

激光器内的光反馈

倪育才

(中国计量科学研究院)

反馈光进入谐振腔后的耦合效应会对稳定激光器产生十分不利的影响。由激光器外来的反射光线,例如当稳频激光器用作干涉仪的光源,或对激光波长作精确测定时,由干涉仪来的反射光线重新进入谐振腔,常常会破坏激光频率的稳定^[1]。通常均采用旋转散射屏^[2],光学退耦器(如偏振片和1/4波片^[3]或法拉第旋转器^[4]等),或采用特殊的干涉仪光路设计(例如用离轴的三面直角棱镜代替迈克尔逊干涉仪中的平面镜)以避免干涉仪来的光反馈。

反射光进入谐振腔后的耦合结果与它进入谐振腔时的位相有关。由激光器外来的反射光通常因所经的光程较长,故由振动,温度,气流等等因素的影响而使反射光位相快速地变化。这对激光频率的稳定性是很有害的,但它不会使激光强度产生慢变化的漂移,只是增加了激光强度的噪声。

由激光器内来的反射光,例如当激光反射镜后表面的反射光进入谐振腔后的情况就不同了。由于热效应使反射光的位相缓慢地变化。当采用自动频率控制系统^[5]进行稳频时,它对频率稳定性无直接的影响(正如后面要提到的,它会通过改变输出功率线形而起作用),但会使激光输出功率产生很大的波动。例如对于小型的单频 He-Ne 激光器,其光强波动幅度往往可达 50% 以上。迄今为止,这一问题的严重性尚未引起谐振腔设计者的足够重视,虽然解决这一问题的方法是很简单的,但目前仍有不少商品激光器存在着内部的光反馈,这种光耦合效应往往导致了激光光强的不稳定。

对于一台采用平-凹谐振腔的小型 He-Ne

激光器,若其平面镜为输出镜,并且平面镜玻璃片基的前后表面相互平行,则由平面镜后表面的反射光(当玻璃片基的折射率 $n \approx 1.5$ 时约为 4%)会重新进入谐振腔而产生光耦合效应。将根据该反射光进入谐振腔时的位相差增加或降低反射镜的有效反射率^[6],因而会影响到激光输出光强。

若平面镜厚度为 d ,折射率为 n ,则反射光的位相差为 $\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right)$, ϕ 为由介质层引起的

相位变化。如果我们忽略反射镜的吸收和散射损耗,并假定入射到反射镜上的光强为 1,则由平面镜前后表面所产生的反射光线的波动方程分别为 $\sqrt{R} \cos \omega t$ 及 $\frac{n-1}{n+1} \cdot (1-R) \cos \left(\omega t$

$+ \frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right)$, 式中 R 为没有光耦合效应时的

反射率。于是两光线的叠加为:

$$\begin{aligned} & \sqrt{R} \cos \omega t + \frac{n-1}{n+1} (1-R) \\ & \cdot \cos \left(\omega t + \frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right) \\ & = \left[\sqrt{R} + (1-R) \cdot \frac{n-1}{n+1} \right. \\ & \cdot \cos \left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right) \left. \right] \cos \omega t \\ & - (1-R) \cdot \frac{n-1}{n+1} \\ & \cdot \sin \left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right) \sin \omega t. \end{aligned}$$

因此,反射镜的有效反射率 R' 为:

$$\begin{aligned}
R' &= \left[\sqrt{R} + (1-R) \cdot \frac{n-1}{n+1} \right. \\
&\quad \left. \cdot \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right) \right]^2 \\
&+ \left[(1-R) \frac{n-1}{n+1} \sin\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right) \right]^2 \\
&= R + 2\sqrt{R}(1-R) \cdot \frac{n-1}{n+1} \\
&\quad \cdot \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right) + (1-R)^2 \\
&\quad \cdot \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2.
\end{aligned}$$

通常 $R > 97\%$; $n \approx 1.5$, 因此

$$R' \approx R + 0.4(1-R)\sqrt{R} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right).$$

当反射镜厚度 d 不变时, R' 也不变, 此时仍能得到较稳定的输出光强. 但激光管是一个发热体, 当其开始运转后, 由于镜片受热而使 d 缓慢增加, 因此导致了有效反射率 R' 作周期性变化. 也即是输出光强呈现周期性波动. 随着逐渐达到热平衡, 周期变慢而波动逐渐消失, 但此时由于环境温度的波动仍能引起输出光强的慢漂移.

根据上式, 如果采用 9 层输出镜, 计算得到的反射率为 $R = 97.87\%$ ^[7], 此时计算得

$$R'_{\max} = 98.71\%,$$

$$R'_{\min} = 97.03\%.$$

若采用 11 层的输出镜, 理论计算值为 $R = 99.22\%$, 此时

$$R'_{\max} = 99.53\%,$$

$$R'_{\min} = 98.91\%.$$

如此大的反射率变化足以引起输出光强的大幅度波动. 实际上, 由于反射光线不能完全与谐振腔轴线重合, 因此 R 的波动通常将小于上述计算值.

图 1a 给出了一台稳频激光器的输出光强随时间的变化曲线. 该激光器是一台具有石英谐振腔的半内腔激光器, 采用 9 层的平面镜作输出耦合, 并使用自动频率控制系统将激光频率稳定到兰姆凹陷的中心, 以防止腔长变化而

引起光强的变化. 其平面镜片基的前后表面相互平行. 曲线表明, 在开始点燃的一个多小时内, 由于镜片的热膨胀, 输出光强呈周期性波动, 变化幅度可达光强的 50% 以上. 在一个半小时以后逐渐达到热平衡, 光强趋于稳定. 在此期间内, 光强约波动 2-3 个周期.

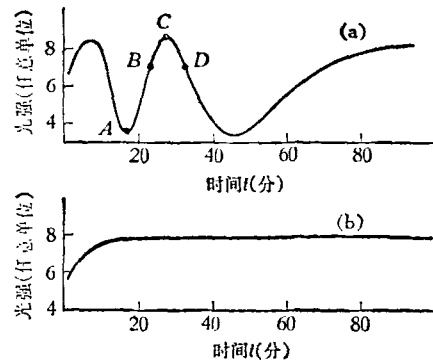


图 1 半内腔稳频激光器的输出光强随时间的变化曲线

- a) 平面输出镜片基的楔角=0,
- b) 平面输出镜片基的楔角=1 度

图 1b 给出了另一台结构完全相同的稳频激光器的输出光强随时间的变化, 仅是其平面镜片基具有约 1 度的楔角. 记录到的光强仅在开始阶段由于热变形而稍有变化, 在半小时以后就开始稳定. 实验表明在一小时后就能得到稳定的输出, 每小时的光强漂移不超过 0.5%. 这就表明, 度的楔角已有效地避免了反馈光耦合效应.

谐振腔的球面镜通常不存在光反馈的问题, 因为一般的激光器并不要求光束正好通过球面镜中心. 但如果光束正好与球面镜的后表面相垂直, 则也会出现光耦合效应. 图 2 给出了一台具有殷钢谐振腔的外腔单频激光器的输出光强变化曲线. 同样也采用自动频率控制系统补偿其腔长的变化. 谐振腔采用两块曲率半径为 1 米的反射镜, 输出耦合镜为 11 层. 对于曲线 a, 其光线正好通过输出耦合镜的中心, 因此仍出现光耦合效应. 图 2a 曲线的波动要比图 1a 小, 这是因为用了反射率较高的镜子, 因此有效反射率 R' 的变化也小. 此外, 反射镜后表面不会正好与光轴完全垂直, 因此反射光线总有

偏斜,从而降低了光耦合效应。此外,曲线 2a 的变化周期比曲线 1a 稍大,这是因为外腔激光器的镜片受热较慢的原因。图 2b 是将上述激光器的输出镜横向平移 2 毫米以后得到的曲线,

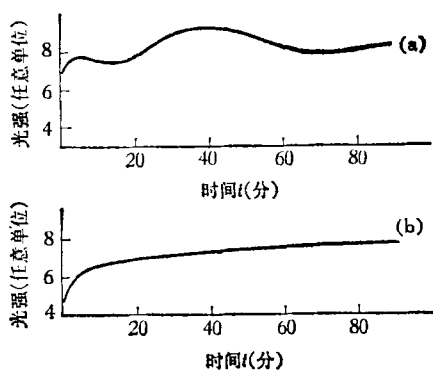


图 2 一台外腔稳频激光器的输出光强随时间的变化曲线
a) 存在内部光反馈,
b) 不存在内部光反馈

曲线的波动已消失,这表明反馈光已消除。但其达到平衡的时间仍要比半内腔激光器慢得多。

判断是否有反馈光进入谐振腔是很容易的,只要观察激光输出光斑是否存在由反射镜片基内多次往返反射所产生的一连串次生光斑。若这些光斑均重合在一起,则表明片基无楔角,即有反馈光存在。若这些光斑不重合而呈等距排列,则表明无反馈光进入谐振腔。通常希望镜子片基的楔角要稍大一些(1度或更大),因为在角度较小时虽然反射光线已偏出毛细管,但在表面抛光质量不好时还会有少量的散射光进入腔内,增加楔角有助于防止这些杂散光。此外,较大的楔角还有利于使用光栏将不需要的次生光斑除去。

光耦合效应引起的反射率变化使腔内光强发生变化。若反射镜的反射率 R 小于最佳输出耦合,则当有效反射率增加时,激光器两端的输出光强应同时增加。而当 R 大于最佳输出耦合时,则激光器两端的输出光强变化方向不一致。利用这一点可以验证上述解释是否成立,因为除了反射率改变外,其他能导致光强变化的原因通常都对两端的输出起同样作用。实验证实了这一结果。在上述外腔激光器中,当采用 9

层的无楔角平面输出镜时,激光器两端的光强变化方向一致。当采用 11 层的无楔角平面输出镜时,两端的光强变化方向不一致。

为进一步进行验证,我们测量了激光器点然后反射镜的温升,以估计镜片厚度的变化量。我们采用的镜片厚度为 5 毫米, K_9 玻璃片基的线膨胀系数约为 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,测得镜片的温升约为 15°C 。简单的计算表明,镜片厚度的增加可使输出光强产生 2 个周期的波动。这与实验结果也是完全符合的。

激光器内的光耦合效应除了对激光功率产生影响外,还会引起输出功率调谐曲线的不对称。这是因为有效反射率 R' 与因子 $\cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \phi\right)$ 有关。当激光器调谐时, λ 的改变导致了 R' 的改变,因此引起了输出功率调谐曲线的不对称。实验观察到当存在反馈光时,除了在曲线 1a 的极值处外,其余各点的输出功率调谐曲线通常是不对称的。靠近极大值一

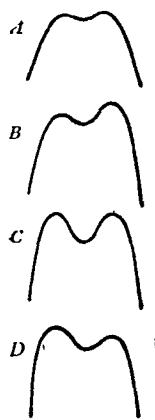


图 3 反馈光的耦合效应对激光功率调谐曲线的影响。图中示出了在曲线 1a 中的 A、B、C 和 D 各点所测得的输出功率调谐曲线

边的峰较高,并且每通过一次极值,对称性改变一次方向。图 3 示出了在曲线 1a 中的 A、B、C 和 D 各点所得到的线形。对于曲线 1b 的情况,反馈光已消除,得到了对称的线形,并且该线形不受镜片热效应的影响。在利用兰姆凹陷作频率稳定的参考时,功率线形的不对称将会影响激光频率的稳定。

上述结果表明,激光器内的光耦合效应是十分有害的,它能引起激光光强的剧烈漂移;同时,它所引起的功率线形的不对称将对频率稳

定产生影响。因此，无论是频率稳定或是功率稳定的激光器都应消除光耦合效应。在设计激光谐振腔时必须注意这一点。

本实验是在小型的稳频 He-Ne 激光器上进行的，但其分析结果在原则上也适用于全内腔 He-Ne 激光器及其他各种类型的激光器。

参 考 文 献

[1] K. Tanaka and T. Kurosawa, Japan, *J. Appl.*

Phys., 15(1976), 2271.
 [2] 中国计量科学研究院激光组,《物理》,2(1973),40.
 [3] R. H. Lovberg, in *Fundamental and Applied Laser Physics*, Wiley, New York, 1973, 921.
 [4] 天津大学精仪系,《激光技术》,科学出版社,1972.
 [5] 中国计量科学研究院激光组,《物理》,2(1973),35.
 [6] W. R. C. Rowley and D. C. Wilson, *Appl. Optics*, 11(1972), 475.
 [7] 《气体激光》(下册),上海人民出版社,1976.

高温高压模拟实验技术

邢 梯 良 高 才 生

一、引 言

高温高压实验研究是近代发展起来的一门新科学。目前采用的手段和解决的课题愈来愈多。从所研究的内容看,有高压物理,如高压下物质的行为和性质的变化;有高压化学和高温化学,如在高温高压条件下,物质的相变和体系的相平衡,新矿物和贵重工业矿物的合成;在高压下,X射线衍射研究;地质领域中利用高温高压模拟实验,研究矿物、岩石形成的物理化学条件,以及地壳深部过程和岩浆演化等。最近几年来,国外有利用爆炸丝产生高温和高能密度对爆炸的化学环境进行模拟,利用爆炸丝对水下爆炸现象进行模拟等。

我们进行的高温高压模拟实验是为研究地下爆炸空腔形成的机理及其物理化学过程而提出的一项科研项目。现象本身是一个极为复杂的物理化学过程,我们试图以不太复杂的实验设备,对爆炸现象作模拟研究。客观世界具有物质的统一性,这种统一性提供了模拟实验的客观可能性。我们现有的高温高压模拟装置(俗称高压釜),只能作近似的局部模拟,模拟地

下爆炸空腔形成的后期物理化学过程,以便进行现象分析,并试图建立爆炸能量与介质样品的熔化物,汽化物,气体及其空腔大小的定性与定量关系。

二、高温高压模拟实验技术

1. 概 述

我部高温高压模拟装置(高压釜)是一个密封式电弧瞬时加热装置。为收集模拟实验过程

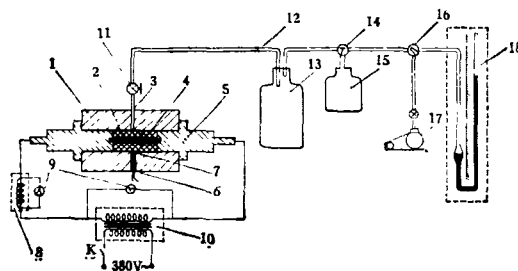


图 1 模拟装置图

1—高压釜胴体; 2—样品; 3—排气孔; 4—电极; 5—密封塞; 6—测温孔; 7—热电偶; 8—交流互感器; 9—电流、电压自动记录仪; 10—交流弧焊机; 11—针型阀门G; 12—真空管; 13—缓冲瓶; 14—玻璃三通; 15—取样瓶; 16—玻璃四通; 17—真空泵; 18—U型水银压力计。

中高压釜内的气体,以及压力计算,在高压釜