

文章编号: 0258-7025(2007)03-0370-04

环形非稳腔倒向波抑制镜抑制效果的数值模拟

黄剑峰, 施翔春

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 对环形非稳腔激光器做数值计算模拟, 给带有倒向波抑制(RWS)镜的环形非稳腔激光器的设计提供了数值参考。通过自洽方程, 用 Matlab 计算带有倒向波抑制镜的环形非稳腔正、倒向波的稳定过程。改变腔长、放大率等参数来计算, 发现使用倒向波抑制镜能明显提高正向波的输出, 并能抑制倒向波。气体分子的多普勒频移导致正、倒向波的频率变化。频率分开的越小, 竞争越大, 抑制效果越好, 正向波输出功率则有所下降。对于特定的结构, 存在最佳的放大率, 使正向波的输出最大。计算结果表明, 倒向波抑制镜的引入能增大环形非稳腔输出功率。计算结果对实际环形非稳腔的设计十分有用。

关键词 激光器; 环形非稳腔; 倒向波抑制; 数值计算; 抑制比

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Numerical Stimulation for Reverse Wave Suppressor in Unstable Ring Resonator

HUANG Jian-feng, SHI Xiang-chun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to provide best parameters for unstable ring resonators with reverse-wave-suppressor (RWS), it is necessary to make numerical simulation. With the help of the self-consistent-equation, Matlab computation results show that RWS can increase the output of forward wave and suppress the reverse wave in unstable ring resonators, by changing the parameters such as the length and magnification of resonator. When forward wave and reverse wave compete for the same particles, which is caused by Doppler frequency shift, suppression ratio of RWS gets high while forward wave output declines. To a certain resonator, a best magnitude can be got to provide the best output amplitude. Results show that introduction of RWS can increase the output of unstable ring resonators. All these computational results are useful for practical unstable ring laser design.

Key words lasers; unstable ring resonator; reverse wave suppression; numerical computation; suppression ratio

1 引言

相对驻波腔, 环形腔在大功率激光器的应用中能消除空间烧孔, 易实现注入锁定, 能更大程度地提高输出功率。但由于环形腔大多结构复杂, 调试困难, 并且使用环形腔会带来倒向波, 倒向波和正向波在介质中的竞争, 会影响正向波最终输出的强度。因此倒向波抑制(RWS)镜的引入对提高环形腔激光器的输出所造成的影响得到了广泛的关注^[1~6]。为研究带倒向波抑制镜的环形腔特性, 本文将针对

环形非稳腔的一个实例, 建立数学模型, 模拟并分析谐振腔参数与抑制效果的联系, 并扩展探讨普通环形非稳腔应如何提高输出功率以及抑制镜在腔中的作用。

2 计算方法

图 1 所示为立方反射负支环形非稳腔装置图, 其非均匀加宽下由多普勒效应引起的正、倒向波频率移动如图 2 所示^[1]。

收稿日期: 2006-07-19; 收到修改稿日期: 2006-10-17

作者简介: 黄剑峰(1982—), 男, 广州人, 硕士研究生, 主要从事固体激光器的研究。E-mail: bee2gz@yahoo.com.cn

导师简介: 施翔春(1969—), 男, 上海人, 研究员, 目前研究方向为全固态激光器及其应用。E-mail: shixc@siom.ac.cn

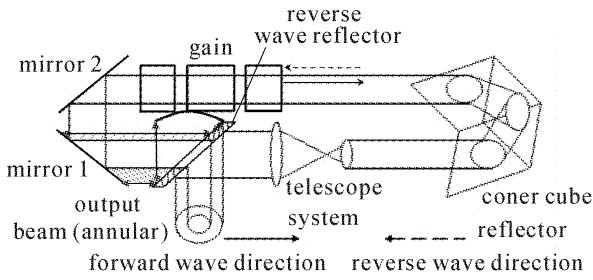


图 1 立方反射负支环形非稳腔装置图

Fig. 1 Settings of negative branch ring unstable resonator with a corner cube reflector

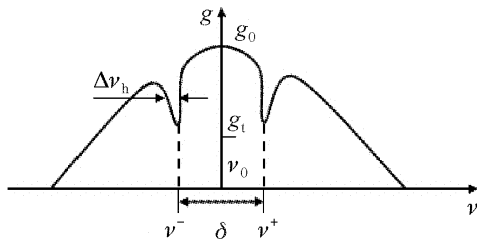


图 2 多普勒频移示意图

Fig. 2 Doppler frequency shift

2.1 增益特性

需要模拟的气体激光器,增益线形是以非均匀加宽为主的综合加宽^[7,8]。图 2 中 ν^+ 与 ν^- 的频率差是由流动气体的多普勒效应产生的,其中 g_t 为阈值增益, $\Delta\nu_h$ 为烧孔宽度, ν^+ 为正、倒向波频率, ν_0 为中心频率, δ 为相邻的正倒向波的频率差。在实际的激光器中,应该是多模结构。气体增益介质的小信号增益通常不到 10^{-2} cm^{-1} ^[2,7,9],在计算模拟的时候将做适当调整,以便得出更明确的结果。

2.2 腔型特点

如图 1 所示,刮刀镜与凹面倒向波抑制镜的结合,使由倒向波反射成正向波的比例并不大,但只要有一定的倒向波转变成正向波,它们之间的竞争必然会产生不平衡,可以利用这点抑制倒向波,提高正向波输出。图 1 所示的立方反射镜用于稳定光束质量。

2.3 模拟计算的公式

ϕ 为正向波与倒向波之间的相位差, L/c 为每周运行时间。自治方程表示为^[1,10]

$$\frac{dE^+}{dt} = \frac{1}{2} \frac{c}{L} E^+ [(g^+ - g_t)l + 2\rho^- \cos(\phi + \epsilon)], \quad (1)$$

$$\frac{dE^-}{dt} = \frac{1}{2} \frac{c}{L} E^- [(g^- \cdot rt - g_t)l + 2\rho^+ \cos(\phi - \epsilon)], \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{c}{L} [\rho^- \sin(\phi + \epsilon) + \rho^+ \sin(\phi - \epsilon)], \quad (3)$$

式中 $g^\pm = g_0(1 + I^\pm + \theta I^\mp)^{-1/2}$, $g_t = \frac{1}{l} \ln \frac{M}{(R_m^j)}$,

$$\theta = [1 + (\delta/\Delta\nu_h)^2]^{-1}, \quad \rho^\pm = E^\pm r_s^\pm / E^\mp,$$

$$\phi = \psi - \pi - (\epsilon^+ - \epsilon^-), \quad \epsilon = (\epsilon^+ + \epsilon^-)/2,$$

r_s^\pm 为正、倒向波背向散射和抑制镜反射的总转换比例。 θ 为正、倒向波的交叉耦合系数,由气体运动产生的多普勒频移产生,反映相邻的正、倒向波模式的竞争。 g^\pm , g_0 和 g_t 为饱和、小信号和阈值增益, M 为放大率, R_m^j 表示 j 个镜子反射率相乘, ϵ^\pm 为相位移动总和, L 为腔长, l 为增益介质长度。 rt 为倒与正向波在增益介质中的模体积之比。文献[1]所提到的阈值增益公式只适用于驻波腔,上面关于阈值增益的计算公式由文献[10]经过推算所得。

在不考虑激光横模场分布以及腔镜失调影响的时候,用自治方程进行计算能准确反映谐振腔内激光振荡的形成过程。而实际上场的横模分布对抑制镜的效果是有影响的,倾斜等失调则直接影响激光输出的光束质量^[11~13]。

2.4 数值计算方法

根据实际的激光器,选取合适的参数,令 $\theta = 0.5$, $M = 1.6$, 有倒向波抑制镜时,取 $r_s^- = r^- (1 - 1/M) = 0.375 (r^- = 1)$, 无抑制镜时取 $r_s^- = 0.05$, $r_s^+ = 0.05$, 腔长 $L = 400 \text{ cm}$, 增益长 $l = 100 \text{ cm}$, 模体积比 $rt = 0.9$, 小信号和阈值增益为 $g_0 = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 和 $g_t = 0.0047 \text{ cm}^{-1}$ 。初始值 $E^+(0) = E^-(0) = 0.0001$, $\phi(0) = 0.1$, $\epsilon = 0.1$ 。这样可以观察在一般情况下的抑制效果^[2]。

在下面的计算中,将不断改变 θ 和 M 的值,来观察这两个参数对抑制效果的影响。

3 计算讨论

根据选取的参数,计算光场稳定后的振幅抑制比,得 E^+/E^- 为 2.413, 而 E^+ 和 E^- 的振幅稳值分别为 2.889 和 1.197。由于 $r_s^- = 0.375$, $\theta = 0.5$, 得到这么低的抑制比是可以理解的;输出方面,这比无抑制镜时候 ($r_s^- = 0.05$) 的正向波的输出提高了接近一倍。这说明,抑制镜的抑制效果虽然一般,但正向波的输出却得到了很大的提高。

3.1 g_0 的取值对计算结果的影响

选取不同的 g_0 ^[2,7,9,14], 发现小信号增益 g_0 对抑制效果影响较小。 g_0 的变大会带来抑制比的减小和正、倒向波振幅建立稳定振荡时间的减少。

3.2 θ 与 $\delta/\Delta\nu_h$ 的意义及其对抑制效果的影响

由图 2,当 δ 增加(即频移的变化)时,两波的频率拉开,竞争减少。在有抑制镜时,由于正向波受到更小的损耗,竞争越大对正向波越好。通过计算发现, θ 变大,抑制比明显变大,但稳定时的正、倒向波振幅值大幅下降。这是因为更大的竞争导致对同一能量的粒子的消耗,而在其他位置的粒子并没有被消耗,所以正、倒向波的振幅稳定值都较小,也就表现为增益的相对下降。

考虑多纵模结构,在烧孔宽度 $\Delta\nu_h$ 固定以及多普勒频移固定的情况下,获得更大的输出,可通过调整腔长 L ,使相邻的正、倒向波频率差减少来实现 θ 的减小,使竞争减小,牺牲抑制比。

3.3 抑制镜以及 r_s^\pm 的影响

由图 1 可知,倒向波中经过刮刀镜反射的部分才会最终变成正向波,其余(中间)部分将继续沿着原方向在激光器内振荡。由于 $r_s^- = r^- (1 - 1/M)$,放大率 M 与 r^- 均对 r_s^- 产生影响。

改变 M ,使 $M = 2.7$,并让 $g_0 = 0.015 \text{ cm}^{-1}$,此时的参数改为: $g_t = 0.00993 \text{ cm}^{-1}$, $r_s^- = 0.63$, $g_0 = 0.015 \text{ cm}^{-1}$,此时振幅抑制比为 2.979,正、倒向波的稳值分别为 1.591 以及 0.534。由此可知,由于 M 的增大,输出损耗增加,增益阈值大大提高,这时虽然提高了增益,但依然导致输出下降。改变抑制镜的反射率 r^- 从而使 r_s^- 取不同的值,如图 3。

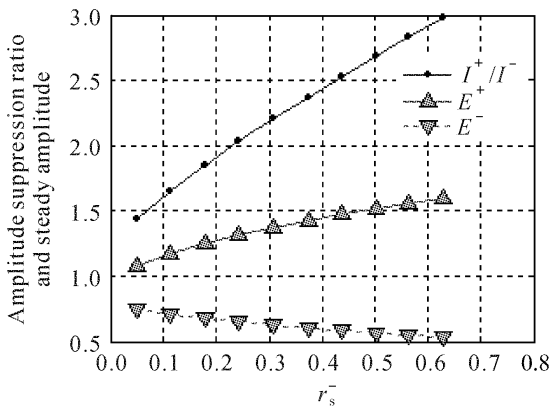


图 3 倒向波抑制镜 r_s^- 对抑制效果的影响
Fig. 3 Impact of RWS r_s^- on suppression result

r_s^- 的减小使振幅抑制比减小。由于倒向波转为正向波的部分减小,正向波的稳定值也减小,从而引起正、倒向波竞争的下降,倒向波能获得更多的增益,使倒向波稳定值增加。若模体积比为 1,并撤走抑制镜,即取 $r_s^- = 0.05$,抑制比等于 1,与理论设想相符。

3.4 初始值选取对计算过程的影响

在计算中,不断地改变 $E^+(0), E^-(0)$ 和 $\phi(0)$ 的初始值,抑制比基本不变。而 ϵ 表示背向散射和各个镜子引起的正向波和倒向波相位移总和之平均,通过计算,发现当 $\epsilon = \pi/2$ 时,正、倒向波表现为不断的交叉耦合,经过较长时间的余弦振荡后最终稳定,表现为带阻尼的振荡。而当 ϵ 能取接近 $k\pi$ 时,能实现更大的正向波输出。因而,可以考虑用压电陶瓷(PZT)使倒向波的相位与正向行波的相位相同,提高输出强度和稳定性。

3.5 θ 与放大率 M 的综合影响

经过 3.1~3.3 的计算,可知 θ 与 M (r_s^- 与 g_t) 对功率输出和抑制效果的影响最大。在这里,可以认为功率抑制比大于 5 为有较好的抑制效果,大于 10 为充分抑制,如图 4。

根据 3.2 的讨论, θ 越大能使抑制比越大,正、倒向波竞争越大,导致增益的相对下降,最终输出下降。而放大率 M 越大, r_s^- , g_t 和输出比率也就越大,

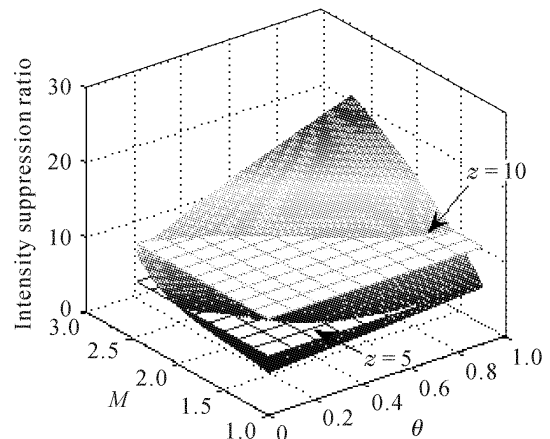


图 4 θ 与 M 共同影响下的功率抑制比
Fig. 4 Intensity suppression ratio by the influence of θ and M

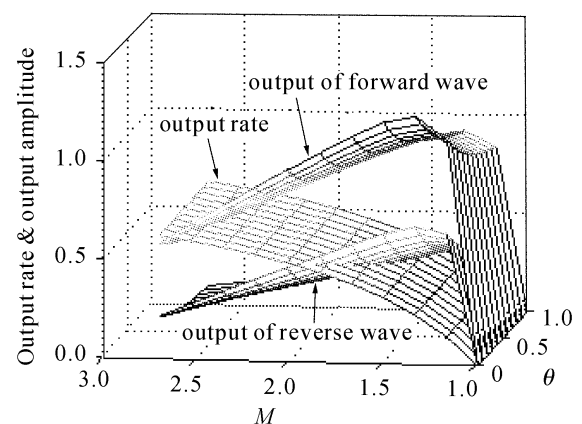


图 5 θ 与 M 共同影响下正、倒向波的输出
Fig. 5 Output of forward and reverse wave by the influence of θ and M

r_s^- 的增加对抑制效果有利,但阈值的增大对输出功率不利,输出比率增大对输出功率有利。因而权衡 θ 与 M 在其中的作用变得十分重要。图 4 则表明较大的 M 与 θ 的结合能实现更好的抑制效果。

图 5 表示了 θ 与 M 对输出振幅的影响。由图可知,存在一个最佳的放大率 M , 实现最大的正向波输出。图 5 表明,参数 θ 对输出的影响并不明显。因而 M 在此腔型中起很重要的作用。另外,当 M 取值在 1.2 附近时, r_s^- 与 g_t 也较小,而增益相对较大,在腔内起主导作用,加上 r_s^- 与 g_t 对倒向波的抑制,以及模式选择效应,于是实现了较高的输出。

对于不同的腔型,各个参数的具体影响是不一样的,但对于环形非稳腔,也有上述相似的结论。

4 结 论

经过模拟计算得知,抑制镜的引入能增大输出功率。为了实现更好的抑制效果以及更高的输出功率,主要应该针对 θ 与 M 这两个参数做调整,其他参数对抑制效果以及输出功率的影响非常小。这对实际的环形非稳腔的调试有指导意义。另外若能同步正、倒向波的相位差,则能加强正向波的输出以及稳定性。

文中只通过改变部分参数给出结果。事实上,模拟计算结果的可推广性很强,对于其他的常规环形非稳腔,也有类似的结论——互耦合系数 θ 以及放大率 M 是提高正向波输出与抑制效果的关键。

参 考 文 献

- 1 Harold Mirels, Richard A. Chodzko, Jay M. Bernard *et al.*. Reverse wave suppression in unstable ring resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(24):4509~4517
- 2 Liang Qian. Study of negative branch ring unstable resonator with a corner cube reflector [D]. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 2001
梁 倩. 立方反射负支环形非稳腔的研究[D]. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2001
- 3 Frederick Aronowitz, R. J. Collins. Lock-in and intensity-phase interaction in the ring laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(1):130~141
- 4 Frederick Aronowitz. Theory of a traveling-wave optical maser [J]. *Phys. Rev.*, 1965, **139**(3A):A635~A646
- 5 Frederick Aronowitz, R. J. Collins. Mode coupling due to backscattering in a He-Ne traveling-wave ring laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**(1):55~58
- 6 Jay M. Bernard, Richard A. Chodzko, Harold Mirels. Reverse wave suppressor mirror effects on cw HF unstable ring laser performance [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5):666~671
- 7 Duo Liping, Min Xiangde, Qu Yingli *et al.*. The gain profile and cavity temperature of a supersonic COIL [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1999, **16**(2):138~141
多丽萍, 闵祥德, 曲英丽等. 氧碘化学激光器的增益线型和腔内温度[J]. 量子电子学报, 1999, **16**(2):138~141
- 8 Hu Limin, Gao Zhi. Performance modeling of supersonic chemical oxygeniodine laser (COIL) [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(4):511~515
胡利民, 高 智. 超声速氧碘化学激光的性能分析[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(4):511~515
- 9 Duo Liping, Yang Bailing, San Fengting *et al.*. The computational simulation of two-dimensional small-signal gain of a COIL [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(2):134~138
多丽萍, 杨柏龄, 桑凤亭等. 超音速氧碘化学激光器二维小信号增益的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(2):134~138
- 10 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principle of Laser [M]. 4th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2000
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理[M]. 第4版. 北京:国防工业出版社, 2000
- 11 Zhang Xiang, Xu Bing, Yang Wei. Influence on outcoupled mode by introducing intracavity mirror tilt perturbation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):303~310
张 翔, 许 冰, 杨 伟. 腔镜倾斜扰动对正支共焦腔输出光束模式的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(3):303~310
- 12 Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong. Analyzing the light intensity distribution of super-Gaussian mirror resonator by fast Fourier-transform [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1317~1322
王 宁, 陆雨田, 孔 勇. 用快速傅里叶变换法分析超高斯反射镜腔的光场分布[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1317~1322
- 13 Liu Wenguang, Lu Qisheng, Liu Zejin. Misalignment characteristic analysis beam-converting annular resonant cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):803~809
刘文广, 陆启生, 刘泽金. 光束变换环形孔径谐振腔的失调特性分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(6):803~809
- 14 Wei Qing, Wei Zaifu, Wang Runwen. Experimental research of an annular output UR90 resonator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2):194~198
魏 青, 魏在福, 王润文. 环状输出 UR90 束旋转非稳腔的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2):194~198