

多根板条固体激光器用聚光腔的研究*

冯国英 吕百达 叶一东 蔡邦维

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

淳于咏梅 张小民

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都, 610003)

摘要: 用二维光线追迹法对多根板条固体激光器(所谓“光炉”)用聚光腔作了数值模拟, 并对有关的实验作了报道。本文所得结果可推广用于组合式多段钕玻璃激光放大器聚光腔的设计。

关键词: 泵浦腔 多根板条固体激光器 二维光线追迹

Study of the optical pumping cavity used for solid-state multi-slab lasers

Feng Guoying, L Baida, Ye Yidong, Cai Bangwei

(Institute of Laser Physics and Laser Chemistry, Sichuan University)

Chunyu Yongmei, Zhang Xiaomin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics)

Abstract: In this paper, the numerical simulation for the pumping cavity used for multi-slab solid-state lasers (so-called “optical stove”) has been presented and analyzed by means of the two-dimensional ray tracing method, and the related experiment has been reported. The results obtained in this paper can be extended to the pumping cavity design of Nd glass multi-segment amplifiers.

Key words: pumping cavity multi-slab solid-state laser two-dimensional ray tracing

一、引言

从光源发出的光辐射能量转换到在激光工作物质内对增益有用的激发能量的效率对激光系统的总效率有相当大的影响。激光增益介质中泵浦光的分布是三种效应综合的结果: 聚光腔的照明特性、介质本身的折射和泵浦辐射的非均匀吸收。激活介质中泵浦能量的温度分布、增益分布、饱和效应、阈值能量和板条介质的损伤阈值等均与介质内泵浦光分布有关。聚光腔除了对闪光灯和激光介质之间提供良好的耦合之外, 还决定了激光介质上泵浦光的分布, 从而影响输出光束质量。因此, 在高功率激光系统的设计中, 聚光腔是一个不可忽略的重要环节。

在我们自行设计的光炉式板条固体激光器中采用了如图 1 所示的具有创新特色的“三明治”式结构。三根大尺寸钕玻璃板条和四组氙灯(共八支)相间排列, 板条尺寸为 $a \times b \times c = 38\text{mm} \times 18\text{mm} \times 300\text{mm}$, 两端面设计为布儒斯特角, 板条全水冷, 氙灯在空气中自然冷却。多灯结构降低了对泵浦灯输出能量的要求; 采用光炉式的聚光腔结构, 即板条与灯相间排列, 较多的泵浦光能量可直接到达板条的两个大面, 再辅以聚光腔对非直射光的反射, 可实现板条两

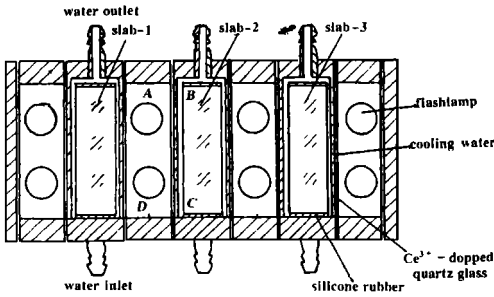


Fig. 1 A schematic diagram of the pumping cavity used for multi-slab solid-state lasers

个大面上较均匀的光辐射和较高的几何传输效率^[1]。由于以上优点,这一光炉式结构可能提供高功率(高能量)、高光束质量激光输出。

定义总的储能效率为: $\eta_d = \eta_1 \eta_2 \eta_3 = \eta_1 \eta_{21} \eta_{22} \eta_{23} \eta_{24} \eta_3$ (1)

式中, η_1 为灯的电光效率, η_2 为光辐射能量转换为激发能量的效率, η_3 为增益介质中激发能量的利用率, η_{21} 为

泵浦腔几何传输效率(即仅考虑泵浦腔壁反射损耗和灯等离子体吸收的从氙灯到板条介质被泵浦面的光辐射能量的传输效率), η_{22} 为与 Nd^{3+} 吸收带有关的相对辐射效率, η_{23} 为吸收效率, η_{24} 为量子效率。

定义不均匀度: $\nu = (E_{max} - E_{min}) / (E_{max} + E_{min})$ (2)

式中, E_{max} 为最大相对光能量, E_{min} 为最小相对光能量。

我们用二维光线追迹法对泵浦腔沿灯横向和纵向作了模拟, 程序中考虑了氙灯的辐射光谱、聚光腔壁的反射和反射损耗、光在不同界面的折射、灯等离子体对泵浦光的再吸收和钕离子吸收带及量子效率。选出了最佳腔参数, 给出了板条表面相对光能量分布曲线和板条横截面上激发能量相对分布三维图, 给出了 η_{21} , ν 和 η_2 , 适当考虑 η_1 和 η_3 后, 根据(1)式即可估算出储能效率, 并与实验作了比较。还给出了 η_{21} , η_2 与 ν 随腔参数变化的曲线, 并讨论了腔参数对它们的影响, 为设计合适的聚光腔提供了理论指导。

二、物理模型和计算模拟

为了简化计算程序, 作如下假设:

1. 闪光灯发光柱面各处发光特性相同, 均为 lambert 面光, 计算中用光线来表示不同位置和方向上能量的传输。
2. 闪光灯工作在高放电电流密度下, 通过灯管内等离子体的光线光能损耗 70%。
3. 板条介质与灯的轴线方向平行放置。
4. 光线行进与反射时均与波长无关, 而考虑灯的发射谱、钕离子吸收带和量子效率等问题时则须计及波长的影响。
5. 光线在板条大面上的反射损耗与入射角有关。由下面熟知的公式可求出振幅反射率 r 和光强透过率 T 。

$$r = [n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)] / [n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)]$$

$$T = 1 - r^2 \tag{3}$$

式中, n_1, n_2 为出、入射介质折射率, θ_1, θ_2 为出、入射角, r 为振幅反射率, T 为光强透过率。

6. 由于腔壁的反射, 两边的板条得到的泵浦光稍强于中间的板条, 中间的两组灯对两旁的板条均有贡献, 而两侧的每组灯只对紧邻的一根板条有贡献, 故可以等效看作: 有两支灯对中间的板条进行泵浦。分别有三支灯对两旁的板条进行泵浦。

实验表明, 大功率脉冲氙灯辐射光谱以连续谱为主。根据文献[2]给出的数据, 得到了与

Nd^{3+} 吸收带有关的相对辐射效率 η_{22} (见表 1)。

Table 1 Relative emission coefficients of the Xenon flashlamp

range of the wave length(nm)	566~ 600	728~ 766	790~ 824	866~ 940	sum
$\eta_{22}(\%)$	7.7	6.0	4.8	4.6	23.1

参考文献[3], 我们可以估算钕玻璃对四个波段的吸收系数(见表 2)。

Table 2 Absorption coefficient of the Nd glass

range of the wave length(nm)	566~ 600	728~ 766	790~ 824	866~ 94
absorption coefficient(cm^{-1})	2.20	2.64	3.01	0.68

1. 对中间板条的一个侧面沿灯横向进行光线追迹

设矩形聚光腔中闪光灯半径 $r = 5.5\text{mm}$, 两灯间距 $O_1O_2 = 20\text{mm}$, 两灯关于板条大面对称放置, 两灯的轴线与板条接收面的距离为 $AB = CD = 20\text{mm}$, $AD = BC = 40\text{mm}$, 聚光腔壁反射率 $R = 0.9$ 。光线追迹如图 2a 所示。通过对三万条光线的追迹, 可得直接到达、经过一次反射、经过二次反射、经过三次反射、经过四次反射及总的到达板条接收面上的泵浦光能量相对分布如图 2b 所示。由图可见, 直接到达板条接收面的泵浦光仅占泵浦光总量的一半, 且分布不均匀, 呈中间高两侧低形状, 而经过多次反射的叠加, 泵浦光的分布是均匀的。

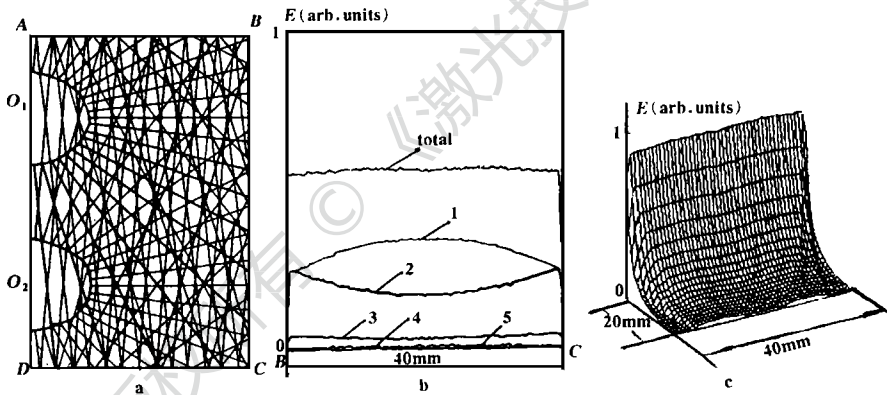


Fig. 2 a—Ray tracing simulation along one lateral side of the middle slab b—Calculated relative energy distribution of the direct incidence(1), after one reflection(2), after two reflections(3), after three reflections(4), after four reflections(5) and of the total incidence(total) c—Calculated relative excitation energy distribution at the slab cross section

这一腔型的泵浦几何传输效率 $\eta_{21} = 83.29\%$, 不均匀度 $v = 1.25\%$ 。再考虑氙灯辐射光谱、工作物质对光的折射和吸收谱及量子效率, 可得在厚度为 18mm 的板条介质横截面内的激发能量相对分布情况如图 2c 所示。从图中可看出泵浦光沿板条宽度方向分布均匀, 而沿厚度方向则不均匀, 在两个大面处分布较多, 中间层则较少。若工作物质为长方形, 平行光通过时两侧增益较大, 中间增益较小; 而在板条内采用之字形光路, 光束的各个部分均是既通过增益高的区域又通过增益低的区域, 总的行程相同。因此, 当介质中的泵浦光在平行于大面的各层上分布均匀时, 采用“之”字形光路不仅可以消除一阶热效应, 也可消除增益分布不均匀性。通过计算可得单程光辐射能量转换为激发能量的效率 $\eta_0 = 10.31\%$ 。若估算灯的电光效率为 η_1 60%, 增益介质中激发能量的利用率为 $\eta_3 = 55\%$, 则对中间板条该侧面, 由(1)式可推算总

的储能效率 η_{lt} (计算值)(中间板条,侧面) = 3.40%。由于中间板条两侧的泵浦是对称的,故对中间板条,总的储能效率 η_{lt} (计算值)(中间板条) = 3.40%。

2. 对旁边板条的外侧面沿灯横向进行光线追迹

两侧的两个板条的两个大面所受的光辐射是不对称的。它们的靠近中间的一侧的泵浦情形等同于中间板条被泵浦的情形;而靠外的另一侧面的矩形聚光腔中闪光灯半径 $r = 11\text{mm}$, 两灯间距 $O_1O_2 = 20\text{mm}$, 两灯关于板条大面对称放置, 两灯的轴线与板条接收面的距离 $AB = DC = 20\text{mm}$, 与板条对面的反射壁的距离 $AE = DF = 13\text{mm}$, $BC = 40\text{mm}$, 聚光腔壁反射率 $R = 0.9$ 。在这一构型下总的泵浦光分布略有点不均匀, 不均匀度 $\nu = 4.62\%$, 泵浦腔几何传输效率较图 2a 所示构型大为降低, $\eta_{21} = 57.26\%$, 考虑了氙灯辐射谱、反射能量损耗和等离子吸收后单程 $\eta_2 = 7.24\%$ 。若灯的电光效率 $\eta_l = 60\%$, 增益介质中激发能量的利用率为 $\eta_3 = 55\%$, 则总的储能效率 η_{lt} (计算值)(旁边板条,外侧面) = 2.39%。由于旁边板条两侧的泵浦是不对称的, 故对旁边板条, 总的储能效率:

$$\eta_{lt}(\text{计算值})(\text{旁边板条}) = \eta_{lt}(\text{计算值})(\text{中间板条, 侧面}) / 3 + 2\eta_{lt}(\text{计算值})(\text{旁边板条, 外侧面}) / 3 = 2.73\% \quad (4)$$

3. 对板条沿灯纵向进行光线追迹

设矩形聚光腔中灯的轴线 $A'D'$ 与板条接收面 $B'C'$ 的距离为 $A'B' = C'D' = 20\text{mm}$, 氙灯弧

长 $C'B' = 215\text{mm}$, 聚光腔壁反射率 $R = 0.9$ 。光线追迹如图 3a 所示, 对三万条光线进行追迹, 直接到达、经过一次反射、经过二次反射、经过三次反射、经过四次反射及总的到达板条接收面上的泵浦光能量相对分布如图 3b, 经过大于二次反射的光能量对总的到达板条接收面上的泵浦光能量贡献很少, 直射和一次反射的相对光能量相互迭加使光能量沿板条接收面长度方向分布均匀, 仅在最边缘处略有下降。图 3c 示出增益介质截面上激发能量相对分布情况。

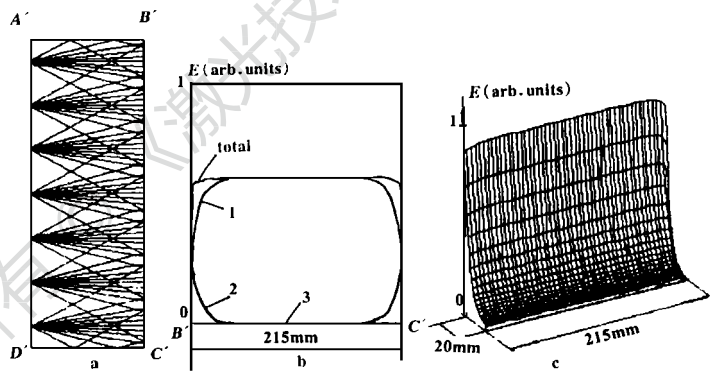


Fig. 3 a—Ray tracing simulation along the longitudinal direction of the outside slab b—Calculated relative energy distribution of the direct incidence(1), after one reflection(2), after two reflections(3), after three reflections(4), after four reflections(5) and of the total incidence(total) c—Calculated relative excitation energy distribution at the slab cross section

4. η_{21} , η_2 与 ν 随腔参数的变化

对情形 1, 在其它参数不变的情况下, 或改变两灯的轴线与板条接收面的距离 AB , 或改变泵浦腔壁反射率 R , 或改变两灯间距 O_1O_2 , 或改变灯半径 r , 则可得泵浦腔几何传输效率 η_{21} 、板条表面泵浦光能量分布的不均匀度 ν 和光辐射能量转换为激发能量的效率 η_2 的变化曲线, 如图 4a, b, c, d 所示。可见, 在我们所选择的腔参数下, ν 处于极小值附近, 而 η_{21} 和 η_2 则较高。

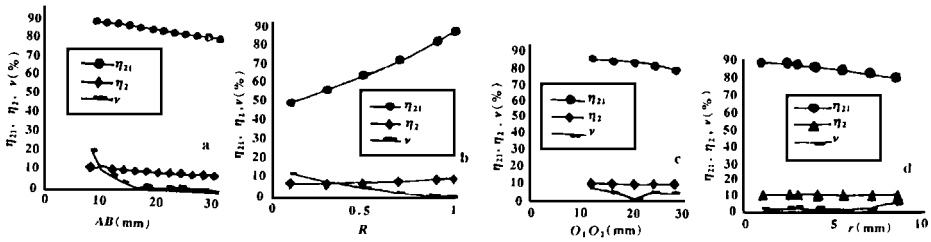


Fig. 4 a—The geometrical transfer efficiency η_{21} , nonuniformity ν and efficiency η_2 of the pumping cavity in Fig. 2a as a function of a—The distance AB b—The reflectivity R of the pumping cavity c—The distance O_1O_2 between two flash lamps d—The flash lamp radius r

三、实验结果

用阈值法测量了中间的和旁边的聚光腔的储能效率。每四支灯串联用一组电源供电, 每组电源储能电容为 $140\mu\text{F}$ (由四支 $140\mu\text{F}$ 电容两两相并再相串而成), 使用 APPLLO 能量卡计再加上 $1.06\mu\text{m}$ 窄带滤光片(滤掉漏出腔外的氙灯光) 测量激光输出能量。谐振腔长为 70cm , 两腔镜口径为 10cm , 一个为全反镜, 另一个反射率为 50.3% 。

调整泵浦电压使之刚好起振, 在阈值附近, 增益与损耗达到平衡, 忽略腔的几何损耗和衍射损耗等因素, 有:

$$R_1 R_2 \exp[2g_0 l - \alpha L] = 1 \quad (5)$$

式中, R_1, R_2 为腔镜的反射率, g_0 为小信号增益系数, α 为激光介质的损耗系数, l 为介质的有效增益长度, L 为介质损耗长度, 由此可求得小信号增益系数: $g_0 = [\alpha L - 0.5 \ln(R_1 R_2)] / l$ 进一步可求出储能效率:

$$\eta_{st} = W_s / W_p = g_0 E_s V / E_p \quad (6)$$

式中, W_s 和 W_p 为储能密度和泵浦密度, E_s 为饱和能量密度, E_p 为泵浦能量, V 为介质的泵浦体积。

在实验中, $\alpha = 0.004\text{cm}^{-1}$, $l = 23.35\text{cm}$, $L = 29.1\text{cm}$, $E_s = 13.85\text{J}/\text{cm}^2$, $V = 147\text{cm}^3$, $R_1 = 100\%$, $R_2 = 50.3\%$ 。

对旁边板条, 起振阈值电压 $U = 5500\text{V}$, 可计算得 η_{st} (实验值)(旁边板条) = 2.53% , 对中间板条, 起振阈值电压 $U = 6000\text{V}$, 可计算得 η_{st} (实验值)(中间板条) = 3.18% , 测得中间的聚光腔储能效率为 3.18% , 两侧的腔为 2.53% , 而早期中物院星光装置使用同种材料的棒状放大器的储能效率为 1.6% 左右, 可见, 采用光炉式结构提高了固体激光器的储能效率。对中间板条, η_{st} (计算值)(中间板条) / η_{st} (实验值)(中间板条) = 1.07 , 对旁边板条, η_{st} (计算值)(旁边板条) / η_{st} (实验值)(旁边板条) = 1.08 , 因此, 储能效率的实验值和计算值按比例是相符合的。

四、小结

从图 4a, b 和 d 可以看出, 所选取的最佳腔参数均取在泵浦光分布不均匀度的极小值附近。计算模拟及实验研究均表明, 采用合理设计的光炉式结构可得到较高的泵浦腔几何传输效率和储能效率。因此, 使用沿灯的横向和纵向二维光线追迹法和合理近似的物理模型所作数值计算为设计合适的聚光腔提出了理论指导。

对高功率(或能量)输出的器件来说, 由于泵浦灯输出能量有限, 多根灯取代单灯辐照是可取的。图 1 所示的多根板条固体激光器用聚光腔很容易向横方向和纵方向扩展为多灯多板条阵列式构型, 即组合式结构。该项工作正在进行之中, 有关工作将另文报道。

高功率二极管泵浦固体激光器研究的新进展

吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 本文对高功率二极管泵浦固体激光器和相关技术研究的新进展作了报道和分析。

关键词: 二极管泵浦固体激光器 激光二极管 惯性约束聚变 主振荡器 功率放大器

Recent advances in high-power diode-pumped solid-state lasers

L Baida

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University)

Abstract: In this paper the recent developments in high-power diode-pumped solid-state lasers and related technologies are reported and analyzed.

Key words: diode pumped solid-state laser (DPL) laser diode(LD) inertial confinement fusion (ICF) master oscillator and power amplifier (MOPA)

一、引言

二极管泵浦固体激光器(DPL)的显著优点是通过用与固体激光工作物质主吸收峰波长相匹配的激光二极管(LD)代替传统闪光灯的宽带泵浦,以减小激光介质的热效应和提高激励效率。DPL综合了LD重量轻、体积小和固体激光高储能,可定标到高功率等优点,使得在一个结构紧凑的、全固体化的激光器件上实现高功率、高效率、高光束质量和高稳定工作成为可能。例如,美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室(LLNL)1992年研制成功的平均输出功率1kW的DPL激光头尺寸15cm×15cm×10cm,仅有一个葡萄柚大小,这对战术军用当然是十分诱人的,并已在工业材料加工中显示出优势。高功率DPL另一潜在应用是惯性约束聚变(ICF)固体激光驱动器。近年来国际上的研究工作已从概念设计、聚变能电厂成本估算到开始进行小型原理性实验。此外,为使高功率DPL向实用化方向发展,高功率LD阵列、适于LD泵浦的固体激光材料,以及其它与高功率DPL相关的单元器体与技术研究也有了新的进展。下面,拟对近年来国际上高功率DPL和相关技术研究的进展作一评述和分析。

参 考 文 献

- 1 Bafile U, Mazzinghi P. SPIE, 1988; 1021: 120
- 2 Powell H T, Erlandson A C, Jancaitis K S *et al.* SPIE, 1990; 1277: 103~ 120
- 3 克希奈尔 W. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1983

* * *

作者简介: 冯国英,女,1970年出生。硕士,博士研究生。主要研究方向为新型和高功率固体激光器,光束传输变换和光学设计等。

