

转镜调 Q 四能级巨脉冲激光器的最佳工作条件

李 福 利

(中国科学技术大学)

提 要

对于转镜调 Q 的四能级巨脉冲激光器, 在速率方程中采用按几何光学计算的开关函数, 用电子计算机求数值解, 计算结果表明: 1) 存在最佳转速、最佳临界角、最佳腔长; 2) 最佳转速与临界角成正比; 3) 当初始反转粒子数密度一定时, 最佳转速与腔长的平方成反比; 4) 在最佳转速条件下, 巨脉冲激光的脉宽和前沿与腔长成正比; 5) 在临界角一定的条件下, 改变腔的输出端反射率, 最佳转速不变。本文分析了这些结果的物理意义, 并指出了这些结果在改进转镜调 Q 的激光测距仪和光雷达性能方面的应用。

一、引 言

转镜式 Q 开关^[1,2]的动静比高, 破坏阈值高, 在激光测距等方面应用较广。

1965年, 我们曾给出转镜调 Q 的开关函数和速率方程, 数值计算表明存在最佳转速^[3]。1970年 Findlay 和 Fray 用连续泵浦的高重复率转镜调 Q 的 YAG 激光器, 从实验上发现存在最佳转速^[4]。1973年 Hill 发表了转镜调 Q 的铍玻璃激光器存在最佳转速的实验和计算结果^[5]。但是在理论计算方面, 关于最佳转速的变化规律以及各种主要参数对转镜调 Q 的巨脉冲激光特性的影响, 还需要研究。

当转镜转速等于最佳转速时, 转镜转到平行位置, 巨脉冲激光恰巧达到峰值。这样, 在巨脉冲形成的关键时刻, 腔的 Q 值最高, 使巨脉冲峰值功率最高、脉宽最窄、激光束沿激光棒的轴向向外发射(即动态光点与静态光点重合)。这可以作为最佳工作条件的判据。在应用中, 在最佳条件下工作可以提高转镜调 Q 激光测距仪、光雷达的作用距离、测量精度以及瞄准、引导或跟踪的精度。反之, 若转镜的转速不等于最佳转速, 则巨脉冲峰值功率降低、脉宽加宽、激光束偏离激光棒的轴向。这样不仅影响测距仪、光雷达的性能, 严重时还会脱靶。因此, 研究最佳转速有一定的实际意义。

本文在速率方程中采用几何光学计算的开关函数, 用龙盖—库塔法求数值解。计算结果表明, 存在最佳转速、最佳临界角、最佳腔长。最佳转速与临界角成正比。当初始反转粒子数密度一定时, 最佳转速与腔长的平方成反比。在最佳转速条件下, 巨脉冲激光的脉宽和前沿与腔长成正比。当临界角一定时, 改变腔的输出端反射率, 则最佳转速不变。

二、速率方程

图1为转镜调Q激光器示意图。当输出端反射镜 M_2 与激光棒的轴垂直,而全反射镜 M_1 与 M_2 夹角为 β 时,Басов曾给出因两反射镜不平行引起的损耗^[6]是:

$$\gamma = \left(\frac{L}{2d}\right)^{1/2} \beta^{1/2}.$$

由此,我们曾给出转镜调Q的开关函数^[3]:

$$\gamma(t) = \left[-\frac{1}{2} \ln R + \gamma_i + \left(\frac{L}{2d}\right)^{1/2} (|\beta_0 - \omega t|)^{1/2} \right] \quad (1)$$

其中 β_0 是临界角; ω 是转速; t 是时间,以转镜转到临界角的时刻为时间的零点; L 是腔长; R 是腔的输出端反射率; d 是工作物质的直径; γ_i 是工作物质内的单程损耗。

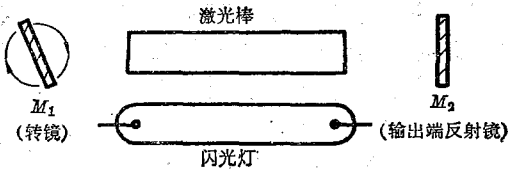


图1 转镜调Q激光器示意图

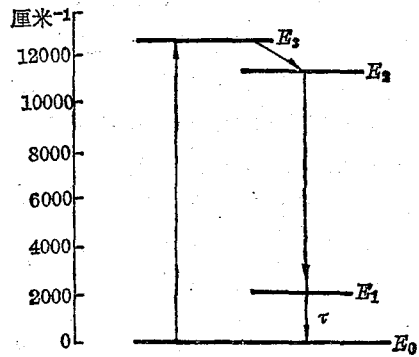


图2 四能级系统的简化模型

对于图2所示的简化的四能级模型,速率方程是:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{N_0 \sigma C l}{L} n \phi - \frac{C}{L} \left[-\frac{1}{2} \ln R + \gamma_i + \left(\frac{L}{2d}\right)^{1/2} (|\beta_0 - \omega t|)^{1/2} \right] \phi \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{N_0 \sigma C l}{L} n \phi + \frac{1}{2\tau} n_1 + p \quad (3)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{N_0 \sigma C l}{L} n \phi - \frac{1}{\tau} n_1 \quad (4)$$

其中 $\phi = \frac{2\Phi}{N_0}$, $n = \frac{(N_2 - N_1)}{N_0}$, $n_1 = \frac{2N_1}{N_0}$ 。 Φ 是腔内光子数密度; N_0 是总的活性粒子数密度; N_2 和 N_1 分别是激光跃迁上能级和末能级的粒子数密度。 ϕ 是归一化光子数密度; n 是归一化的反转粒子数密度; n_1 是末能级上的归一化粒子数密度。 σ 是受激辐射截面; l 是工作物质长度; τ 是激光末能级寿命; p 是泵浦速率。 C 是光速。

ϕ 、 n 和 n_1 的初始值分别是

$$\phi_i = \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right) \frac{n_i}{v_s} \left[\frac{L}{C\gamma(0)} \right] \quad (5)$$

$$n_i = \frac{-\frac{1}{2} \ln R + \gamma_i + \left(\frac{L}{2d}\right)^{1/2} \beta_0^{1/2}}{N_0 \sigma l} \quad (6)$$

$$n_{1i} = 0 \quad (7)$$

(5)式的物理意义为: 在腔中的自由光子存在寿命里, 因自发辐射跃迁产生的沿着激光束所张的立体角范围内输出的归一化光子数密度(ϕ_i), 而 τ_s 则是自发辐射寿命。对于钽玻璃和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器, 可取 $\phi_i \approx 10^{-14}$ 。

泵浦速率
$$p \approx 2 \frac{N_i}{\tau_s N_0}。$$

显然, 当 $\tau \rightarrow \infty$, 且取 $n_{1i} = 2$, 则方程(2)、(3)、(4)变为转镜调 Q 的三能级激光器的速率方程^[3]。

三、计算结果

对于 $\phi 20 \times 500$ 毫米的钽玻璃, $\phi 4 \times 40$ 毫米和 $\phi 6 \times 60$ 毫米的 $\text{Nd}:\text{YAG}$, $\phi 8 \times 55$ 毫米的红宝石, 选取的参数及计算结果如表 1 所示。

表 1 对典型的转镜调 Q 激光器参数的选择和计算结果*

	钽玻璃	掺钽钷铝石榴石	红宝石
N_0 (厘米 ⁻³)	3×10^{20}	1.38×10^{20}	6×10^{19}
σ (厘米 ²)	2.4×10^{-20}	8.8×10^{-19}	8.8×10^{-19}
d (毫米)	20	4	6
l (毫米)	500	40	60
γ_i	0.05	0.02	0.02
P (秒 ⁻¹)	10	20	20
L (厘米)	100	40	50
R	30%	8%	8%
ϕ_i	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}
n_i ($\times 10^{-3}$)	2.729	3.426	2.262
ω (万转/分)	6	12	12
β_0	15'	10'	11'
ϕ_p	1.5×10^{-4}	7.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}
Δt (毫微秒)	45	14	21

* 钽玻璃激光跃迁末能级寿命是 50~100 毫微秒^[7,8], 这里对钽玻璃和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 都是按 $\tau=100$ 毫微秒计算的。

对转镜调 Q 的 $\phi 20 \times 500$ 毫米的钽玻璃激光器计算的主要结果如下:

1. 最佳转速

当腔长 L 和腔的输出端反射率 R 以及临界角 β_0 一定时, 存在最佳转速 $\hat{\omega}$ 。图 3 表示在不同的临界角 β_0 下, 归一化的峰值光子数密度 ϕ_p 与转速 ω 的关系。

巨脉冲激光的峰值功率与 ϕ_p 的关系是

$$P_p = \phi_p h\nu \frac{C(1-R)}{L} \left(\frac{1}{2} N_0 V \right) \quad (8)$$

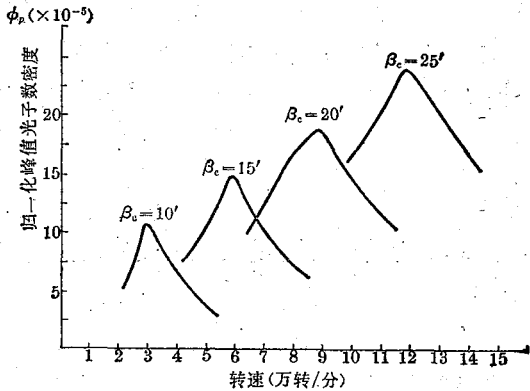


图3 不同临界角下峰值光子数密度与转速的关系 ($L=100$ 厘米, $R=30\%$)。

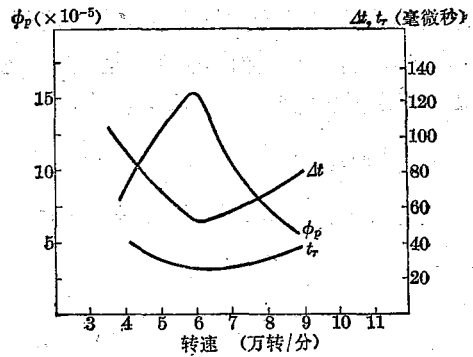


图4 巨脉冲的脉宽和前沿与转速的关系 ($L=100$ 厘米, $R=30\%$, $\beta_c=15'$)。

其中 V 是模体积。由图(3)和式(8)可知,在最佳转速下,输出的峰值功率最高。

在最佳转速下,巨脉冲激光的脉宽 Δt 和前沿 t_r 都变小,如图4所示。

计算还表明,最佳转速约等于刚出单脉冲时的转速的1.5倍到2倍;在最佳转速条件下,巨脉冲的脉宽约等于刚出单脉冲时的脉宽的 $\frac{1}{1.8}$,峰值光子数密度约等于刚出单脉冲时的峰值光子数密度的2倍。

2. 临界角的影响

(1) 当腔长 L 、腔的输出端反射率 R 和转镜的转速 ω 一定时,存在最佳临界角 $\hat{\beta}_c$,如图5所示。

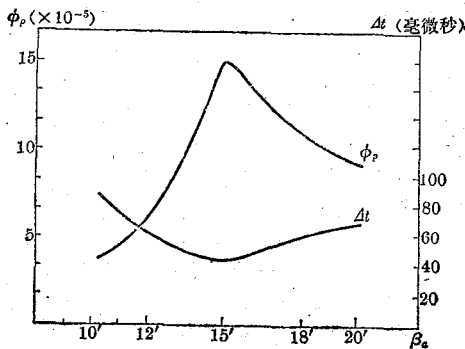


图5 L, R, ω 一定时,存在最佳临界角 ($L=100$ 厘米, $R=30\%$, $\omega=6$ 万转/分)。

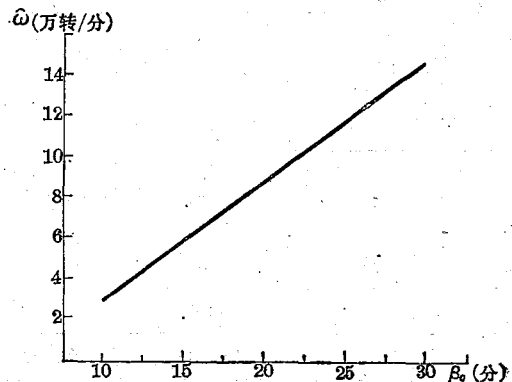


图6 L, R 一定时,最佳转速 $\hat{\omega}$ 与临界角 β_c 的关系 ($L=100$ 厘米, $R=30\%$)。

(2) 当腔长 L 、腔的输出端反射率 R 一定时,最佳转速 $\hat{\omega}$ 与临界角 β_c 成正比,如图6所示。

由(1)式可知 β_c 与 $(n_i - n_p)^2$ 成正比,这里 n_p 是静态的阈值反转粒子数密度。在反转粒子数密度与泵浦能量或功率成正比的情况下,在脉冲泵浦时,则

$$\hat{\omega} \propto (E_{in} - E_0)^2 \quad (9)$$

在连续泵浦时,则

$$\hat{\omega} \propto (P_{in} - P_0)^2 \quad (10)$$

其中 E_0 和 P_0 分别是静态的阈值能量和阈值功率。 E_{in} 和 P_{in} 分别是动态的泵浦能量和功率。

1970年 Findlay 和 Fray 在实验上发现最佳转速与阈值以上的泵浦功率的平方成正比。他们把最佳转速条件叫“最佳单脉冲条件”(Optimum Single Pulse Condition)。这与我们的计算吻合。

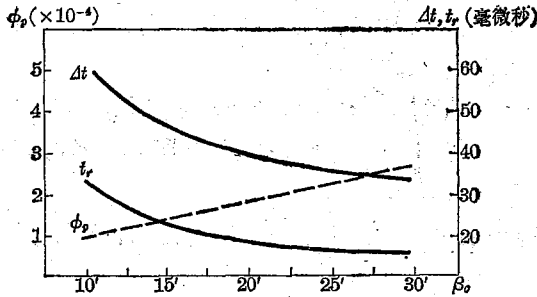


图7 在最佳条件下,峰值光子数密度、脉宽和前沿随转速或临界角的变化

若保持最佳工作条件,随着 β_0 的增大(转速也相应提高),则峰值光子数密度线性增加,而脉宽和前沿压缩得越来越慢,如图7所示。

3. 腔长的影响

(1) 当初始反转粒子数密度 n_i 和谐振腔输出端的反射率 R 一定时,则最佳转速 $\hat{\omega}$ 与腔长 L 的平方成反比,如图8所示。

可以这样理解这个结果,在其他条件相同时,腔长越短,一方面使 β_0 增大,另一方面使脉冲建立时间 t_B 缩短。在最佳条件下,

$$\hat{\omega} t_B = \beta_0 \quad (11)$$

因此使得最佳转速与腔长平方成反比。

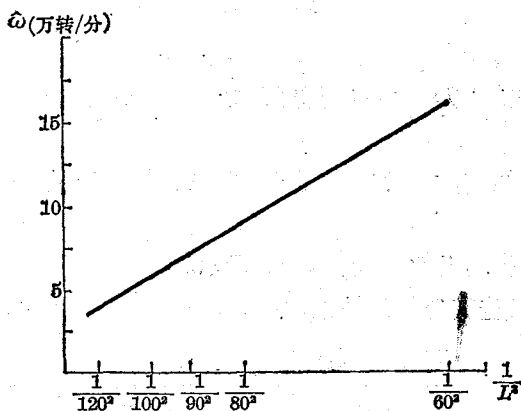


图8 n_i 、 R 一定时,最佳转速与腔长平方成反比($n_i=2.729 \times 10^{-3}$, $R=30\%$)。

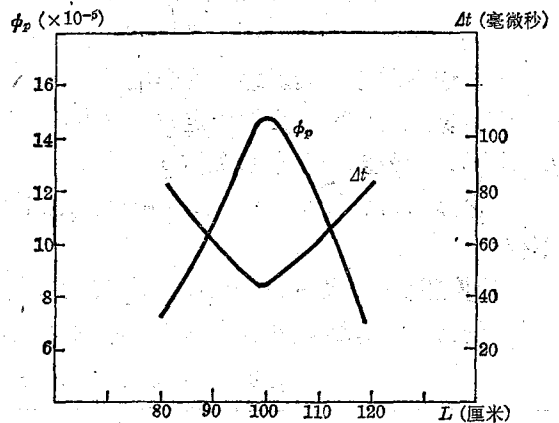


图9 n_i 、 R 、 ω 一定时,存在最佳腔长($n_i=2.729 \times 10^{-3}$, $R=30\%$, $\omega=6$ 万转/分)。

(2) 如果初始反转粒子数密度 n_i 和谐振腔输出端反射率 R 一定,转镜的转速 ω 也一定,则存在一个最佳腔长 \hat{L} ,如图9所示。

由于 $\hat{\omega}$ 与 L^2 成反比,并且最佳转速大约是刚出单脉冲时的转速的1.5倍到2倍,可以推

断,当

$L < \hat{L}/\sqrt{2}$, 则出现多脉冲;

$\hat{L}/\sqrt{2} < L < \hat{L}$, 巨脉冲性能变坏;

$L > \hat{L}$ 时, 巨脉冲性能也变坏;

当 L 继续增大, 以致 $t_B > 2\beta_0/\omega$, 则不能输出激光脉冲。

E. L. Green 等人曾做过实验: 光泵固定时, 为得到单脉冲, 有一最小的腔长或转速。对固定的转速, 腔有一最佳腔长^[9]。我们的计算与这一实验结果吻合。

(3) 当初始反转粒子数密度 n_i 和谐振腔输出端反射率 R 一定时, 若改变腔长, 同时也改变转速达到最佳转速, 则巨脉冲激光的脉宽和前沿与腔长成正比, 如图 10 所示。 ϕ_p 几乎不变。

在其他条件相同时, 腔长越短, 则光子在腔内单程渡越时间越短, 因此激光脉冲建立得越快, 前沿越陡, 脉宽越窄。

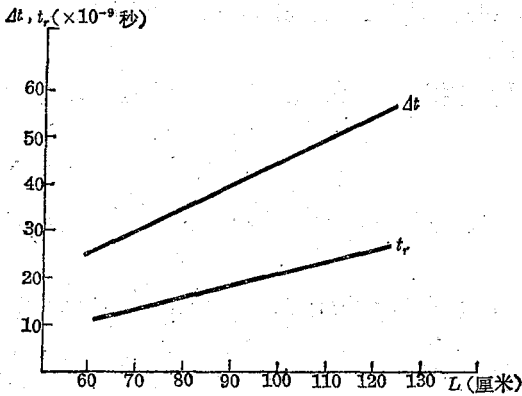


图 10 n_i, R 一定时, 在最佳转速下巨脉冲激光的脉宽和前沿与腔长的关系 ($n_i = 2.729 \times 10^{-3}$, $R = 30\%$)。

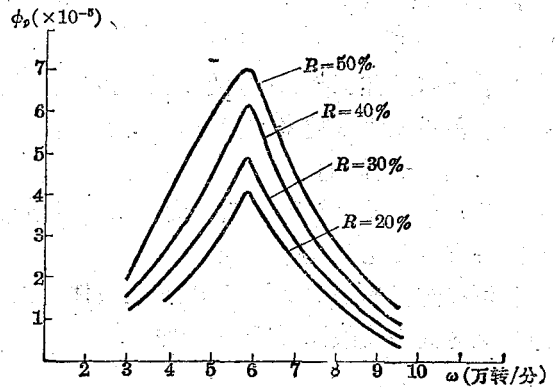


图 11 当 β_0 和 L 一定时, 改变 R 则最佳转速不变 ($L = 100$ 厘米, $\beta_0 = 15'$)。

4. 谐振腔输出端反射率的影响

当临界角 β_0 和腔长 L 一定时, 改变谐振腔输出端反射率(同时必须调整泵浦水平才能使 β_0 不变), 则最佳转速不变, 如图 11 所示。

这是因为 β_0 和 L 不变, 则 $(n_i - n_p)$ 也不变, 脉冲建立时间 t_B 也不变, 所以最佳转速不变。

计算还表明, β_0 和 L 一定时, R 改变时, $(1-R)\phi_p$ 几乎不变, 如表 2 所示。

还曾计算出, 当 L 和 n_i 不变时, 若 R 增大, 则最佳转速超线性地增高。

表 2 $L = 100$ 厘米, $\beta_0 = 15'$ 时, R 对巨脉冲特性的影响

R	Δt (毫微秒)	$\phi_p (\times 10^{-4})$	$(1-R)\phi_p (\times 10^{-4})$	$\hat{\omega}$ (万转/分)
50%	50	2.061	1.031	6
40%	47	1.794	1.076	6
30%	45	1.500	1.050	6
20%	43	1.800	1.040	6

四、讨 论

速率方程只适于单模激光器,此外,还忽略了粒子数反转的不均匀性、热效应、工作能级的子能级间的弛豫、超辐射和寄生振荡的影响,因此使计算的各别数值与实验结果可能有偏差。但这些简化对计算出的规律性的东西,影响不会很大。

对 $\phi 6 \times 60$ 毫米的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, 按 $\tau=100$ 毫微秒所作的计算,也得到了相似的规律。可以证明,未能级寿命与巨脉冲建立时间无关,因此本文结果适于未能级寿命不同的激光器。

参 考 资 料

- [1] Collins R. C., Kisliuk P., *J. Appl. Phys.*, **33**, 2009 (1962).
- [2] 吕大元、王之江、余文炎、唐贵琛、张义山, 科学通报, 1964年, 第8期, p. 733~736.
- [3] 罗正发、李福利, 中国科学技术大学1965年毕业论文(未发表)。
- [4] *Advances in Quantum Electronics*, **1**, Goodwin, D. W. (ed.), (1970), p. 115.
- [5] Hill K. O., *Canadian J. Phys.*, **51**, 20~24 (1973).
- [6] Басов Н. П., Крохин О. Н., Попов Ю. М., *УФН*, **72**, 161 (1960).
- [7] Michon M., Ernest, J., Hanus J., Auffret R., *Phys. Lett.*, **19**, 219~220 (1965).
- [8] Magnante P. C., *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-8**, 444~448 (1972)
- [9] Green E. L., D. A. Reago, M. Schoenfeld, 1963 *Annual Meeting optical Soc. Am.*, (Oct. 1963) p. 13.

《激光农业应用座谈会》在广东省佛山市召开

在批林批孔运动推动下,激光农业应用在群众性的科学实验活动中,有了较快的发展,特别是广东、吉林、黑龙江、四川等地都已经探索到一些可喜的苗头,取得了不少有价值的资料和经验。为了适应形势发展的需要,中国科学院委托中国科技情报所及有关部门负责于1974年12月15日至21日在广东省佛山市组织召开了《激光农业应用座谈会》。参加这次会议的代表103名,来自18个省、市、自治区的81个单位和部门,既有工农兵,又体现了老中青,年轻的下乡知识青年不到二十岁,年老的大专院校的教授有的已是六十开外的高龄。会议介绍了下乡知识青年在激光农业应用中斗争成长的先进经验,使得老一辈的工程技术人员和教授深受教育。大家决心取长补短,密切协作,继续沿着毛主席的革命路线为加速我国的农业发展多作贡献。

几年来,在毛主席的革命路线指引下,许多大专院校和科研部门,深入实际,面向生产,以农村为基地,与社队挂钩,在党的一元化领导下,紧密地依靠贫下中农,按照“三结合”的组织形式,因地制宜地开展了激光农业应用实验,有条件的单位还开展了必要的基础研究,形势一派大好。

会议表明,目前我国在激光对农作物及蚕类的刺激生长、控制发育以及诱发突变遗传变异等方面的研究已经有了良好的开端。但是,代表们认为:今后的工作不仅需要更大的革命干劲,而且要有严格的科学态度,以便在广泛实践的基础上能够不断地总结出经验和规律性的东西。因此,激光农业应用研究的群众活动,应当有计划、有重点、有步骤地向着生产的深度和广度进军。通过会议的经验交流和学术讨论,使今后的工作明确了方向。代表们纷纷表示,一定要加倍努力,大干快上,迎接社会主义建设的新高潮。