

图5 氧的五个高离化态的粒子数随时间的变化

氧的类氢、类氦的X射线辐射谱的计算结果绘于图2中。

氧的类氢线辐射谱的功率输出随时间的变

化在图3中给出。图4是氧的类氢线辐射谱功率输出随时间的变化。

由这些图我们可以看到，在临界密度面附近，氧的类氢谱线 $1s-2p$ 和类氦谱线 $(1s)^2-1s2p$ 与硅的类氢谱线有相比拟的强度，而其它的谱线强度要低一至三个数量级。

氧的五个高离化态的粒子数密度的分布随时间的变化绘于图5中。由图可以看出，由于氧的离化电位较低，因此与硅相比，在相同条件下，其离化度很高。即使聚爆已经结束，氧仍然具有很高的离化度。计算结果表明，在激光聚爆玻璃球壳靶中，不能视氧是完全离化的。

参 考 文 献

- [1] 吴存恺、楼祺洪，物理，10-1 (1981)，35。
- [2] J. Davis, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transt., 14 (1974)，549。

用强脉冲无极放电光源抽运固体激光器的自由振荡特性*

张遵连 叶茂福

(中国科学院物理研究所)

在发展无极脉冲放电激光抽运时^[1]，我们曾发现平行平面的红宝石激光腔中产生规则的、准连续的张弛振荡，这是多模耦合的特征。而钕玻璃激光在阈值的单个尖峰，相对于光源有100微秒以上的延迟。这些现象既与这些固体介质特性有关，又与这种光源的特点有关。

实验中的红宝石激光输出符合速率方程解的特征，我们先引入这个方程。一个三能级系统的腔中共有 p_0 个模式，其中 p 个耦合在一起如同一个模一样振荡，振荡模中光子数 q 与反转布居数 n 的速率方程如下^[2]：

$$dq/dt = Bn(q + p/2) + BN_0p/2 - q/t_c, \quad (1)$$

$$dn/dt = W - 2Bn(q + p_0/2), \quad (2)$$

其中 B 是腔中每个模、每个光子的Einstein系数， N_0 是上能级粒子数 n_2 与基态粒子数 n_1 之和， t_c

是振荡模中光子在腔内的寿命， W 是以光子数计算的抽运速率 W_0 与阈值抽运速率 W_{th} 之差。设激发态自发辐射寿命为 τ ，激光频率是 ν ，荧光带宽为 $\Delta\nu$ ，光速是 c ，介质在激光频率的折射率为 μ ，腔的容积是 V ，腔长为 L ，离子密度是 ρ ，腔端面的反射率是 R ，则有 $N_0 = n_1 + n_2 = \rho V$ ， $p_0 = (8\pi\nu^2\Delta\nu\mu^3/c^3)V$ ， $n = n_2 - n_1$ ， $B = 2/\pi p_0\tau$ ， $W_{th} = N_0/\tau$ ， $W = W_0 - N_0/\tau$ ， $t_c = \mu L/(1-R)c$ 。张弛振荡的张弛周期 T 和衰减时间 θ_0 的近似解为

$$T = 2\pi[\tau/B(X-1)N_0]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\theta_0 = 2\tau/Bt_c(X-1)N_0, \quad (4)$$

其中 X 代表抽运速率的超阈值

* 1979年12月26日收到。

$$X = W_0/(N_0/\tau), \quad (5)$$

前人常用能量的超阈度 E/E_{th} 代替 X , 我们也曾用来计算 T 与 θ_0 , 结果在表 1 中. 计 $\rho = 1.6 \times 10^{19}$ 算中取 $\tau = 3 \times 10^{-3}$ 秒, $\Delta\nu = 4 \times 10^{11}$ /秒, 10^{19} /厘米³. T 的计算值都偏大, 当 $E/E_{th} > 2$ 以后, 激光波形都是很快达到连续振荡. 按照 (4) 式, 这表明 X 相当大, 所以不能用 E/E_{th} 代替 W_0/W_{th} , 我们必须考虑变化的 $W_0(t)$ 波形对输出的影响^[2].

根据实验结果 (参见文献 [1] 图 3), 取一解析函数

$$W_0(t) = Nte^{-\alpha t} \quad (6)$$

来拟合光抽运速率曲线, 其中 α, N 是常量,

$$\alpha = 1/t_0, \quad (7)$$

即 $W_0(t)$ 达到峰值时间 t_0 的倒数. 可以认为 N 与输入能量 E 成正比, 设比例因子为 k , 则

$$kE = N. \quad (8)$$

根据三能级系统的特点, 振荡开始的时间 t_1 满足:

$$N_0/2 + n_0 = \int_0^{t_1} W_0(x) \exp[(x-t_1)/\tau] dx, \quad (9)$$

其中 n_0 是 n 的初始值, 指数因子是因为有荧光

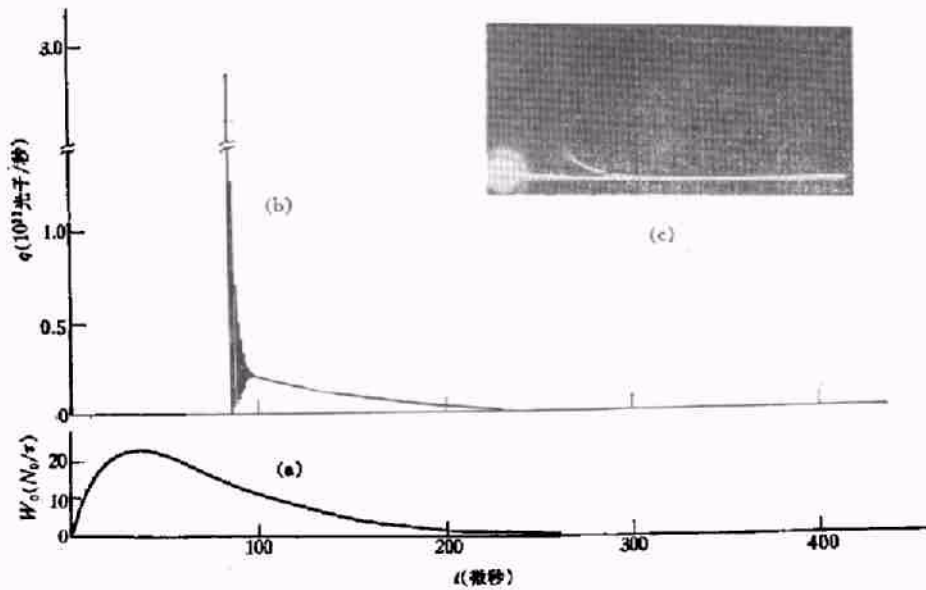


图 1 $\phi 6 \times 90$ 红宝石的弛豫振荡

(a) 拟合的光抽运速率 $W_0(t)$; (b) 腔中光子数 q 的数值解; (c) 实验中的激光输出示波图, 扫描 500 微秒 ($N_0 = 4.5 \times 10^{19}$; $p/p_0 = 10^{-4}$; $1/\alpha = 37.5$ 微秒; $t_0 = 2.6 \times 10^{-3}$ 微秒; $W/W_{th} = 1.51$; $E/E_{th} = 1.5$)

表 1 红宝石激光起振时刻的弛豫振荡参数

样品	D 厘米	L 厘米	1-R %	t_c 微秒	E/E_{th}	$1/\alpha$ 微秒	t_{th} 微秒	X_1	T 微秒			θ_0 微秒			备注	
									实验值	按 $X = E/E_{th}$	按 X_1	数值解	实验值	按 $X = E/E_{th}$		按 X_1
1	1.3	17.8	20	0.005	1.03*	40	179	2.05	9.4	22	3.8	6.2	27	1120	33.6	本文图 2
			5	0.021	1.3	40	109	8.87	<2	6.8	1.34	1.9		112	4.3	[1]图 9(a)
			5	0.021	1.2	40	121	6.83	<3	8.4	1.56	2.4		168	5.8	[1]图 9(b)
2	0.6	9.6	2	0.026	1.5	37.5	83.5	14.9	<2	5.3	0.99	1.3		135	3.9	本文图 1
3**	1.1	12.1	10	0.034	2.13				<2	5.5				19		

* 按数值解.

** 外部反射面距红宝石一端 30 厘米, 另一端是全反射直角.

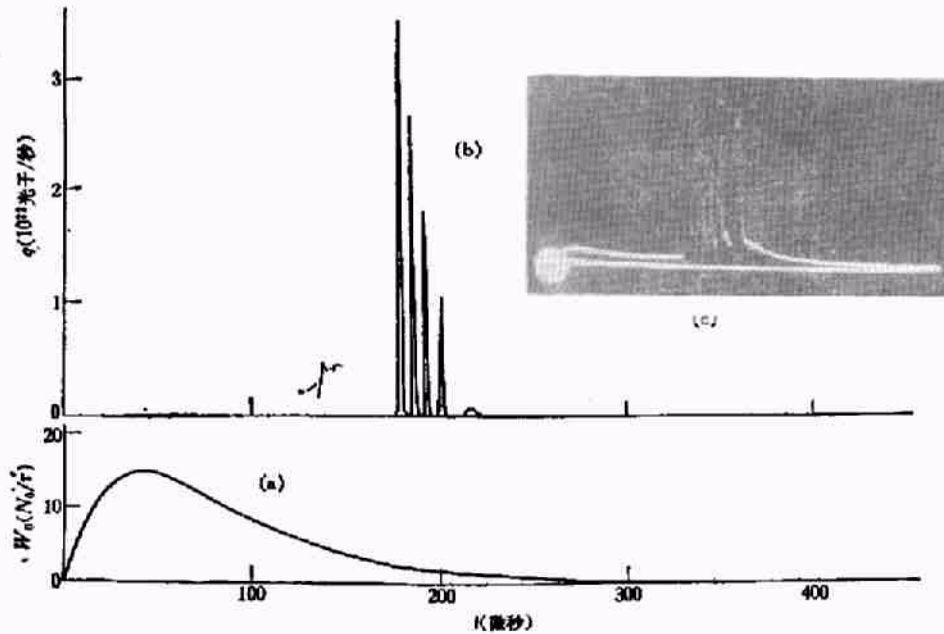


图2 $\phi 13 \times 178$ 红宝石的张弛振荡

(a) 拟合的光抽运速率 $W_0(t)$; (b) 腔中光子数 q 的数值解; (c) 实验中的激光输出示波图, 扫描 500 微秒, 后面的尖峰可能是由于弛豫或光泵起伏引起的
 $(N_0 = 3.8 \times 10^{20}; p/p_0 = 10^{-4}; 1/\alpha = 40$ 微秒; $t_c = 5 \times 10^{-3}$ 微秒; $W/W_{th} = 2.05; E/E_{th} = 1.03)$

损失, 根据稳态解的条件^[2]

$$n_0 = 1/Bt_c \quad (10)$$

对于红宝石, $\tau \gg t_1, N_0 \gg n_0$ (高 Q), 所以 (9) 式可用近似式代替, 再将 (6) 式代入得到

$$N_0/2 = \int_0^{t_1} W_0(x) dx \\ = (N/\alpha^2) [1 - (\alpha t_1 + 1)/e^{\alpha t_1}] \quad (9a)$$

从 (9a) 和 (6) 式求出 α 值与阈值起振时间 t_{th} 的关系, 和起振时的 X_1 与 E/E_{th} 的关系为

$$\alpha\tau/2 = [e^{\alpha t_{th}} - (\alpha t_{th} + 1)]/\alpha t_{th} \quad (11)$$

$$X_1 = (t_1/t_{th}) e^{\alpha(t_{th}-t_1)} (E/E_{th}) \quad (12)$$

当 α 不变而 E 增加时, X_1 的增长要快得多. 实验中当 $\alpha = 2 \times 10^4$ /秒, $\alpha t_{th} \sim 5$, 能量达到阈值时, 光泵 W_0 的极大值 $\sim 20 (N_0/\tau)$. 当 $\alpha = 2.7 \times 10^4$ /秒, $E/E_{th} = 1.5$ 时, 起振时的 $X_1 \sim 15$. 这样才能解释实验中的现象. 从起振时的 X_1 代入近似解公式得到的 T, θ_0 值也在表 1 中.

实验中的 T, θ_0 值不易测准, 我们直接求速率方程的数值解. 用实验中的 $E/E_{th}, \tau_1$ 和 α , 令 q 的初值为 1, t 的初值即 t_1, n_0 的初值由

(10) 式决定. 激光输出正比于 q , 所以把计算得到的 $q(t)$ 与激光输出示波图比较. 图 1 是 $E/E_{th} = 1.5$ 的计算例, 图 2 是 $E/E_{th} = 1.03$ 的结果, 能量刚达到阈值, 而 $X_1 = 2$. 数值解得到的 T 值与实验符合更好, 结果也在表 1 中. 由于许多参数估计不准, 计算值与实验值有一定误差是可以理解的, 但是要使计算结果与实验曲线更好地符合, 必须令 $p \gg 1$, 这就是模式的耦合或简并. 在我们的几个计算例中 p/p_0 的合理值是 10^{-6} , 这时 p 比荧光线宽内的轴模数大得多.

以前的作者们为了观察红宝石的规则阻尼振荡, 一般都用球面腔, 而我们用的都是平行平面腔, 模的简并从何而来? 这里必须考虑光抽运过程中的热效应^[3,4], 热畸变引起的热透镜效应, 使平面腔变成球面腔. 我们用的红宝石样品, 并未经过特别挑选, 而几个样品都有这种张弛振荡的表现, 可见抽运条件有较大的变化时, 红宝石激光振荡特点也有相当大的变化.

我们在实验中还观察到敏玻璃阈值振荡的尖峰延迟^[4]. 输入能量稍稍增加, 起振时间就

提前很多。初看起来与红宝石相似，而红宝石阈值尖峰延迟是因 τ 大与 $N_0/2$ 的反转条件造成的。但是铍玻璃是四能级系统，反转布居数初值和阈值抽运功率应为

$$n_0 = \int_0^{t_1} W_0(x) \exp[(x - t_1)/\tau] dx, \quad (13)$$

$$W'_{th} = p_0' N_0 \tau, \quad (14)$$

先看 (13) 式右边的极大值，实验中 $\alpha \sim 10^5$ / 秒，取 $\tau = 5 \times 10^{-4}$ 秒， n_0 的极大值应出现在 $t = 56$ 微秒，而实验中起振时间是 130 微秒，即在反转布居数与抽运功率都已减小的时候才开始振荡。我们注意到 n_0 与 W'_{th} 都与 t_c 成反比，有可能 t_c 是变化的，而且是先小后大。但是热畸变如果产生正透镜效应，只能使模简并不会降低 t_c 。看来很可能是光抽运初期产生负透镜效应，使腔处于高损耗区，负透镜被其他效应抵消后才能起振。实验中铍玻璃阈值起振的是平面腔的模式^[4]，支持这种解释。强脉冲无

极放电的紫外光比闪光灯强^[5]，实验中未用水冷或滤光液，玻璃基质对紫外光的吸收长度很小，抽运初期表面吸收更多能量。这样，负透镜起了光闸作用。输入能量增加，起振时间提前很多，因为抽运速率提高很多，即使 Q 值低仍能起振。通过以上两个现象的研究，更可肯定无极光源的优点。峰功率高对于调 Q 与放大器件有利。紫外光强、短脉冲适合碘原子和染料等激光物质。轴对称性好则适合激光物质的基本研究，如热透镜效应等。

参 考 文 献

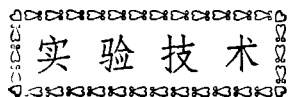
- [1] 张遵速、叶茂福，物理学报，22(1966)，174.
- [2] D. Ross, *Laser Light Amplifiers and Oscillators*, Academic Press, (1969), 185.
- [3] 《固体激光导论》编写组，固体激光导论，上海人民出版社，(1975)，499.
- [4] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer Series in Optical Science, Vol. 1, (1976), 344.
- [5] С. И. Андреев и др., *ЖТФ*, 39(1969), 1025, 1033.

(上接第 175 页)

- [4] H. W. Turnbull, *Correspondence of Isaac Newton*, Vol. I (1959), 301.
- [5] 同上，p. 299.
- [6] 同[1]，p. 243.
- [7] A. R. Hall and M. B. Hall, *Unpublished Scientific*

Papers of Isaac Newton, (1962), 237.

- [8] Isaac Newton, *Mathematical Principle of Natural Philosophy and his System of the World*, Trans. by A. Motte, (1957), 335.
- [9] 许良英等编译，爱因斯坦文集，第一卷，商务印书馆，(1977)，620.



大 面 积 离 子 源 的 研 制

栗 达 人 李 文 莱 刘 家 瑞

(中国科学院物理研究所)

本文报道的大面积离子源是为 Tokamak 装置中性加热注入用，主要是为了提高等离子体的离子温度 T_i 值。

目前源的指标如下：

离子源发射电极的面积为 $7\text{cm} \times 7\text{cm}$ ，在引出能量为 20keV 下，引出电流 I_{ex} 为 15A ，引出束流的脉冲宽度为 20ms ，见图 1。根据这些参数引出的功率达到了 300kW 。离子光学系统

的透明度为 60% ，所以引出束流密度 j_+ 为 500mA/cm^2 。

离子光学系统采用了三电极系统，这个系统的准直度很重要，必须三个电极固定在一起加工，然后进行适当的倒角，以尽量满足皮尔士所指出的 67.5° 的要求。

栅极是由 0.8mm 厚的钼板作成，在 $7\text{cm} \times 7\text{cm}$ 的面积上开有 22 条槽，槽的尺寸为 $7\text{cm} \times$