

大功率泵浦 DPL 被动调 Q 的计算机模拟 *

杨昱冰,王石语,文建国,蔡德芳,过 振

(西安电子科技大学 技术物理学院,陕西 西安 710071)

摘 要:大功率泵浦 DPL 的被动调 Q 技术一直是研究的重点。通过对被动调 Q 的理论分析,以及在大功率条件下,以初始透过率 T_0 为自变量对输出脉冲序列特性进行数值分析,得出了相应的图表。可以看出随着初始透过率的增大,脉宽和重复率都增大,同时峰值功率减小。将被动调 Q 与声光调 Q 加以比较,得出被动调 Q 技术适用于大功率泵浦 DPL 的结论。

关键词:激光二极管; 被动调 Q; 初始透过率

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0129-04

Computer simulating of passive Q switching used in DPL high power pumped *

YANG Yu-bing, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo, CAI De-fang, GUO Zhen

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: It is an important task to study the passive Q-switching used in DPL high power pumped. The theory of the passive Q-switching is discussed. When DPL was pumped by high power, the characteristics of output plus series were evaluated as the function of the argument T_0 , which was small-signal transmittance. The results are shown by the curves that plus width and repetition rate increase and peak power decreases, when small-signal transmittance increases. The comparison results of passive Q-switching and one of A-O Q-switching show that passive Q-switching is applicable to DPL high power pumped.

Key words: Laser diode; Passive Q-switching; Small-signal transmittance

0 引 言

在连续激光二极管泵浦固体激光器(DPL)中,采用调 Q 技术获得的高重复频率、大峰值功率的激光

脉冲,在许多领域都有非常重要的应用价值,选择调 Q 方式是其关键技术之一。通过讨论被动调 Q 材料($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$)在大功率泵浦时的调 Q 性能,分析了被动调 Q 在这种情况下的可行性。

收稿日期:2003-06-19; 修订日期:2003-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60078022)

作者简介:杨昱冰(1979-),男,陕西西安人,硕士生,主要从事新型激光器 DPL 的研究。

1 晶体 Cr⁴⁺:YAG 的被动调 Q 原理

目前, Cr⁴⁺:YAG 是在 DPL 中研究比较多的被动调 Q 晶体。它主要是利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体的可饱和吸收特性进行调 Q。所谓可饱和吸收特性就是材料的透过率随着入射光强的增大而增大^[1]。图 1 是 Cr⁴⁺:YAG 的能级结构。σ₁₃ 是小信号时基态吸收截面, 其值为 8.7 × 10⁻¹⁹ cm², σ₂₄ 是饱和时激发态吸收截面, 其值为 2.2 × 10⁻¹⁹ cm²^[2]。当晶体内 1064 nm 的光很弱时, 粒子吸收光子能量, 从基态 1 跃迁到激发态 2 (达到能级 3 后, 又迅速回到 2, 因为能级 3 的寿命短), 由于基态吸收截面远大于激发态吸收截面, 所以粒子主要从基态向激发态跃迁。大多数光子被 Cr⁴⁺ 离子吸收, 所以光子透过晶体时损耗很大, 即光的透过率比较小。随着泵浦过程继续和工作物质自发荧光辐射的增强, 粒子绝大多数都已经跃迁到激发

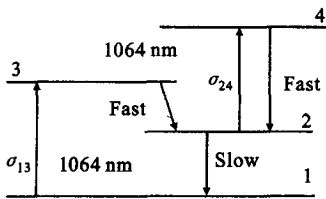


图 1 Cr⁴⁺:YAG 的能级结构
Fig. 1 Diagram of Cr⁴⁺:YAG energy level

态 2, 此时假如没有激发态吸收, 透过率将十分接近 100% (由于粒子仅有很少的一部分向下能级跃迁, 这使能级 1 上的粒子很少, 于是仅有很少量的粒子吸收入射光子, 使光子几乎可以毫无损耗地透过 Cr⁴⁺ 晶体, 即为透过率很大), 但是, 极大的光强使激发态粒子由 2 跃迁到 4, 导致达到激发态时, 光子仍有一部分被吸收, 这就是激发态吸收, 此时的透过率并非 100%。但比起基态吸收, 透过率仍然很大。Cr⁴⁺:YAG 晶体的透过率随着晶体内光强的增大而增大, 形成可饱和吸收的特性^[3], 即可用于对 Nd:YAG 激光器的调 Q。

2 计算机模拟

为研究 Cr⁴⁺:YAG 的调 Q 过程, 采用简化速率方程 (1)、(2) 进行数值计算。谐振腔模型如图 2 所示。

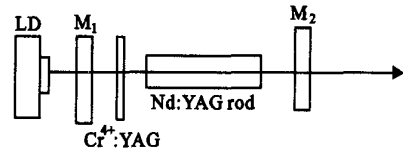


图 2 谐振腔模型
Fig. 2 Model of cavity

在数值计算程序中将激光器的谐振腔分解为增益区、损耗区和出射区, 如图 3 所示。通过反复迭代运算来模拟激光的腔内振荡过程。

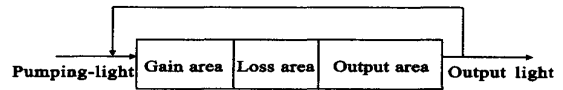


图 3 激光器谐振腔的数值计算模型
Fig. 3 Calculation model of cavity

激光器谐振腔的速率方程为^[4]:

$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= n_1 W_{13} - n_3 (S_{32} + A_{31}) \\ \frac{dn_2}{dt} &= - \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) \sigma_{21} (\nu, \nu_0) \nu N_l - \\ &\quad n_2 (A_{21} + S_{21}) + n_3 S_{32} \\ n_1 + n_2 + n_3 &= n \\ \frac{dN_l}{dt} &= \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) \sigma_{21} (\nu, \nu_0) \nu N_l - \frac{N_l}{\tau_{Rl}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n_1, n_2, n_3 分别是能级 E_1, E_2, E_3 上的粒子数; n 是单位体积内工作物质中的总粒子数; S 是无辐射跃迁几率; A 是自发跃迁几率; W 是受激辐射几率; ν 是工作物质中的光速; N_l 是第 l 模式的光子数; τ_{Rl} 是第 l 模式的光子寿命; $\sigma_{21} (\nu, \nu_0)$ 是加宽工作物质的发射截面; g_1, g_2 为 E_1, E_2 的统计权重。

损耗区被单独提出是因为这个区域的损耗呈周期性的变化才导致产生了调 Q 作用。损耗的变化规律是根据调 Q 方式的不同而变化的, 文中所考虑的是被动调 Q 方式, 被动调 Q 方式的损耗与透过晶体的光强有关, 即与 Cr⁴⁺:YAG 晶体上能级粒子数有关。Cr⁴⁺:YAG 材料的速率方程为^[4,5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} &= - N_1 \left[\frac{\sigma_g}{h\nu} \right] I + \omega_1 N_2 \\ \frac{\partial N_2}{\partial t} &= - N_1 \left[\frac{\sigma_g}{h\nu} \right] I + \omega_1 N_2 \\ \frac{\partial I}{\partial z} &= - I (\sigma_g N_1 + \sigma_e N_2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量; N_1, N_2 为各能级的粒子数密度; σ_g, σ_e 为基态和激发态吸收截面; w_1, w_2 为辐射跃迁几率; I 为激光进入晶体前的强度; t, z 为时间和纵向坐标。被动调 Q 材料的透过率与各能级粒子数的关系为^[4]:

$$\begin{aligned} T &= e^{-(\sigma_g N_1 + \sigma_e N_2) l} \\ T_0 &= e^{-\sigma_g N_1 l} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 T_0 为初始透过率; σ_g (即 σ_{13}) 为基态吸收截面, 其值为 $8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$; σ_e (即 σ_{24}) 为激发态吸收截面, 其值为 $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$; N_1, N_2 分别为能级 1 和能级 2 上的粒子数; l 为 Q 开关的长度。由公式 (3) 可以看出初始透过率在材料选定的条件下, 由晶体厚度 l 决定。激光增益由增益区的增益介质中的反转粒子数决定, 泵浦过程由公式 (4) 描述为^[6]:

$$N_1 = (N_0 - \tau P) e^{-(t/\tau)} + \tau P \quad (4)$$

式中 N_1 和 N_0 分别表示当前时刻上能级粒子数和前一时刻上能级粒子数; τ 表示光子的寿命, 其值为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}$, P 为泵浦功率; t 为泵浦时间。

3 计算结果及分析

以下的结果都是在腔长 0.1 m, 输出镜透过率为 15%, 泵浦功率固定为 60 W 的条件下获得的。

(1) 重复率与初始透过率的关系

较低的初始透过率决定了脉冲序列的重复率较低。被动调 Q 开关的初始透过率比较低, 表明其对应的阈值比较高, 这样在泵浦功率保持不变的情况下, 增益到阈值则需要较长的时间, 于是两次“漂白”可饱和吸收体的时间间隔变长, 延长了调 Q 的周期, 从而减小了脉冲序列重复率。在泵浦功率为 60 W 的情况下, 得出如图 4 所示的关系曲线。

(2) 脉冲宽度与初始透过率的关系

初始透过率较低的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体对应着较窄的脉冲宽度, 其原因是: 脉冲波形的后沿正比于光子寿命 t_c , 用下式表示为^[7]:

$$t_c = \frac{nl}{c(l\alpha - \ln \sqrt{R_1 R_2})} \quad (5)$$

腔内损耗 α 与光子寿命成反比, 即与脉冲宽度成

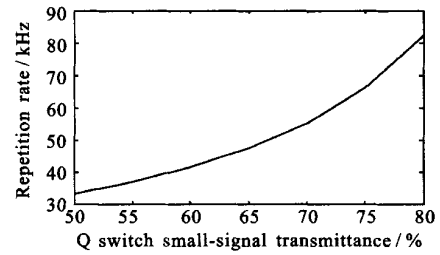


图 4 重复率与初始透过率的关系曲线

Fig. 4 Variation of repetition rate with small-signal transmittance

反比, 而初始透过率较低就对应着较高的腔内损耗 α , 所以较低的初始透过率对应着较短的光子寿命, 即对应较窄的脉宽。于是较低的初始透过率的 Q 开关材料就得到较窄的脉冲宽度。在泵浦功率为 60 W 的情况下, 计算得出如图 5 所示的关系曲线。

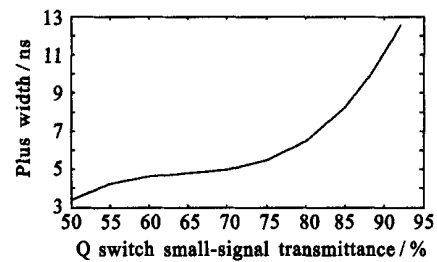


图 5 脉冲宽度与初始透过率的关系曲线

Fig. 5 Variation of plus width with small-signal transmittance

(3) 峰值功率与初始透过率的关系

在单脉冲能量不变的情况下, 峰值功率和脉冲的宽度成反比, 由于脉冲宽度随着初始透过率的增大而增大, 所以, 峰值功率总的趋势是减小。在泵浦功率为 60 W 的情况下, 计算得出如图 6 所示的关系曲线。

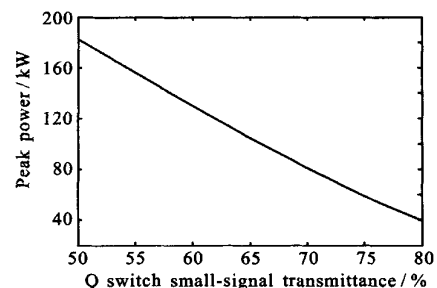


图 6 峰值功率与初始透过率的关系曲线

Fig. 6 Variation of peak power with small-signal transmittance

4 与声光调 Q 的对比

目前在 DPL 中广泛使用声光调 Q 技术,被动调 Q 技术在国内尚处于起步阶段,这里将两者加以对比。利用声光调 Q 技术^[6],用 15 W 泵浦得到峰值功率 25 kW、脉宽 8 ns、重复率 10 kHz 的脉冲序列。在 10 W 泵浦时,通过选取腔参数,数值计算了 Cr⁴⁺:YAG 的调 Q 过程,获得峰值功率为 31.4 kW、脉宽 8 ns、重复率 13.3 kHz 的脉冲序列。由此可见,利用 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 也可以获得同声光调 Q 相似的结果。

5 总结

从图 4~图 6 可以看出:在大功率(60 W)泵浦和高重频时比较容易产生高功率,窄脉宽的脉冲序列。初始透过率的微小变化对脉冲序列的输出特性的影响很小,有利于保持脉冲的稳定。虽然被动调 Q

技术也存在诸如晶体材料成本过高、工艺复杂、输出脉冲重复性较差等问题,但应用前景还是十分光明的。

参考文献:

- [1] 兰信钜,黄国标,姚建铨,等.激光技术[M].长沙:湖南科学技术出版社,1981.103-105.
- [2] 欧阳斌,丁彦华,万小珂,等.Cr⁴⁺:YAG 的可饱和吸收特性与被动调 Q 开关性能研究[J].光学学报,1996,16(12):1665-1670.
- [3] 黄朝红,殷绍唐.新型 Q 开关材料 Cr⁴⁺:YAG 的研究概况[J].量子电子学报,2001,18(4):289-292.
- [4] 周炳琨,高以智,陈家骅,等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,1995.108-115.
- [5] 张行愚,赵圣之,王青圃,等.Cr⁴⁺:YAG 调 Q 特性的理论和实验研究[J].光学学报,1998,18(9):1180-1185.
- [6] 王石语,过振,文建国,等.连续激光二极管泵浦的调 Q 高重复频率 Nd:YAG 激光器[J].光学学报,2000,20(11):1467-1472.
- [7] 李兵斌.连续激光二极管泵浦固体激光器窄脉宽调 Q 技术研究[D].西安:西安电子科技大学技术物理学院,2001.

(上接第 120 页)

表 1 传统型与节能型激光武器的差别

Tab. 1 The difference between traditional and economical laser weapon

	Current type	Economical type
Diameter on the aim	10~20 cm	1~5 cm
Density of light power	3~7 kW/cm ²	10~20 kW/cm ²
Laser density of injury	5~10 kJ/cm ²	10~20 kJ/cm ²
Effective span	0.7~1.5 s	0.7~1 s
Energy of injury	0.5~2 MJ	20~40 kJ
Power of laser	0.5~1.5 MW	20~40 kW
Effective distance	4~6 km	1~2 km
Laser intensity	(1~1.5) ×10 ¹⁵ W/sr	(2~4) ×10 ¹⁴ W/sr
Wavelength	3.8 或 10.6 μm	1.06 μm
Diameter of light location instrument	35~45 或 80~120 cm	15~20 cm
Quality of laser beam	2~3 times diffraction limit	1.1~1.3 times diffraction limit
Track fluctuation	5~8 μrad	2~4 μrad

随着软杀伤激光武器的进一步研究开发,相应的激光防护技术也应运而生,目前国外的双光子吸收、反饱和吸收、相变吸收等具有非线性吸收功能的材料已广泛应用于可见光以及近红外波段的激光防护,“矛”与“盾”的竞争将愈演愈烈。

参考文献:

- [1] 王戎瑞.美国机载激光武器发展现状[J].激光与红外,1999,29(4):195-198.
- [2] 余辉,谭胜.高能激光武器的发展和应用前景[J].红外与激光工程,2002,31(3):267-271.
- [3] 王子滨,李辉.美国战术反导和战术防空激光武器的发展[J].红外与激光工程,1996,25(2):8-13.
- [4] 任国光,黄裕年.美国高能激光武器的发展战略(上)[J].激光技术,2001,25(4):241-245.