

室温下零声子线抽运 Yb:YAG 板条放大器的理论研究

李密^{1,2,3*}, 尚建力^{1,2}, 周唐建^{1,2}, 汪丹^{1,2}, 徐浏^{1,2}, 邬映臣^{1,2}, 唐淳^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999;

³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 对室温下零声子线(抽运波长为 969 nm)抽运 Yb:YAG 激光器进行了理论研究,建立了 969 nm 抽运 Yb:YAG 的速率方程。在相同热负载状态下,通过数值模拟分别得到 969 nm 和 941 nm 抽运时 Yb:YAG 板条放大器的光-光转换效率和输出激光强度。模拟结果表明:941 nm 和 969 nm 抽运的光-光转换效率基本相同;抽运波长为 969 nm 的抽运强度比 941 nm 提高了 20%以上。

关键词 激光器; Yb:YAG; 零声子线抽运; 吸收截面; 受激发射截面; 光-光转换效率

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0214003

Theoretical Research on Zero-Phonon Line Pumped Yb:YAG Slab Amplifier at Room-Temperature

Li Mi^{1,2,3*}, Shang Jianli^{1,2}, Zhou Tangjian^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Xu Liu^{1,2},
Wu Yingcheng^{1,2}, Tang Chun^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;

³Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract The theoretical research on the Yb:YAG laser pumped by the zero-phonon line with pumping wavelength of 969 nm is constructed, and the rate equations for this 969 nm pumped Yb:YAG laser are established. The optical-to-optical efficiency and the output laser intensity of this Yb:YAG slab laser amplifier pumped at 969 nm or 941 nm are obtained by numerical simulation under the same thermal load state. The simulation results show that the optical-to-optical efficiencies for both are almost equivalent. The pumping intensity for 969 nm pumping is 20% higher than that for 941 nm pumping.

Key words lasers; Yb:YAG; zero-phonon line pumping; absorption cross section; stimulated emission cross section; optical-to-optical efficiency

OCIS codes 140.3615; 140.3380; 140.3480; 140.3580; 140.3280

1 引 言

高功率固体激光器主要使用掺 Nd³⁺ 和 Yb³⁺ 的激光介质^[1],两者的主要区别为:Nd³⁺ 为四能级系统,当抽运波长为 808 nm 时,1064 nm 激光输出的量子亏损大约为 24%;Yb³⁺ 为准三能级系统,当抽运波长为 941 nm 时,1030 nm 激光输出的量子亏损小于 9%。量子亏损的减小可以有效降低产热率,从而实现更高的抽运强度,获得更高的光-光转换效

率和输出功率^[2-3]。

通过测量 Yb:YAG 的吸收光谱可以知道:Yb:YAG 不仅可以采用 941 nm 抽运,也可以采用 969 nm 抽运。当采用 941 nm 抽运时,量子亏损约为 9%,产热率约为 11%;而采用 969 nm 抽运时,量子亏损不超过 6%,产热率约为 9%^[4]。由此可见,在相同热负载状态下采用 969 nm 抽运时的抽运强度可以提高 20%以上,有可能进一步提高 Yb:YAG 激光器的输出功率。

收稿日期:2018-08-22;修回日期:2018-09-08;录用日期:2018-09-25

* E-mail: limi@tsinghua.org.cn

本文建立了 941 nm 和 969 nm 抽运 Yb:YAG 的速率方程,通过测量 Yb:YAG 样品的透射光谱分别得到了 Yb:YAG 在 941 nm 和 969 nm 处的有效吸收截面,进而获得了 Yb:YAG 板条的掺杂浓度。根据激光放大微分方程,分别模拟了 941 nm 和 969 nm 抽运时的光-光转换效率和输出激光强度。模拟结果表明,在相同热负载状态下,采用 969 nm 和 941 nm 抽运时的光-光转换效率基本相同,但 969 nm 的抽运强度比 941 nm 的抽运强度高,其输出的激光强度可得到显著提高。

2 Yb:YAG 的速率方程

图1所示为温度为 300 K 时 Yb:YAG 的能级结构^[5],基态 $^2F_{7/2}$ 分裂为 4 个子能级,激发态 $^2F_{5/2}$ 分裂成 3 个子能级。激光跃迁为 $10327\text{ cm}^{-1} \rightarrow 612\text{ cm}^{-1}$,激光波长为 1030 nm。在采用 941 nm 抽运时,Yb³⁺由 0 cm^{-1} 跃迁到 10624 cm^{-1} ,再通过非辐射弛豫跃迁到 10327 cm^{-1} ,最后通过受激辐射放大获得激光输出,此时的量子亏损大约为 9%,产热率大约为 11%;而在采用 969 nm 抽运时,Yb³⁺将被抽运到 10327 cm^{-1} ,再通过受激辐射放大获得激光输出,此时的量子亏损大约为 6%,产热率大约为 9%。因此,在相同热负载状态下,与 941 nm 抽运相比,采用 969 nm 抽运时的抽运强度可以提高 20% 以上,从而有可能显著提高输出激光强度。

根据 Yb:YAG 的能级结构,可以推导出

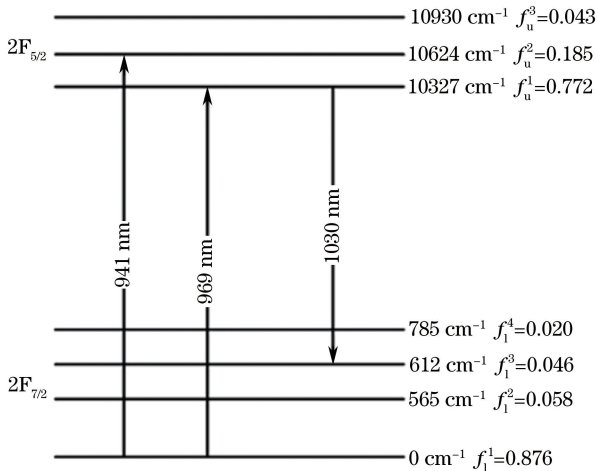


图 1 温度为 300 K 时 Yb:YAG 的能级结构
Fig. 1 Energy level structure of Yb:YAG at temperature of 300 K

941 nm 抽运 Yb:YAG 的速率方程:

$$\frac{dn_u}{dt} = \frac{I_P}{h\nu_P} \sigma_a (f_l^1 n_l - f_u^2 n_u) - \frac{n_u}{\tau} - \frac{I_L}{h\nu_L} \sigma_e (f_u^1 n_u - f_l^3 n_l), \quad (1)$$

类似地,969 nm 抽运 Yb:YAG 的速率方程为

$$\frac{dn_u}{dt} = \frac{I_P}{h\nu_P} \sigma_a (f_l^1 n_l - f_u^1 n_u) - \frac{n_u}{\tau} - \frac{I_L}{h\nu_L} \sigma_e (f_u^1 n_u - f_l^3 n_l), \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数; τ 为 Yb:YAG 的荧光寿命; n 为粒子数密度; f 为子能级的 Boltzmann 小数,下角标 l 和 u 分别表示基态和激发态,上角标 1~3 表示基态或者激发态中从低到高的子能级序号; I 为光强,下角标 P 和 L 分别表示抽运光和激光; ν 为频率; σ 为截面面积,下角标 a 和 e 分别表示吸收和受激发射,这两个截面都是指光谱截面 (Stark-to-Stark)。更常用的截面是指有效吸收截面和有效受激发射截面,它们与光谱截面的关系式为^[5]

$$\begin{cases} \sigma_a^{\text{eff}} = f_l^1 \sigma_a \\ \sigma_e^{\text{eff}} = f_u^1 \sigma_e \end{cases}, \quad (3)$$

式中: σ 的上角标 eff 表示吸收截面或受激发射截面的有效值。

定义抽运饱和光强和激光饱和光强分别为

$$\begin{cases} I_{SP} = \frac{h\nu_P}{\sigma_a \tau} = \frac{h\nu_P}{\sigma_a^{\text{eff}} \tau} f_l^1 \\ I_{SL} = \frac{h\nu_L}{\sigma_e \tau} = \frac{h\nu_L}{\sigma_e^{\text{eff}} \tau} f_u^1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:下标 SP 和 SL 分别表示抽运饱和光强与激光饱和光强。定义 Yb:YAG 对 941 nm 和 969 nm 波长抽运光的吸收系数分别为

$$\begin{cases} \alpha_{941} = \sigma_a (f_l^1 n_l - f_u^2 n_u) \\ \alpha_{969} = \sigma_a (f_l^1 n_l - f_u^1 n_u) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: α 为吸收系数,其下角标 941 和 969 分别表示 941 nm 和 969 nm 这两种波长。定义 Yb:YAG 中 1030 nm 波长激光的增益系数为

$$g = \sigma_e (n_u f_u^1 - n_l f_l^3). \quad (6)$$

在稳态条件下求解(1)式和(2)式,可得到激发态的粒子数密度,结合(4)~(6)式可以推导出不同抽运波长条件下 Yb:YAG 对抽运光的吸收系数和激光增益系数的表达式:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{941} &= \frac{\sigma_a n_{\text{total}} \left[f_1^1 + \frac{I_L}{I_{\text{SL}}} (f_1^1 f_u^1 - f_1^3 f_u^2) \right]}{1 + \frac{I_P}{I_{\text{SP}}} (f_1^1 + f_u^2) + \frac{I_L}{I_{\text{SL}}} (f_1^3 + f_u^1)} \\ g_{941} &= \frac{\sigma_e n_{\text{total}} \left[\frac{I_P}{I_{\text{SP}}} (f_1^1 f_u^1 - f_1^3 f_u^2) - f_1^3 \right]}{1 + \frac{I_P}{I_{\text{SP}}} (f_1^1 + f_u^2) + \frac{I_L}{I_{\text{SL}}} (f_1^3 + f_u^1)} \\ \alpha_{969} &= \frac{\sigma_a n_{\text{total}} \left[f_1^1 + \frac{I_L}{I_{\text{SL}}} (f_1^1 f_u^1 - f_1^3 f_u^1) \right]}{1 + \frac{I_P}{I_{\text{SP}}} (f_1^1 + f_u^1) + \frac{I_L}{I_{\text{SL}}} (f_1^3 + f_u^1)} \\ g_{969} &= \frac{\sigma_e n_{\text{total}} \left[\frac{I_P}{I_{\text{SP}}} (f_1^1 f_u^1 - f_1^3 f_u^1) - f_1^3 \right]}{1 + \frac{I_P}{I_{\text{SP}}} (f_1^1 + f_u^1) + \frac{I_L}{I_{\text{SL}}} (f_1^3 + f_u^1)} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中： n 的下角标 total 表示总的粒子数密度。根据(7)式可知：两种抽运波长的吸收系数和激光增益系数的表达式很相似，只需将 941 nm 抽运时的吸收系数和激光增益系数表达式中的 f_u^2 换成 f_u^1 ，就能得到 969 nm 抽运时的吸收系数与激光增益系数；Yb:YAG 对抽运光的吸收系数、激光增益系数与抽运强度、激光强度和工作温度等因素有关。

3 Yb:YAG 的光谱参数

当温度为 293 K 时，使用美国 PerkinElmer 公司生产的 Lambda950 分光光度计测量了 Yb:YAG 样品的透射光谱(图 2)。该 Yb:YAG 样品的厚度为 8 mm、Yb³⁺ 的掺杂浓度(原子数分数，下同)为 0.75%，样品表面未镀膜，探测光以 0° 入射、单次通过 Yb:YAG 样品。

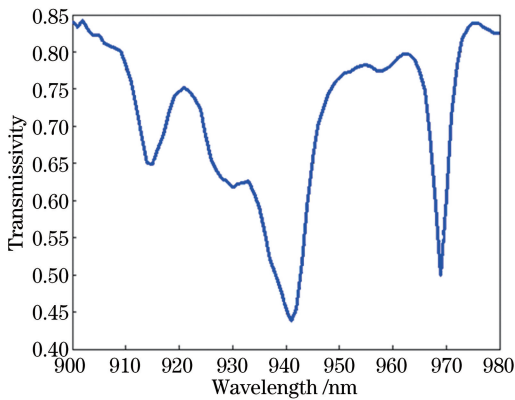


图 2 温度为 293 K 时 Yb:YAG 样品的透射光谱
Fig. 2 Transmission spectrum of Yb:YAG sample at temperature of 293 K

由于 Yb:YAG 样品的两个表面相互平行，因此

光波在样品内部存在多次反射，黄呈辉等^[6] 通过理论研究得到光学材料的最终透射率与吸收系数之间的关系：

$$F = \frac{t^2 \exp(-ad)}{1 - (1-t)^2 \exp(-2ad)}, \quad (8)$$

式中： F 为探测光的最终透射率； t 为 Yb:YAG 样品与空气界面的单次透射率； d 为样品的厚度。Yb:YAG 材料的折射率为 1.82，由菲涅耳公式求得 0° 入射时 $t=0.9154$ 。

求解(8)式可以得到 Yb:YAG 样品对光波的吸收系数为

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{\sqrt{t^4 + 4(1-t)^2 F^2} - t^2}{2F(1-t)^2} \right]. \quad (9)$$

室温下 Yb:YAG 的上能级没有热粒子数，同时由于探测光的强度很弱，也没有抽运光和激光注入，因此根据(7)式可以求得此时 Yb:YAG 样品对抽运光的吸收系数：

$$\alpha = \sigma_a f_1^1 n_{\text{total}} = \sigma_a^{\text{eff}} n_{\text{total}}. \quad (10)$$

将图 2 的透射光谱数据、Yb:YAG 样品的掺杂浓度和厚度代入(9)式和(10)式，就可以计算出 Yb:YAG 样品对抽运光的有效吸收截面光谱曲线，结果如图 3 所示。

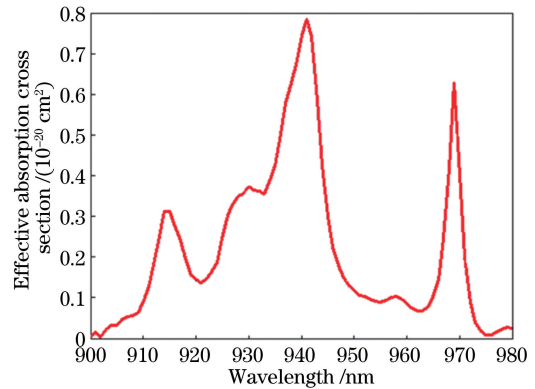


图 3 温度为 293 K 时 Yb:YAG 样品有效吸收截面
Fig. 3 Effective absorption cross section of Yb:YAG sample at temperature of 293 K

由图 3 可知：Yb:YAG 样品在 900~980 nm 范围内的主吸收峰位于 941 nm 处，有效吸收截面大约为 $0.785 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ，谱宽大约为 10 nm，小于 Bruesselbach 等^[5] 给出的 18 nm 谱宽；次吸收峰位于 969 nm 处，有效吸收截面大约为 $0.627 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ，谱宽大约为 4 nm。根据实验数据可知室温下 Yb:YAG 在 969 nm 和 941 nm 处的有效吸收截面之比约为 80%。

Dong 等^[7] 测量了室温下不同掺杂浓度

Yb:YAG的吸收光谱。根据所报道的实验数据可以推算出掺杂浓度为 2.5% 的 Yb:YAG 在 969 nm 和 941 nm 处的有效吸收截面之比大约为 83%, 当掺杂浓度提高到 30% 时, 该比值减小到 74%。Casagrande 等^[8]测量了室温下 Yb:YAG 的吸收光谱和发射光谱截面, 得到 Yb:YAG 在 969 nm 处和 941 nm 处的有效吸收截面之比大约为 82%, 在 1030 nm 处的有效受激发射截面大约为 $2.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。Liu 等^[9]测量了 300~573 K 范围内 Yb:YAG 的透射光谱和有效吸收截面光谱, 当 Yb:YAG 的温度由 300 K 升高至 362 K 时, Yb:YAG 在 969 nm 和 941 nm 处的有效吸收截面之比由 93% 下降到 85%。根据 Liu 等^[9]在不同温度下测得的 Yb:YAG 的有效吸收截面, 本研究拟合得到 Yb:YAG 在 969 nm 处、300~362 K 温度范围内的有效吸收截面与 Yb:YAG 工作温度的关系式为

$$\sigma_{a,969}^{\text{eff}}(T) = 2.47 \times \exp(-0.004T) \times 10^{-20}, \quad (11)$$

式中: T 为 Yb:YAG 的工作温度, 单位为 K。

Liu 等^[9]拟合了 Yb:YAG 在 941 nm 处、300~573 K 温度范围内的有效吸收截面与 Yb:YAG 工作温度的关系式:

$$\sigma_{a,941}^{\text{eff}}(T) = \{0.207 + 0.637 \times \exp[-(T - 273)/288]\} \times 10^{-20}. \quad (12)$$

根据(12)式可以求得 293 K 时 Yb:YAG 在 941 nm 处的有效吸收截面为 $0.801 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 本研究测得的有效吸收截面为 $0.785 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 两者基本一致。由于 Yb:YAG 在 969 nm 处的有效吸收截面相对较小, 因此采用 969 nm 抽运时必须提高 Yb:YAG 板条的掺杂浓度。

Sumida 等^[10]测量了不同温度下 Yb:YAG 上能级的荧光寿命和有效受激发射截面等参数: 室温状态下 Yb:YAG 上能级的荧光寿命大约为 0.95 ms, 有效受激发射截面大约为 $2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。Chen 等^[11]根据 Sumida 等^[10]的实验数据, 通过拟合得到 Yb:YAG 在 1030 nm 处的有效受激发射截面与 Yb:YAG 工作温度的关系:

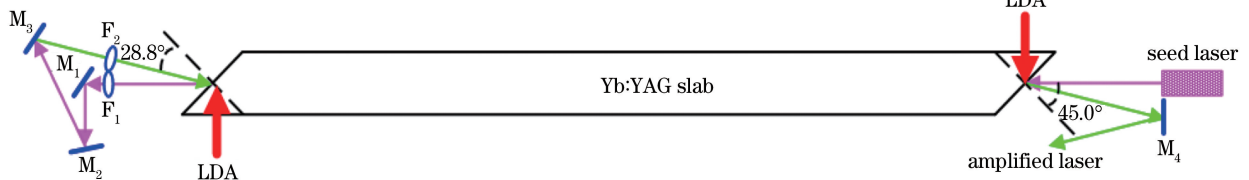


图 4 Yb:YAG 板条双通放大器的光路示意图

Fig. 4 Optical path of Yb:YAG slab double-pass amplifier

$$\sigma_e^{\text{eff}}(T) = [0.953 + 33.608 \times \exp(-T/92.8)] \times 10^{-20}. \quad (13)$$

4 Yb:YAG 板条放大器数值模拟

Yb:YAG 板条端面的切角为 45° , 板条掺杂区的长度设计为 150.0 mm, 为了使抽运光的吸收效率不小于 95%, 要求 Yb:YAG 板条对抽运光的吸收系数不小于 0.20 cm^{-1} 。预计 Yb:YAG 板条的最高工作温度为 350 K, 上、下能级的粒子数占比分别为 15% 和 85%, 根据 Boltzmann 分布规律及(5)式、(11)式和(12)式可以求得采用 941 nm 和 969 nm 抽运时 Yb:YAG 板条的掺杂浓度分别为 0.31% 和 0.43%。Yb:YAG 板条拟采用双端对称抽运, 1030 nm 的种子光两次通过 Yb:YAG 板条以获得有效的激光放大, 抽运光和种子光的口径相同。

图 4 为 Yb:YAG 板条双通放大器的光路示意图, 其中 $M_1 \sim M_4$ 均为平面全反射镜, F_1 和 F_2 均表示焦距为 340 mm 的球透镜, LDA 为激光二极管阵列, 种子光入射角分别为 45.0° 和 28.8° ^[12]。

根据激光增益介质对抽运光的吸收规律和激光放大理论可得^[12]:

$$\begin{cases} \frac{dI_{P+}(z)}{I_{P+}(z)dz} = -\alpha(z) \\ \frac{dI_{P-}(z)}{I_{P-}(z)dz} = +\alpha(z) \\ \frac{dI_{L+}(z)}{I_{L+}(z)dz} = g(z) - \delta \\ \frac{dI_{L-}(z)}{I_{L-}(z)dz} = \delta - g(z) \end{cases}, \quad (14)$$

式中: z 为板条长度方向的坐标(定义种子光入射到板条的方向为 z 轴的正方向, 入射处为 z 轴的原点); 下角标 P+ 和 P- 分别表示正向和反向传输的抽运光; 下角标 L+ 和 L- 分别表示正向和反向传输的激光; δ 为板条内部的传输损耗系数。根据(14)式可以得到: $I_{P+}(z)I_{P-}(z) = C$, $I_{L+}(z)I_{L-}(z) = D$, 其中 C 和 D 为特定的常数。

由于 Yb:YAG 板条采用双端对称抽运和双通放大,故(7)式中的激光强度和抽运强度都必须采用叠加后的总光强。激光从第一通出口到第二通入口的传输损耗大约为 1%,因此得到第一个边界条件: $I_{L-}(S)=0.99 \times I_{L+}(S)$,其中 S 为板条的长度。同时,由于 Yb:YAG 板条采用双端对称抽运的方式,因此又可以得到第二个边界条件: $I_{P-}(S)=I_{P+}(0)$ 。

由于 Yb:YAG 在 969 nm 处的吸收谱宽大约为 4 nm,为了保证吸收效率,必须采用窄线宽的 LDA 抽运,本研究在数值模拟时没有考虑 LDA 线宽对吸收效率的影响。同时,为了达到相同的热负载状态,数值模拟时 969 nm 的抽运强度始终比 941 nm 的抽运强度高 20%。

数值模拟的参数如下:1030 nm 种子光的强度

为 $10 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$,采用 941 nm 和 969 nm 抽运时板条端面注入的最大抽运强度分别为 $30 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $36 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$,其余参数详见前文。

将相关参数和边界条件代入(7)式和(14)式,通过数值模拟分别得到采用 941 nm 和 969 nm 抽运时 Yb:YAG 板条双通放大器的光-光转换效率和输出激光强度随抽运强度增大的变化曲线,如图 5 所示(注意:941 nm 抽运强度的变化区间为 $10 \sim 30 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$,而 969 nm 抽运强度的变化区间为 $12 \sim 36 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。为了保证采用两种抽运波长时的热负载状态相同,横轴上同一位置处 969 nm 的抽运强度始终保持为 941 nm 的抽运强度的 1.2 倍,例如当 941 nm 的抽运强度为 $10 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,969 nm 的抽运强度则为 $12 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$,以此类推)。

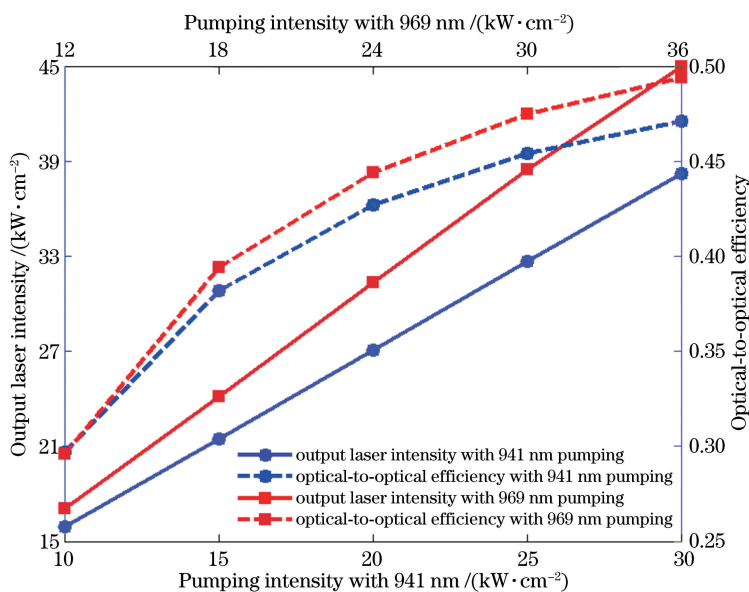


图 5 Yb:YAG 板条双通放大器的光-光转换效率和输出激光强度

Fig. 5 Optical-to-optical efficiency and output laser intensity of Yb:YAG slab double-pass amplifier

由图 5 可知:在相同热负载状态下分别采用 969 nm 和 941 nm 抽运时,两种情形下的光-光转换效率基本相同。当 941 nm 波长抽运的抽运强度为 $30 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,941 nm 抽运的光-光转换效率为 47.1%,而相同热负载状态下 969 nm 抽运的光-光转换效率则为 48.8%。需要注意的是:此处的光-光转换效率是以注入到板条内的抽运功率为分母进行计算的,如果以 LDA 发射的功率为分母计算,则光-光转换效率还需要乘以抽运耦合效率。此外,由于 969 nm 的抽运强度比 941 nm 的抽运强度提高了 20%,因此采用 969 nm 抽运时从 Yb:YAG 板条中双通提取的激光功率(放大器输出的激光功率与种

子光功率之差)比 941 nm 抽运时提高了大约 24%。

5 结 论

对室温下零声子线抽运 Yb:YAG 进行理论研究,根据 Yb:YAG 的能级结构和激光放大理论分别模拟了抽运波长分别为 941 nm 和 969 nm 时 Yb:YAG 板条放大器的光-光转换效率和输出激光强度。与 941 nm 抽运相比,969 nm 抽运时的量子亏损和产热率更低,可在热负载保持不变的情况下进一步提高抽运强度,从而有可能进一步提高输出功率,这对于提高激光器的功率体积比和推进高平均功率固体激光器的轻小型化有着重要意义。目前,

国内外关于室温下 Yb:YAG 板条激光器的研究较少,而在室温下采用 969 nm 抽运 Yb:YAG 板条激光器的研究则更加少见。采用 969 nm 抽运 Yb:YAG 激光器的主要技术难点在于 Yb:YAG 在 969 nm 处的吸收带宽仅为 4 nm 左右,因此要求 969 nm 抽运光的线宽很窄。随着二极管激光器技术的发展,当 969 nm LDA 的发射线宽减小到 1.5 nm 以下时,Yb:YAG 对 969 nm LDA 抽运光的吸收效率与 Yb:YAG 对 941 nm LDA 抽运光的吸收效率接近,届时 969 nm 抽运的 Yb:YAG 激光器将会受到更多的关注,高平均功率 Yb:YAG 激光器的输出功率将会实现显著增长。

参 考 文 献

- [1] Bowman S R. High-power diode-pumped solid-state lasers [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52 (2): 021012.
- [2] Sueda K, Takahashi H, Kawato S, *et al.* High-efficiency laser-diodes-pumped microthickness Yb:Y₃Al₅O₁₂ slab laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(15): 151110.
- [3] Matsubara S, Ueda T, Takamido T, *et al.* Nearly quantum-efficiency limited oscillation of Yb:YAG laser at room temperature[C]. *Conference on lasers and electro-optics*, 2005: 325-327.
- [4] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29 (6): 1457-1459.
- [5] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, *et al.* Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(1): 105-116.
- [6] Huang C H, Huang J H, Zhang G, *et al.* A method for accurate calculation of the absorption coefficients of optical materials[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(6): 45-46.
黄呈辉, 黄见洪, 张戈, 等. 一种精确计算光学材料吸收系数的方法 [J]. *激光杂志*, 2001, 22(6): 45-46.
- [7] Dong J, Bass M, Mao Y L, *et al.* Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2003, 20(9): 1975-1979.
- [8] Casagrande O, Deguil-Robin N, Le Garrec B, *et al.* Time and spectrum resolved model for quasi-three-level gain-switched lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(2): 206-212.
- [9] Liu Q, Fu X, Gong M L, *et al.* Effects of the temperature dependence of absorption coefficients in edge-pumped Yb:YAG slab lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(9): 2081-2089.
- [10] Sumida D S, Fan T Y. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(17): 1343-1345.
- [11] Chen B, Dong J, Patel M, *et al.* Modeling of high-power solid state slab lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4968: 501664.
- [12] Li M, Zhou T J, Xu L, *et al.* High power continuous wave Yb:YAG composite crystal zigzag slab amplifier at room temperature [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 1-9.