

自发辐射对Ho:YAG/SrWO₄内腔拉曼激光器输出特性的影响

王玉芳, 张新陆*, 康攀强, 郭婷婷, 庞 帅, 荆小凡, 赵 艺

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2021年12月1日; 录用日期: 2021年12月21日; 发布日期: 2021年12月28日

摘 要

文章通过数值模拟研究了自发辐射对Ho:YAG/SrWO₄主动调Q内腔拉曼激光器输出特性的影响。在考虑自发辐射的情况下, 建立了Ho:YAG/SrWO₄主动调Q内腔拉曼激光器的速率方程模型。通过对速率方程进行数值模拟, 研究了在不同脉冲重复频率下, 自发辐射对拉曼激光器输出特性的影响。结果表明, 自发辐射对拉曼激光器的脉冲宽度和峰值功率的影响较为明显。此外, 在较低的吸收泵浦功率下, 自发辐射对拉曼激光器的平均输出功率和脉冲能量有一定的影响; 在较高的吸收泵浦功率下, 自发辐射对平均输出功率和脉冲能量几乎没有影响。

关键词

自发辐射, 主动调Q, 拉曼激光器, 输出特性

The Effect of Spontaneous Radiation on the Output Performances of Ho:YAG/SrWO₄ Intracavity Raman Laser

Yufang Wang, Xinlu Zhang*, Panqiang Kang, Tingting Guo, Shuai Pang, Xiaofan Jing, Yi Zhao

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Dec. 1st, 2021; accepted: Dec. 21st, 2021; published: Dec. 28th, 2021

Abstract

In this paper, the effect of spontaneous radiation on the output performances of the Ho:YAG/SrWO₄

*通讯作者。

文章引用: 王玉芳, 张新陆, 康攀强, 郭婷婷, 庞帅, 荆小凡, 赵艺. 自发辐射对 Ho:YAG/SrWO₄ 内腔拉曼激光器输出特性的影响[J]. 光电子, 2021, 11(4): 214-221. DOI: 10.12677/oe.2021.114025

actively Q-switched intracavity Raman laser was investigated by numerical simulation. The rate equation model of the Ho:YAG/SrWO₄ actively Q-switched intracavity Raman laser was developed with consideration of spontaneous radiation. The effect of spontaneous radiation on the output performances of the Raman laser at different pulse repetition frequencies was investigated by numerical simulation of the rate equation. The results show that the effect of spontaneous radiation on the pulse width and peak power of the Raman laser was more obvious. In addition, at lower absorbed pump power, the spontaneous radiation had a certain effect on the average output power and pulse energy of the Raman laser; at higher absorbed pump power, the spontaneous radiation had almost no effect on the average output power and pulse energy.

Keywords

Spontaneous Radiation, Actively Q-Switched, Raman Laser, Output Performances

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

处于大气窗口且对人眼安全的 2.6 μm 波段激光, 在激光测距、光电对抗、气象监测以及材料加工等领域具有广泛的应用[1] [2]。受激拉曼散射(Stimulated Raman scattering, 简称 SRS)是一种拓展光谱的有效途径。基于 SRS 的固体激光器可以产生新的波长, 该波长是由基频光波长和拉曼增益介质的拉曼频移决定的, 可以实现高效的频率转换[3] [4]。SrWO₄ 晶体由于其较高的损伤阈值, 良好的热稳定性和较大的拉曼增益, 受到了越来越广泛的关注[5]。拉曼晶体的拉曼增益系数与基频光的波长近似呈反比, 波长越长, 拉曼增益系数越小, 就越不容易实现高效的频率转换。

为了更好的进行实验研究, 实现高效的拉曼激光输出, 对拉曼激光器的理论模型进行数值分析是一种非常重要的手段。李志刚等人提出了一组考虑放大自发辐射的速率方程来描述被动调 Q 激光器中的粒子数密度, 证明了在速率方程中引入放大自发辐射是准确模拟被动调 Q 激光器输出特性的必要条件[6]。W. Zhang 等人在速率方程中考虑了自发辐射对腔内光子数密度的贡献, 给出了较为完备的速率方程模型[7]。M. B. Alsous 等人在闪光灯泵浦的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 固体激光器的速率方程中考虑了自发辐射的影响, 理论结果与实验结果展现出良好的一致性[8]。据我们所知, 在主动调 Q 拉曼激光器速率方程中, 考虑自发辐射对激光器输出特性的影响报道很少。

本文基于 Ho:YAG 准二能级激光系统, 结合经典的主动调 Q 速率方程理论, 考虑了自发辐射, SRS 效应和自发拉曼散射效应, 建立了谐振泵浦 Ho:YAG/SrWO₄ 主动调 Q 内腔拉曼激光器的速率方程。对此速率方程进行数值求解, 研究了在不同脉冲重复频率下, 自发辐射对拉曼激光器输出特性的影响。从模拟结果可以看出, 自发辐射对拉曼激光器的脉冲宽度和峰值功率的影响较为明显。此外, 在较低的吸收泵浦功率下, 自发辐射对拉曼激光器的平均输出功率和脉冲能量有一定的影响; 在较高的吸收泵浦功率下, 自发辐射对平均输出功率和脉冲能量几乎没有影响。

2. Ho:YAG/SrWO₄ 主动调 Q 拉曼激光器速率方程模型

速率方程是研究激光器的重要理论工具。基于经典的主动调 Q 速率方程模型, 考虑 SRS 效应、Ho:YAG 晶体中的自发辐射以及 SrWO₄ 晶体中的自发拉曼散射, 可以得到平面波近似下的 Ho:YAG/SrWO₄ 主动调

Q 内腔拉曼激光器的耦合速率方程，可以由下式给出[9] [10] [11]:

$$\frac{d\phi_l}{dt} = \frac{1}{t_r} (2\sigma n \phi_l l - 2gh\nu_s c \phi_l \phi_s l_s) - \frac{\phi_l}{t_l} + k_p n \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{2}{t_r} gh\nu_s c \phi_l \phi_s l_s - \frac{\phi_s}{t_s} + k_s \phi_l \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma c \phi n - \frac{n}{\tau_{sp}} \quad (3)$$

其中 ϕ_l 和 ϕ_s 分别是基频光和一阶斯托克斯光束的腔内光子密度， n 是反转粒子数密度。 $t_r = 2l_c / c$ 是激光谐振腔中的往返传输时间， l_c 为谐振腔的光学长度， c 是真空中光速。 $t_{l,s} = t_r / (L_{l,s} - \ln(R_{l,s}))$ 是腔内基频光和一阶斯托克斯光的光子寿命， $L_{l,s}$ 是基频光谐振腔和拉曼光谐振腔的固有损耗， $R_{l,s}$ 分别是基频光和拉曼光输出耦合镜的反射率。 k_p 是自发辐射中符合受激振荡光子模式的光子所占的比例。 k_s 是自发拉曼散射中符合受激振荡光子模式的光子所占的比例。 h 是普朗克常数， ν_s 是一阶斯托克斯光的频率， l 是产生基频光的增益介质长度， l_s 是拉曼增益介质的长度， σ 是有效受激发射截面。 g 是拉曼增益系数， τ_{sp} 是基频光增益介质的上能级寿命。在准二能级系统中， $\gamma = 1 + f_l / f_u$ 是反转衰减因子，表示 Ho^{3+} 从激光上能级到下能级时反转粒子的减少，其中 f_u 和 f_l 是激光上能级和下能级的 Boltzmann 因子。

对于主动调 Q 激光器来说，在脉冲产生之前，腔内的反转粒子数密度主要取决于吸收的泵浦功率和激光器的脉冲重复频率等因素。初始反转粒子数密度可用下式表示[12]:

$$n_0 = \frac{P_{abs}}{h\nu_p \pi \omega_p^2 l} \tau_{sp} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{f_p \tau_{sp}}\right) \right] \quad (4)$$

其中 P_{abs} 为吸收的泵浦功率， ω_p 为泵浦光的光斑半径， ν_p 为泵浦光的频率， f_p 为 Q 开关的脉冲重复频率。根据 J. J. Degnan 关于脉冲激光器的理论研究，峰值功率和脉冲能量的表达式分别可以写为[13]:

$$P_{peak} = \frac{1}{2} h\nu_s c \pi \omega_s^2 \ln\left(\frac{1}{R_s}\right) \phi_{s,max} \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2} h\nu_s c \pi \omega_s^2 \ln\left(\frac{1}{R_s}\right) \int_0^\infty \phi_s dt \quad (6)$$

其中 $\phi_{s,max}$ 为腔内拉曼光子数密度的最大值； ω_s 为拉曼光的光斑半径。

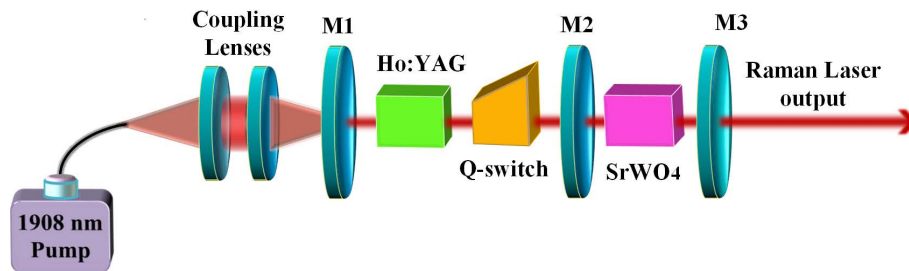


Figure 1. The experimental setup of the resonantly pumped Ho:YAG/SrWO₄ actively Q-switched intracavity Raman laser

图 1. 谐振泵浦 Ho:YAG/SrWO₄ 主动调 Q 内腔拉曼激光器结构示意图

本文采用的拉曼激光器的谐振腔结构如图 1 所示，其中镜 M1 和 M3 组成基频光谐振腔，镜 M2 和 M3 组成拉曼光谐振腔，选择 Ho:YAG 晶体作为产生基频光的增益介质，选择 SrWO₄ 晶体作为产生拉曼

光的增益介质。基于该腔型结构进行数值模拟,其中基频光谐振腔腔长为 175 mm,拉曼光谐振腔腔长为 60 mm。平面输入镜 M1 在 1908 nm 处具有很高的透射率($T > 99.5\%$),在 2122 nm 处具有很高的反射率($R > 99.8\%$)。输出镜 M3 曲率半径为 300 mm,在 2122 nm 处有高反射率($R > 99.5\%$),在 2640 nm 处有部分反射($R = 90\%$),它作为拉曼激光器的输出镜。平面镜 M2 的一端表面镀有 2122 nm 的增透膜($R < 0.5\%$),另一端表面除了镀有 2122 nm 的增透膜($R < 0.5\%$)以外,还镀有在 2640 nm 处的高反膜($R > 99.8\%$)。

我们已知 SrWO_4 拉曼晶体在 1064 nm 处的拉曼增益系数为 5 cm/GW,由于在光谱中心的拉曼增益系数与拉曼光波长近似成反比,因此本文数值模拟中使用到在 2122 nm 处的拉曼增益系数取为 2.2 cm/GW [14]。通过四阶 Runge-Kutta 法对耦合的速率方程进行数值求解,可以得到 Ho:YAG/SrWO₄ 拉曼激光器的输出特性随着吸收泵浦功率的变化关系,模拟中用到的参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters used in numerical simulations of the resonantly pumped Ho:YAG/SrWO₄ actively Q-switched intracavity Raman laser
表 1. 谐振 Ho:YAG/SrWO₄ 主动调 Q 拉曼激光器数值模拟所用到的参数

参数名称	参数值
Ho:YAG 晶体有效发射截面 σ (m ²)	0.4×10^{-24}
Ho:YAG 晶体长度 l (mm)	30
SrWO ₄ 晶体长度 l_s (mm)	30
Ho:YAG 晶体折射率 n_l	1.82
SrWO ₄ 晶体折射率 n_s	1.94
上能级玻尔兹曼因子 f_u	0.107
下能级玻尔兹曼因子 f_l	0.018
基频光谐振腔腔长(mm)	175
拉曼光谐振腔腔长(mm)	60
拉曼增益系数 g (cm/GW)	2.2
基频谐振腔的固有损耗 L_l	0.05
拉曼谐振腔的固有损耗 L_s	0.01
输出镜对基频光的反射率 R_l	0.99
输出镜对拉曼光的反射率 R_s	0.9
自发辐射中符合受激振荡的光子比例 k_p	10^{-4}
自发拉曼散射中符合受激振荡的光子比例 k_s	10^{-2}
基频增益介质的上能级寿命 τ_{sp} (s)	7×10^{-3}
泵浦光斑半径 ω_p (μm)	180
拉曼光斑半径 ω_s (μm)	320

3. Ho:YAG/SrWO₄ 主动调 Q 拉曼激光器输出特性分析

通过对耦合的速率方程进行数值求解,得到了脉冲产生过程中各种粒子数密度随时间的变化关系,如图 2 所示。其中,图 2(a)描述的是激光晶体内反转粒子数密度随着时间的变化,图 2(b)描述的是腔内基频光光子数密度和拉曼光子数密度随着时间的变化关系。开始时,采用声光调 Q 技术使谐振腔处于高损耗、低 Q 值的状态,激光器由于阈值高而不能产生振荡,通过泵浦光的激励,上能级粒子数不断积累

到很高的水平。当谐振腔突然变为低损耗、高 Q 值的状态时，上能级粒子数迅速减少，腔内光子数密度急剧增加，形成基频光脉冲。当基频光光子数密度达到拉曼散射阈值时，受激拉曼散射过程发生，从而形成了拉曼激光脉冲输出，如图 2(b)中的红色曲线所示。

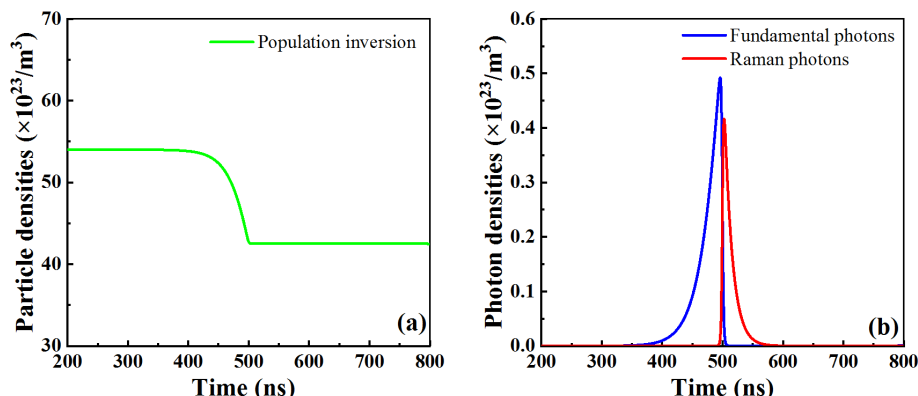


Figure 2. (a) Population inversion densities and (b) Photon densities as functions of time
图 2. (a) 反转粒子数密度和(b) 腔内光子数密度随时间的变化关系

对于主动调 Q 激光器而言，在脉冲产生之前，吸收的泵浦功率和调 Q 激光器的脉冲重复频率对腔内的反转粒子数密度的大小有一定的影响。因此，我们通过数值模拟，可以得到在不同脉冲重复频率下，拉曼激光器的输出特性，如平均输出功率、脉冲能量、脉冲宽度和峰值功率随着吸收泵浦功率的变化关系。接下来我们在不同脉冲重复频率下，考虑自发辐射对拉曼激光器输出特性的影响。

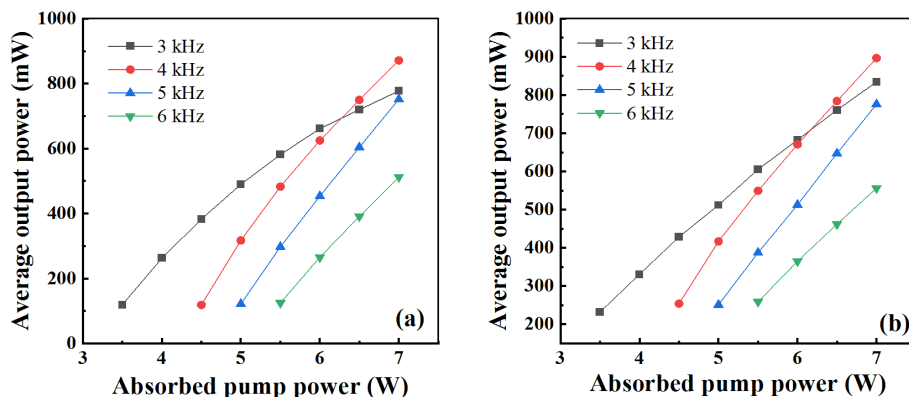


Figure 3. Variations of average output power with absorbed pump power for different pulse repetition frequencies when (a) considering and (b) not considering spontaneous radiation
图 3. (a)考虑和(b)不考虑自发辐射时，不同脉冲重复频率下，平均输出功率随吸收的泵浦功率的变化关系

图 3 为考虑和不考虑自发辐射的情况下，脉冲重复频率分别为 3~6 kHz 时，平均输出功率随吸收泵浦功率的变化关系。从这两幅图可知，拉曼激光器的阈值泵浦功率随着脉冲重复频率的增加而增大；在同一脉冲重复频率下，平均输出功率随着吸收泵浦功率的增加而增大。在脉冲重复频率为 4 kHz 的情况下，当吸收的泵浦功率从 4.5 W 增加到 7 W，则考虑自发辐射时的平均输出功率从 118 mW 增加到 871 mW，不考虑自发辐射时的平均输出功率从 250 mW 增加到 897 mW。我们可以看出，在较低的吸收泵浦功率下，考虑自发辐射时的平均输出功率较低；在较高的吸收泵浦功率下，自发辐射对平均输出功率的影响很小。无论是否考虑自发辐射，都在脉冲重复频率为 4 kHz 时有较高的斜率效率。

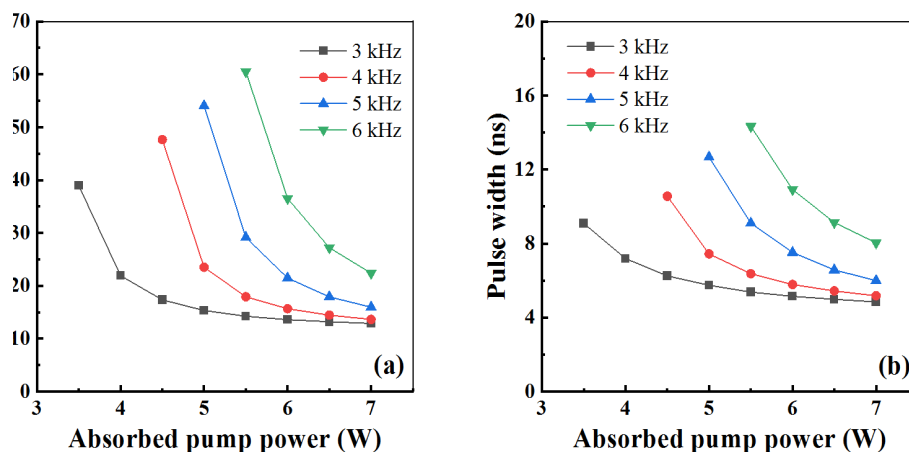


Figure 4. Variations of pulse width with absorbed pump power for different pulse repetition frequencies when (a) considering and (b) not considering spontaneous radiation

图 4. (a)考虑和(b)不考虑自发辐射时, 不同脉冲重复频率下脉冲宽度随吸收泵浦功率的变化关系

图 4 为在不同脉冲重复频率下, 考虑与不考虑自发辐射时, 脉冲宽度与吸收泵浦功率的变化关系。在同一脉冲重复频率下, 脉冲宽度随着吸收泵浦功率的增加而变窄; 在相同的吸收泵浦功率下, 脉冲宽度随着脉冲重复频率的增大而展宽。在脉冲重复频率为 4 kHz 时, 当吸收的泵浦功率从 4.5 W 增加到 7 W 的情况下, 考虑自发辐射时的脉冲宽度从 47 ns 降低到 14 ns, 不考虑自发辐射时脉冲宽度则从 10.6 ns 降低到 5.2 ns。相比于不考虑自发辐射的情况, 考虑自发辐射时的脉冲宽度有明显的展宽。

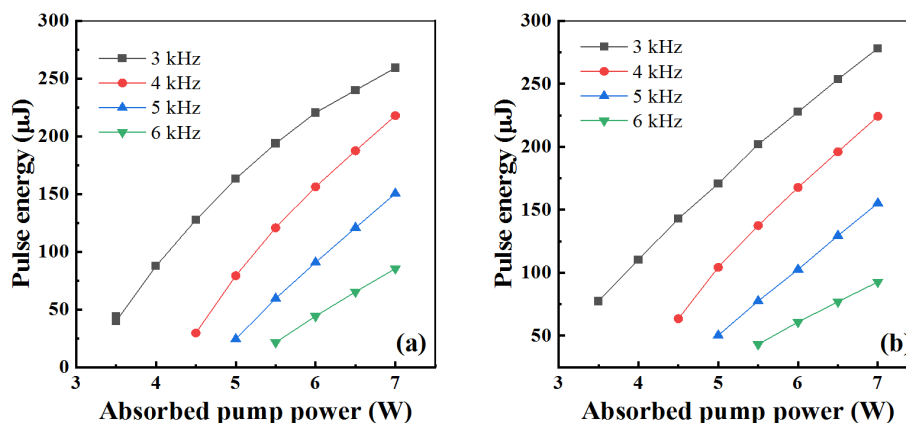


Figure 5. Variations of pulse energy with absorbed pump power for different pulse repetition frequencies when (a) considering and (b) not considering spontaneous radiation

图 5. (a)考虑和(b)不考虑自发辐射时, 不同脉冲重复频率下脉冲能量随吸收泵浦功率的变化关系

在不同脉冲重复频率下, 考虑和考虑自发辐射时, 脉冲能量与吸收泵浦功率的变化关系, 如图 5 所示。在同一脉冲重复频率下, 脉冲能量随吸收泵浦功率的增大而增加; 在相同的吸收泵浦功率下, 脉冲能量随着脉冲重复频率的增大而减小。在脉冲重复频率为 3 kHz 时, 当吸收的泵浦功率从 3.5 W 增加到 7 W, 考虑自发辐射时的脉冲能量从 39.8 μJ 增加到 259 μJ , 不考虑自发辐射时的脉冲能量从 77.4 μJ 增加到 278 μJ 。我们可以看出, 自发辐射在较低吸收泵浦功率下对脉冲能量有一定的影响, 在较高吸收泵浦功率下对脉冲能量影响很小。

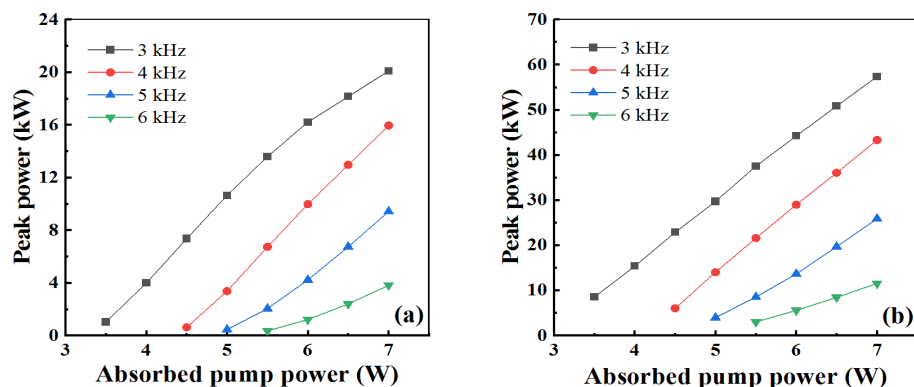


Figure 6. Variations of peak power with absorbed pump power for different pulse repetition frequencies when (a) considering and (b) not considering spontaneous radiation

图 6. (a)考虑和(b)不考虑自发辐射时, 不同脉冲重复频率下峰值功率随吸收泵浦功率的变化关系

在脉冲重复频率分别为 3 kHz、4 kHz、5 kHz 和 6 kHz 时, 考虑与不考虑自发辐射的情况下, 峰值功率与吸收泵浦功率的变化关系如图 6 所示。在同一脉冲重复频率下, 峰值功率随着吸收的泵浦功率的增加而增加; 在相同的吸收泵浦功率下, 峰值功率随着脉冲重复频率的增加而减小。在脉冲重复频率为 3 kHz 的情况下, 当吸收的泵浦功率从 3.5 W 增加到 7 W, 考虑自发辐射时相应的峰值功率从 1 kW 增加到 20.1 kW, 不考虑自发辐射时的峰值功率从 8.5 kW 增加到 57.4 kW。与不考虑自发辐射的情况相比, 考虑自发辐射时拉曼激光器的峰值功率明显变小。

4. 结论

建立了考虑自发辐射的 Ho:YAG/SrWO₄ 主动调 Q 内腔式拉曼激光器的速率方程模型, 并对其进行了数值模拟, 得到了在不同脉冲重复频率下, 自发辐射对拉曼激光器输出特性的影响。从模拟结果可以看出, 在较低的吸收泵浦功率下, 自发辐射对拉曼激光器的平均输出功率和脉冲能量有一定的影响; 在较高的吸收泵浦功率下, 自发辐射对平均输出功率和脉冲能量几乎没有影响。然而, 自发辐射对拉曼激光器的脉冲宽度和峰值功率始终都有较大的影响, 使脉宽展宽, 峰值功率减小。

基金项目

国家自然科学基金(61775166, 61275138), 天津自然科学基金(19JCZDJC32600), 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)。

参考文献

- [1] Serebryakov, V., Boiko, É., Kalintsev, A., Kornev, A., Narivonchik, A. and Pavlova, A. (2015) Mid-IR Laser for High-precision Surgery. *Journal of Optical Technology*, **82**, 781. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000781>
- [2] Gaimard, Q., Triki, M., Ba, T.N., Cerutti, L., Boissier, G., Teissier, R., Baranov, A., Rouillard, Y. and Vicet, A. (2015) Distributed Feedback GaSb Based Laser Diodes with Buried Grating: A New Field of Single-Frequency Sources from 2 to 3 μm for Gas Sensing Applications. *Optics Express*, **23**, 19118-19128. <https://doi.org/10.1364/OE.23.019118>
- [3] Sheintop, U., Sebbag, D., Komm, P., Pearl, S., Marcus, G. and Noach, S. (2019) Two-Wavelength Tm:YLF/KGW External-Cavity Raman Laser at 2197 nm and 2263 nm. *Optics Express*, **27**, 17112-17121. <https://doi.org/10.1364/OE.27.017112>
- [4] Casula, R., Penttinen, J.-P., Guina, M., Kemp, A.J. and Hastie, J.E. (2018) Cascaded Crystalline Raman Lasers for Extended Wavelength Coverage: Continuous-Wave, Third-Stokes Operation. *Optica*, **5**, 1406-1413. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001406>
- [5] Franka, M., Smetanin, S.N., Jelínek, M., Vyhlídal, D., Shukshin, V.E., Ivleva, L.I., Zverev, P.G. and Kubeček, V.

- (2019) Efficient Synchronously-Pumped All-Solid-State Raman Laser at 1178 and 1227 nm on Stretching and Bending Anionic Group Vibrations in a SrWO₄ Crystal with Pulse Shortening Down to 1.4 ps. *Optics & Laser Technology*, **119**, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105660>
- [6] Li, Z.G., Xiong, Z.J., Moore, N., Lim, G.C., Huang, W.L. and Huang, D.X. (2004) Amplified-Spontaneous-Emission Effects in a Passively Q-Switched Diode-Pumped Nd:YVO₄ Laser. *Journal of the Optical Society of America*, **21**, 1479-1485. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.21.001479>
- [7] Zhang, W., Wang, Y., Lia, J.F., Zhu, Z.J., You, Z.Y. and Tu, C.Y. (2018) Spectroscopic Properties and Rate Equation Model of Er Doped BaLaGa₃O₇ Crystals. *Materials Research Bulletin*, **106**, 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.06.011>
- [8] Alsous, M.B., Almetaeb, K. and Alnezami, M. (2015) Modeling of Flash-Pumped Passively Q-Switched Solid State Lasers. *Journal of Optics*, **44**, 159-163. <https://doi.org/10.1007/s12596-015-0241-1>
- [9] Ding, S.H., Zhangm, X.Y., Wang, Q.P., Chang, J., Wang, S.M. and Liu, Y.R. (2007) Modeling of Actively Q-Switched Intracavity Raman Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **43**, 722-729. <https://doi.org/10.1109/JQE.2007.901585>
- [10] Liu, Y., Sheng, Q., Zhong, K., Shi, W., Ding, X., Qiao, H.Z., Liu, K.F., Ma, H.C., Li, R., Xu, D.G. and Yao, J.Q. (2019) Dual-Wavelength Intracavity Raman Laser Driven by a Coaxially Pumped Dual-Crystal Fundamental Laser. *Optics Express*, **27**, 27797-27806. <https://doi.org/10.1364/OE.27.027797>
- [11] Yan, R., Yu, X., Li, X., Chen, D. and Yu, J. (2012) Theoretical and Experimental Investigation of Actively Q-Switched Nd:YAG 946 nm Laser with Considering ETU Effects. *Applied Physics B*, **108**, 591-596. <https://doi.org/10.1007/s00340-012-5110-x>
- [12] Chen, Y.F., Lan, Y.P. and Wang, S.C. (2002) Modeling of Diode-End-Pumped Q-Switched Solid-State Lasers: Influence of Energy-Transfer Upconversion. *Journal of the Optical Society of America B*, **19**, 1558-1563. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.001558>
- [13] Zhang, X.Y., Zhao, S.Z., Wang, Q.P., Ozygus, B. and Weber, H. (2000) Modeling of Diode-Pumped Actively Q-Switched Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **35**, 1912-1918. <https://doi.org/10.1109/3.806608>
- [14] Pask, H.M. (2003) The Design and Operation of Solid-State Raman Lasers. *Progress in Quantum Electronics*, **27**, 3-56. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(02\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(02)00017-4)