双稳态的实验装置图如图 4 所示。整个激光环由一个波分复用器 (WDM)，一段掺铒光纤，一个光纤滤波器，一个光纤隔离器和一个耦合器组成。掺铒光纤长 36 米、掺杂浓度为 100ppm；波分复用器用以将 980nm 的泵浦光引入光纤环；滤波器是个中心波长为 1556nm 的，3dB 带宽为 1.6nm 的窄带滤波器；使用一个 10/90 的耦合器将光纤环中产生的激光功率耦合输出；隔离器用以保证光纤环的单向传播，避免后向的放大自发辐射 (ASE)。泵浦源为一个 980nm 半导体激光器。实验中，在阈值附近获得的激光为连续激光，其时间的依赖性如图 5 所示。

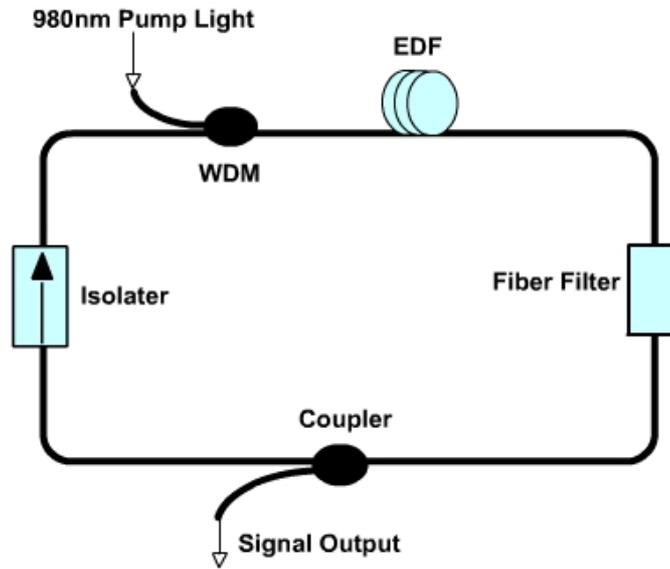


图 4 光纤环形激光器结构图  
Fig.4 Experimental Scheme of Fiber Ring Laser

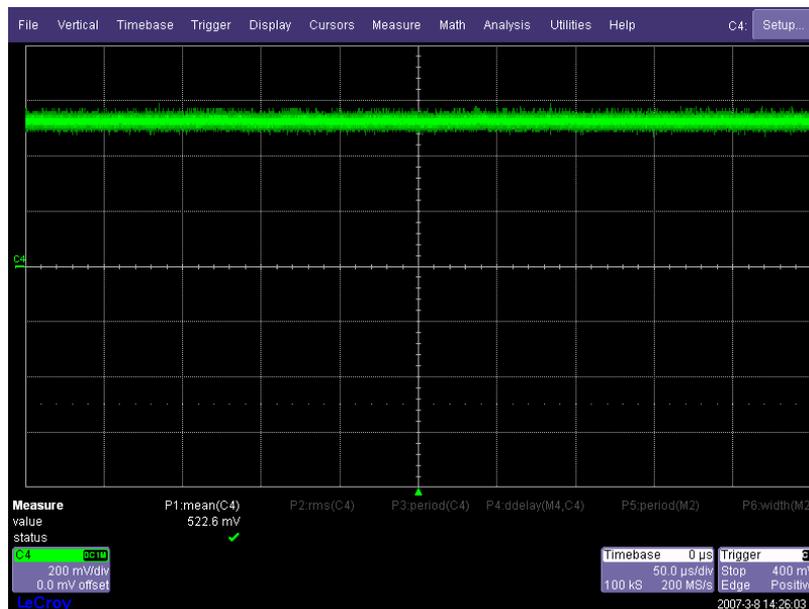


图 5 输出激光对时间的依赖性  
Fig.5 Time Dependence of the Output Laser

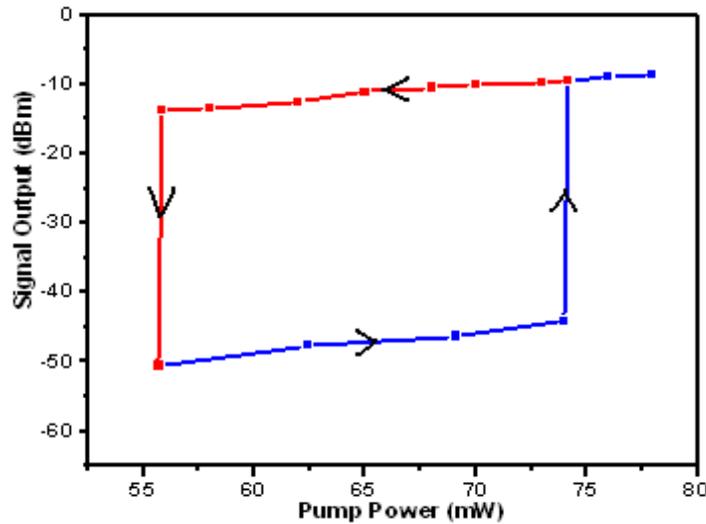


图 6 实验中的双稳态现象

Fig.6 The Bistability Phenomenon Observed in the Experiment

我们在这个环形光纤激光器中观察到了双稳态现象，如图 6 所示。当泵浦光的强度调到 74.2mW(上升沿阈值)时，激光环激发出 1556nm 左右的激光，继续增强泵浦功率，激光光强则继续增大。然而，此时如果减小泵浦功率，激光并不消失，而是逐渐减小，直到泵浦功率减小到 55.8mW(下降沿阈值)以下时，激光才被抑止。整个过程表明，在这种单环光纤激光器中存在光学双稳态。双稳态区间为： $74.2-55.8=18.4\text{mW}$ 。

为了进一步了解双稳态的性质，我们又做了些附加实验。当把掺铒光纤替换为 25 米长时，所获取的双稳态区间仅为 3.9mW：上升沿阈值为 40.6mW，下降沿阈值为 39.2mW。而当用 36 米长、掺杂浓度为 400ppm 的掺铒光纤作为增益介质时，双稳态区间增加到 39.2mW：上升沿阈值为 126.3mW，下降沿阈值为 87.1mW。上述实验结果可以说明：双稳态区间的大小跟掺铒光纤的长度和掺杂浓度有很大关系。

为了了解双稳态的产生机制，必须了解掺铒光纤的增益特性。实验中我们还测量了 36 米掺杂浓度为 100ppm 的掺铒光纤在泵浦为 74.2mW 和 55.8mW 时的增益特性曲线。测量掺铒光纤增益特性的实验装置如图 7 所示。我们使用波长、功率可调的窄线宽可调谐激光器(线宽小于 0.1nm)，它可以用来产生波长为 1556nm 的激光作

为信号光。测量结果如图 8 所示。

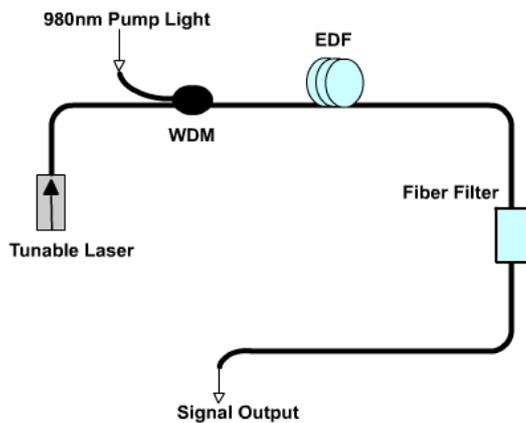


图 7 测量掺铒光纤增益特性曲线的装置图  
Fig.7 Experimental schematic for the gain character curve of EDF

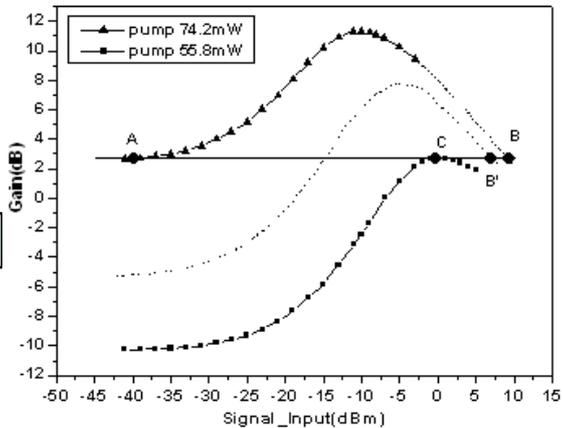


图 8 掺铒光纤在泵浦为 74.2mW 和 55.8mW 下的特性曲线

Fig.8 Experimental gain characteristic curve under pump of 74.2mW and 55.8mW

根据掺铒光纤在上升沿阈值和下降沿阈值时的增益特性曲线，我们可以解释上述实验中的双稳态现象。图 8 中的平行于 x 轴的直线，表示腔内损耗。一开始，光纤环内还没有形成激光，此时内部信号光很弱，处于增益特性图左侧的小信号增益区，泵浦强度若小于 A 点所处大小(120mA)，损耗大于增益，都不会形成激光。随着我们逐渐增大泵浦光的强度，增益特性曲线也开始慢慢上移。小信号增益决定了激光器的上升沿阈值。一旦增益特性曲线的左端达到腔内损耗线，环内便会激发出激光，而且激光强度会迅速增强，到达增益特性曲线右侧的大信号增益区，如图 8 中的 B 点位置。此时继续增大泵浦功率，激光也会相应增强。但若此时减小泵浦功率，增益特性曲线则会慢慢下降。假设下降到图 8 中的虚线位置，这时仍能够找到增益等于损耗的 B' 点，增益仍能维持腔内损耗，激光不会消失，虽然信号光强度较 B 点有所下降。直至泵浦功率降至 55.8mW，此时再减小泵浦将无法再维持足够的增益，激光消失。整个过程从 A 点开始，到 C 点结束，构成了一个双稳态现象。由于产生激光的泵浦上升沿阈值和使激光消失的泵浦下降沿阈值不同，光学双稳态才得以形成。对于如图给定的损耗，激光开始振荡和停止振荡的泵浦强度分别由小信号

区和大信号区与损耗直线相切的点 A、C 所处的泵浦强度决定 (A: 74.2mA 到 C: 55.8mA)。

### 3.2 掺铒光纤的三能级近似

EDFA 的增益与许多参数有关, 如铒离子掺杂浓度、放大器长度、纤芯半径和泵浦功率。通常激光器所用的三能级速率方程模型也适合 EDFA。当放大器的自发辐射和激发态吸收忽略不计时, 用一个简单的二能级模型也能够得出许多有用的结论。

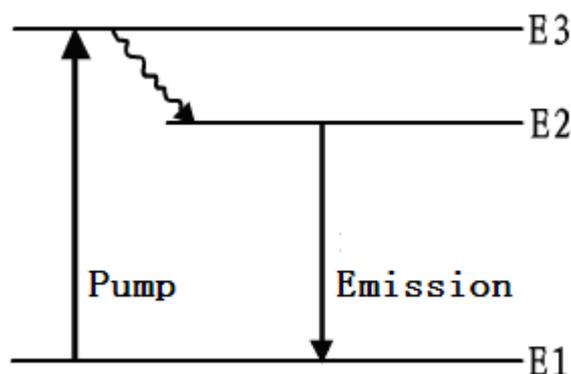


图 9 三能级泵浦原理示意图  
Fig.9 Three-level Model of EDF

该模型假设三能级系统的泵浦能级 3 几乎是空的, 因为离子数迅速转移到激发态 2 上 (见图 9); 同时忽略掉发射截面和吸收截面的差别。在这些简化下, 激发态粒子密度  $N_2(z,t)$  可以通过下面的速率方程得到:

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = W_p N_1 - W_s (N_2 - N_1) - \frac{N_2}{T_1} \quad (3.1)$$

式中,  $N_1 = N_t - N_2$ ,  $N_t$  是总的粒子数密度,  $W_p$  和  $W_s$  分别是泵浦光和信号光的跃迁几率, 表示为:

$$W_p = \frac{\Gamma_p \sigma_p P_p^o}{a_p h \nu_p}, \quad W_s = \frac{\Gamma_s \sigma_s P_s^o}{a_s h \nu_s} \quad (3.2)$$

式中， $\Gamma_p$  是重叠因子，它表示泵浦功率  $P_p^o$  在光纤掺杂区内所占的比例， $\sigma_p$  是泵浦频率  $\nu_p$  处的跃迁截面， $a_p$  是光纤中泵浦光的模面积；参量  $\Gamma_s$ ， $\sigma_s$ ， $P_s^o$ ， $a_s$  和  $\nu_s$  的定义分别与信号光情况类似。式 (3.1) 的稳态解为：

$$N_2 = \frac{(P_p + P_s) N_t}{1 + 2P_s + P_p} \quad (3.3)$$

式中， $P_p = P_p^o / P_p^{sat}$ ， $P_s = P_s^o / P_s^{sat}$ ，饱和功率定义为：

$$P_p^{sat} = \frac{a_p h \nu_p}{\Gamma_p \sigma_p T_1} \quad P_s^{sat} = \frac{a_s h \nu_s}{\Gamma_s \sigma_s T_1} \quad (3.4)$$

如果忽略掉自发辐射的贡献并假定前向泵浦， $P_p$  和  $P_s$  满足方程：

$$\frac{dP_p}{dz} = -\Gamma_p \sigma_p N_1 P_p, \quad \frac{dP_s}{dz} = \Gamma_s \sigma_s (N_2 - N_1) P_s \quad (3.5)$$

将 (3.3) 式的  $N_2$  和  $N_1 = N_t - N_2$  代入 (3.5) 式，可以得到下面的耦合方程组：

$$\frac{dP_p}{dz} = -\frac{(P_s + 1) \alpha_p P_p}{1 + 2P_s + P_p} \quad (3.6)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{(P_p - 1) \alpha_s P_s}{1 + 2P_s + P_p} \quad (3.7)$$

式中， $\alpha_p = \Gamma_p \sigma_p N_t$  和  $\alpha_s = \Gamma_s \sigma_s N_t$  分别是泵浦光和信号光的吸收系数。这两个方程描述了 EDFA 内泵浦光和信号光功率沿长度的变化过程。

### 3.3 解释双稳态现象的理论模型

在泵浦光不是很强的时候，掺铒光纤内一般会存在两个区：放大区和吸收区。我们认为无用的泵浦损耗及自发辐射会影响这两个区的表现，从而导致了上述激光环内的光学双稳态现象。首先，我们来确定无用的泵浦损耗。理论上，若假设 980nm

泵浦光光子完全转化为 1556nm 信号光光子( $R_{photon} = 100\%$ ), 则泵浦光能量到信号光能量的最大转化率为 63.0%。因而:

$$R_{energy} = R_{photon} \cdot \frac{\lambda_{pump}}{\lambda_{signal}} = 0.63R_{photon} \quad (3.8)$$

实际上, 63.0%的泵浦能量转化率在实验中是不可能达到的。现在假设在我们的实验中泵浦光的能量转化率为 40%, 也就是说大约  $(63.0-40)/63.0 = 36.5\%$  的泵浦光能量是无用的。我们用  $\alpha_{cp}$  表示这种无用泵浦损耗的衰减系数, 进一步作近似:  $\alpha_{cp}$  为一常数。

放大自发辐射 (ASE) 是另一个需要被考虑的影响泵浦光传输的因素。由于实验中得到的激光的带宽小于 0.1nm, 而 ASE 光谱的带宽却有 30nm 左右, 所以我们将 ASE 对信号光的影响给略去了, 只考虑它对泵浦光的影响。考虑了 ASE, 则速率方程 (3.1) 被改写为<sup>[21]</sup>:

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \sigma_p P_p^o}{a_p h\nu_p} N_1 - \frac{\Gamma_s \sigma_s}{a_s h\nu_s} (P_s^o + P_a^{+o} + P_a^{-o})(N_2 - N_1) - \frac{N_2}{T_1} \quad (3.9)$$

其稳态解为:

$$N_2 = \frac{(P_p + P_s + P_a^+ + P_a^-) N_t}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} \quad (3.10)$$

根据 (3.10) 式, 再加上  $\alpha_{cp}$  的影响, 传输方程组可被改写为<sup>[21][22][23]</sup>:

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p \frac{P_s + P_a^+ + P_a^- + 1}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} P_p - \alpha_{cp} P_p \quad (3.11)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \alpha_s \frac{P_p - 1}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} P_s \quad (3.12)$$

$$\frac{dP_a^+}{dz} = \alpha_s \frac{P_p - 1}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} P_a^+ + k\alpha_s \frac{P_p + P_s + P_a^+ + P_a^-}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} \quad (3.13)$$

$$\frac{dP_a^-}{dz} = -\alpha_s \frac{P_p - 1}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} P_a^- - k\alpha_s \frac{P_p + P_s + P_a^+ + P_a^-}{1 + 2(P_s + P_a^+ + P_a^-) + P_p} \quad (3.14)$$

式中  $P_a^+$  和  $P_a^-$  都是归一化的正向和反向 ASE 功率， $k = 2h\nu_s\Delta\nu / P_s^{sat}$ 。在这里，泵浦光的消耗被分成两部分，(3.11)式等号右边的第一部分表示泵浦光到信号光和 ASE 的转换，第二部分则表示了无用泵浦损耗对泵浦光的影响。根据我们前面的假设可得：

$$\alpha_{cp} = 0.365 / (1 - 0.365)\alpha_p = 0.575\alpha_p。$$

### 3.4 数值模拟及对结果的分析

方程 (3.11)–(3.14) 可以通过数值计算给出结果，计算中用到的一些典型的掺铒光纤的参数列在表 1 中<sup>[22][24]</sup>。

图 10 到图 11 展示了掺铒光纤的增益特性曲线在不同条件下的数值计算结果。图 10 中的掺铒光纤的增益特性曲线是在不考虑无用泵浦损耗及 ASE 的影响下得到的。这种曲线在小信号区域有个最大值，很明显它是无法产生双稳态的。所以要想解释我们所得到的双稳态现象，无用泵浦损耗和 ASE 是必须要考虑的，因为他们都

表 1 典型的掺铒光纤参数

Table 1 Typical Parameters of EDF

$\lambda_p = 980 \text{ nm}$	$\lambda_s = 1550 \text{ nm}$	$a_p = 1.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$	$a_s = 1.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$
$\alpha_p = 0.21$	$\alpha_s = 0.28$	$\sigma_p = 5.63 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$\sigma_s = 7.41 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
$\Gamma_p = \Gamma_s = 0.4$	$T_1 = 0.01 \text{ s}$	$\alpha_{cp} = 0.575\alpha_p = 0.12$	$k = 1.36 \times 10^{-3} \text{ Hz}$

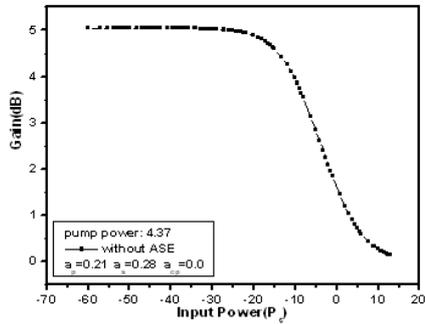


图 10 掺铒光纤长 36 米，不考虑无用泵浦损耗，不考虑 ASE。  
Fig.10 The length of the EDF is 36m; no useless pump loss, no ASE.

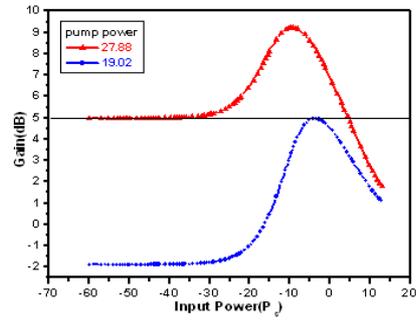


图 11 掺铒光纤长 36 米， $\alpha_p = 0.21$ ， $\alpha_s = 0.28$ ， $\alpha_{cp} = 0.12$ ，腔内损耗为 5dB。  
Fig.11 The length of the EDF is 36m,  $\alpha_p = 0.21$ ,  $\alpha_s = 0.28$ ,  $\alpha_{cp} = 0.12$ , cavity loss is 5dB.

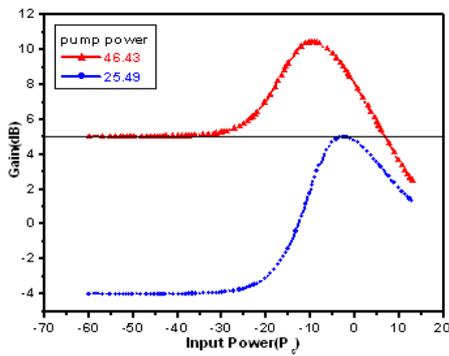


图 12 掺铒光纤长 36 米， $\alpha_p = 0.21$ ， $\alpha_s = 0.28$ ， $\alpha_{cp} = 0.15$ ，腔内损耗为 5dB。  
Fig.12 The length of the EDF is 36m,  $\alpha_p = 0.21$ ,  $\alpha_s = 0.28$ ,  $\alpha_{cp} = 0.15$ , cavity loss is 5dB.

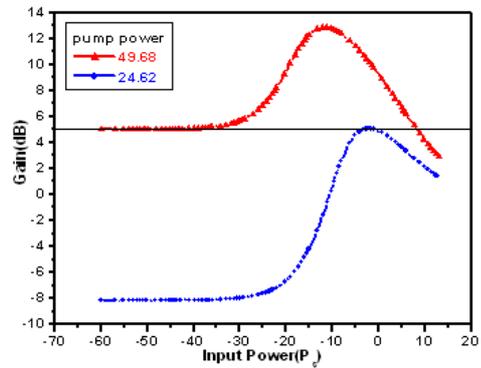


图 13 掺铒光纤长 45 米， $\alpha_p = 0.21$ ， $\alpha_s = 0.28$ ， $\alpha_{cp} = 0.12$ ，腔内损耗为 5dB。  
Fig.13 The length of the EDF is 45m,  $\alpha_p = 0.21$ ,  $\alpha_s = 0.28$ ,  $\alpha_{cp} = 0.12$ , cavity loss is 5dB.

会降低掺铒光纤在小信号区的增益。当信号光变得很强时，由于增益饱和效应这时的增益也会减小，从而得到一条中间有个极大值的增益特性曲线。而这样的曲线才与实验相符，才能用来解释双稳态现象（见本章第一节）。

下面讨论一下影响双稳态区间大小的各种因素。

首先无用泵浦损耗系数  $\alpha_{cp}$  是影响双稳区间的一个主要原因。对比图 11 和图 12，可以看出  $\alpha_{cp}$  从 0.12 到 0.15 的极小变化就会引起双稳区间的极大变化：从 8.86 增加到 20.94。这说明在各种因素中，无用泵浦损耗是影响增益特性曲线的主要原因。

对比图 11 和图 13，我们得到一个结论：掺铒光纤越长，环形腔内的双稳区间就越大。长度对双稳区间的影响也很显著：在  $\alpha_{cp}$  相同时，当长度从 36 米增加到 45 米时，双稳区间则从 8.86 增加到 25.06。另外，根据我们的计算，当掺铒光纤的长度减小到 15 米以下时，环形腔内几乎不存在双稳态。

双稳区间的大小对参数  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  也存在依赖。我们把这两个参数的大小加倍（图 14），结果双稳区间从 8.86 变化到 19.04。掺铒光纤对泵浦光和信号光的吸收系数的

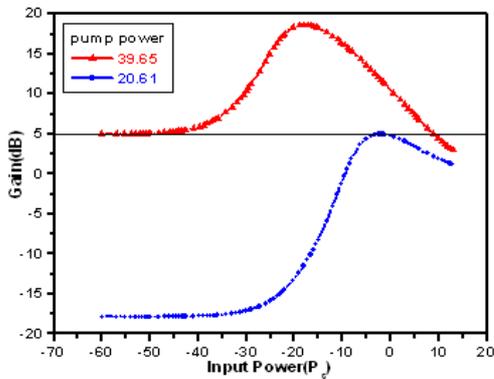


图 14 掺铒光纤长 36 米， $\alpha_p = 0.42$ ，

$\alpha_s = 0.56$ ， $\alpha_{cp} = 0.12$ ，腔内损耗为 5dB。

Fig.14 The length of the EDF is 36m,

$\alpha_p = 0.42$ ， $\alpha_s = 0.56$ ， $\alpha_{cp} = 0.12$ ，cavity

loss is 5dB.

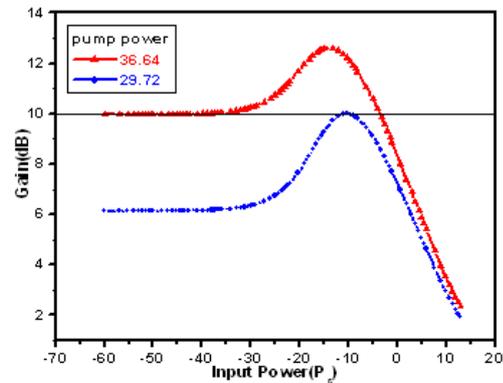


图 15 掺铒光纤长 36 米， $\alpha_p = 0.21$ ，

$\alpha_s = 0.28$ ， $\alpha_{cp} = 0.12$ ，腔内损耗为 10dB。

Fig.15 The length of the EDF is 36m,

$\alpha_p = 0.21$ ， $\alpha_s = 0.28$ ， $\alpha_{cp} = 0.12$ ，cavity loss

is 10dB.

不同，也会影响双稳区间的大小。这个结果还说明了，使用铒离子掺杂浓度高的光纤可以获取较大的双稳区间。

腔内损耗是另一个可以影响双稳区间的因素。通过对比图 11 和图 15，我们会发现不同的腔内损耗会带来不同大小的双稳区间：腔内损耗为 5dB 时双稳区间为 8.86，腔内损耗为 10dB 时双稳区间为 6.92。我们知道，对于一个特定的掺铒光纤，它的一些参数及无用泵浦和 ASE 对它的影响都是确定的。而腔内损耗却是可以控制、调节的，所以通过调节腔内损耗，我们可以改变双稳区间的大小，以使它正好满足我们的需求。

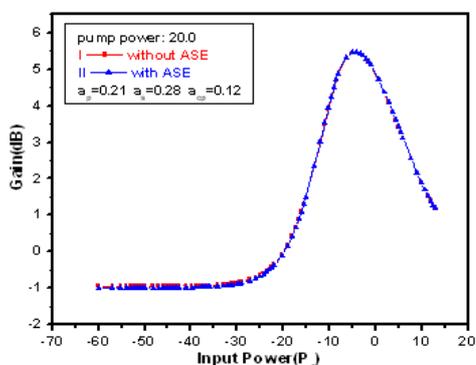


图 16 有无 ASE 的对比；掺铒光纤长 36 米，  
 $\alpha_p = 0.21, \alpha_s = 0.28, \alpha_{cp} = 0.12$ 。

Fig.16 Comparison of gain curve with ASE with that without ASE; the length of the EDF is 36m,

$$\alpha_p = 0.21, \alpha_s = 0.28, \alpha_{cp} = 0.12 .$$

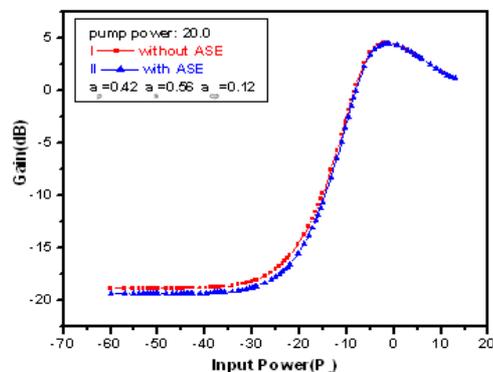


图 17 有无 ASE 的对比；掺铒光纤长 36 米，  
 $\alpha_p = 0.42, \alpha_s = 0.56, \alpha_{cp} = 0.12$ 。

Fig.17 Comparison of gain curve with ASE with that without ASE; the length of the EDF is 36m,

$$\alpha_p = 0.42, \alpha_s = 0.56, \alpha_{cp} = 0.12 .$$

最后讨论一下无用泵浦损耗和 ASE 哪个是影响掺铒光纤的增益特性曲线的主要原因。无用泵浦损耗本来在普通的应用中应该是被控制的越小越好（也就是泵浦光的转化效率越高），在这里却是产生双稳态的主要原因。图 16 中的上下两条曲线分别是不考虑 ASE 和考虑 ASE 的影响下得到的掺铒光纤的增益特性曲线。可以看出，这两条曲线的区别很小。也即，ASE 相对于无用泵浦损耗来说，对掺铒光纤的增益

特性曲线的影响很小。而对比图 16 和图 17，我们又可以看出：对于不同的  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$ ，ASE 对增益特性曲线的影响是不同的。

至此，我们根据引入了“无用泵浦损耗”这一新概念的三能级模型计算得到了光纤激光双稳态，并依据理论讨论了各个光纤参数对双稳态的影响。在实际应用方面，我们还发现，通过调节光纤激光器主环损耗可以控制双稳态区间大小。这只是获得区间可调光纤双稳态激光的一个方法。我们知道，无泵浦或泵浦光很小时，EDF 也能充当一个吸收体。它对信号光的吸收能力是和其中的泵浦光大小有关的。这就提醒我们，控制双稳态大小不一定非要使用可调衰减器，而是可以在光纤激光器中加入一个吸收体 EDF 起可调衰减器的作用。关于光纤激光双稳态的研究工作，我们还在进行中。

## 本章小结

在本章中，我们提出了用以计算双稳态是否存在及其区间大小的理论模型。这一模型通过在传统的 EDF 三能级模型上加入无用泵浦损耗项构成。应用这一模型，我们得到了在各种光纤参数下光纤激光器输出信号光的双稳态区间大小，并与实验结果做了比较。同时，通过对比各个参数对双稳态区间的影响，我们发现，EDF 的长度，无用泵浦损耗大小， $\alpha_p$ ， $\alpha_s$ ，ASE 以及主环内的损耗都将对双稳态区间大小产生影响。这些结论为未来更好的控制，利用光纤激光器双稳态提供了有力的理论支持。

## 第四章 多波长光纤滤波器

本章开始，我们将处理光纤激光器的另一个问题：如何在光纤激光器中获得性能优良的多波长激光。为此，首先必须研究所使用的多波长滤波器的原理。多波长滤波的方法多种多样。本节主要介绍以偏振保持光纤（PMF）和偏振控制器（PC）<sup>[25]</sup>组成的 Lyot-Sagnac 光纤环的滤波原理。

### 4.1 两段式 Lyot-Sagnac 滤波器的理论分析

考虑光纤自身存在的双折射时，可以用 A.M.Smith 给出的琼斯矢量表示法，得出输入光矢量与输出光矢量之间的数学描述。

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_z = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_0 \quad (4.1)$$

图 18 为 Lyot-Sagnac 环的基本构成。它由 3dB 耦合器接入，在其中顺时针传播的光  $E_1$  将分别经过 PC1（偏振控制器），PMF1，PC2，PMF2。而逆时针传播的光  $E_2$  则以相反的次序通过以上部件。取任意两个垂直的方向作为基准坐标系 x-y（如图 19），并用琼斯矢量描述在 Lyot-Sagnac 环里传播的光，记为  $E_0$ 。

用琼斯矩阵表示环中器件对传输光的作用。图 18 中，PC 可以调节进入 PMF 的光的偏振方向。令 PMF 的长度为 L，则其琼斯矩阵可写为：

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} e^{\frac{i2\pi n_o L}{\lambda}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i2\pi n_e L}{\lambda}} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

设偏振控制器使得入射光矢量的方向转过  $\theta$ 。则其琼斯矩阵可写为：

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (4.3)$$