

主动调 Q 腔内和频拉曼激光器的数值模拟

于学丽¹, 丁双红¹, 贾海旭², 辛磊³

- (1. 烟台大学 光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005;
2. 北京东方锐镭科技有限公司, 北京 100015;
3. 烟台大学文经学院 信息工程系, 山东 烟台 264005)

摘要: 推导了 LD 泵浦主动调 Q 腔内和频拉曼激光器的归一化速率方程组, 由实际的实验参数确定了方程组中七个综合参量的合理取值范围, 然后用数值模拟的方法得到各个综合参量的大小对于和频光的脉冲峰值功率、单脉冲能量和脉冲宽度的影响, 分析发现归一化和频因子 F 和归一化拉曼增益系数 M 之间能够相互匹配, 通过数值拟合得到 F 和 M 在不同归一化反转粒子数密度 N 下的匹配方程, 由此得出 F 和 M 的匹配值呈线性关系, 应用此线性方程可以指导实验中参数的优化, 使激光器获得更大的和频转换效率。最后利用拟合的结论对报道的实验进行计算和分析并给出优化措施。

关键词: 和频; 主动调 Q; 拉曼激光器; 速率方程; 数值模拟

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906001

Numerical simulation of actively Q-switched intracavity sum-frequency Raman laser

Yu Xueli¹, Ding Shuanghong¹, Jia Haixu², Xin Lei³

- (1. School of Photo-Electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai 264005, China;
2. Beijing Oriental Sharp Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100015, China;
3. Information Engineering Department, Wenjing College, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The normalized rate equations of the LD pumped actively Q-switched intracavity sum-frequency Raman laser were deduced, and the reasonable value scope of seven comprehensive factors of the rate equations was estimated respectively according to the parameters of typical experimental setups. The influences of the comprehensive factors on the laser output peak power, single pulse energy and pulse width were researched by the numerical simulation of the actively Q-switched intracavity sum-frequency Raman laser. It was found that there was a matching relation between the normalized sum-frequency factor F and the normalized Raman gain coefficient M , and the matching equations and curves of F and M at different inversion population density N were obtained by making use of the method of numerical fitting, the result demonstrates that the matching values of F and M are basically linearly related, which can be employed to guide the optimization of parameters of the length of Raman medium

收稿日期: 2017-01-11; 修订日期: 2017-02-15

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014FM021)

作者简介: 于学丽(1992-), 女, 硕士生, 主要从事固体拉曼激光器等方面的研究。Email: yuxueli6@163.com

导师简介: 丁双红(1970-), 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光物理及技术等方面的研究。Email: shding@ytu.edu.cn

and sum-frequency crystal in the experiment to accomplish the high efficient sum-frequency laser. Finally, the results are used to calculate and analyze the reported experiment to optimize the parameters of setups to gain higher output power and more efficient laser.

Key words: sum-frequency; actively Q-switched; Raman laser; rate equations; numerical simulation

0 引言

560~600 nm 波长范围内的黄光在生物遗传、医学治疗、气体探测、信息存储等诸多领域中有着重要应用,其中 560 nm 黄绿光已经应用于临床对于皮肤的治疗。利用受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 这一有效变频的非线性光学方法,把泵浦掺钕晶体得到的 1 064 nm 基频光转换为 1 180 nm 的拉曼光,然后在腔内将基频光和拉曼光进行和频得到 560 nm 黄光激光的输出方法是目前获得黄光的有效途径^[1]。腔内和频拉曼黄光激光器具有转换效率高、结构较为紧凑、性能稳定等优点。其输出的和频光充分利用了腔内两种光高的功率密度,故和频光具有脉宽窄,能量高的特点。这些优势使得和频拉曼黄光激光器得到了广泛的关注,在近年来取得了较大的进展^[2-4]。由于应用主动调 Q 的方式,输出和频光脉冲峰值功率更大,所以近几年来,关于主动调 Q 腔内和频拉曼激光器的实验进展不断被报道^[5-8]。2008 年,澳大利亚的 H. M. Pask 报道了一个主动调 Q 腔内和频拉曼黄光激光器,Nd:YAG 和 KGW 分别作为激光晶体和拉曼晶体,输出了功率达 770 mW 的 559 nm 的黄光激光^[4]。2010 年,A. Kananovich 等以 Nd:YVO₄ 为自拉曼晶体,采用 LBO 腔内和频的方式,得到 559 nm 准连续黄光输出功率为 470 mW,光光转换效率为 2.1%^[5]。2013 年,Du Chenlin 等成功实现了内腔式和频主动调 Q YVO₄-Nd:YVO₄-YVO₄ 自拉曼黄光激光器,输出黄光功率为 3.55 W,相应转换效率为 11%^[6]。2015 年,苏富芳研究了主动调 Q 内腔式和频 Nd:YVO₄ 自拉曼激光器,得到 0.9 W 的 560 nm 黄绿光,其相应转换效率为 6.6%^[3]。

速率方程理论是激光器量子理论的一种简化形式,简明而有效的理论使其成为研究拉曼激光器较为普遍的方法^[9-13]。2007 年,David J Spence 等人数值模拟了腔内连续拉曼激光器,得到的模型显示激光器的输出性能可以描述为两个耦合参数的函数,

并且可以通过增加耦合参数来实现激光器效率的增强^[10]。2015 年,李述涛等人推导研究了连续倍频拉曼激光器的速率方程组,并由此计算出描述激光器的理论模拟曲线^[12]。2016 年,皇甫军强等推导出了被动调 Q 腔内和频拉曼激光器归一化速率方程组,分析了方程组中各综合参量的变化对于和频光峰值功率、单脉冲能量以及脉冲宽度的影响^[13]。

目前对于主动调 Q 腔内和频拉曼激光器的研究仅限于具体实验进展的报道,还未有对其理论的研究报道。文中应用速率方程组理论,推导了主动调 Q 腔内和频拉曼激光器归一化方程组并分析了其输出特性。

1 主动调 Q 腔内和频拉曼激光器速率方程组的构建

1.1 主动调 Q 腔内和频拉曼激光器归一化速率方程组的推导

在三波混频耦合波方程组的基础上得到了和频光光子数随时间的变化,并把它定义为一个和频项。由参考文献[13]可知,和频项为:

$$\frac{\phi_F}{t_r/2} = \frac{2K_N}{t_r} \frac{I_F^2 \omega_L \omega_S}{\omega_F} \phi_L(r, t) \phi_S(r, t) \quad (1)$$

其中

$$K_N = \frac{2\pi h d_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 n_L n_S n_F \lambda_F^2} \quad (2)$$

式中: $\omega_{L,S,F}$, $\phi_{L,S,F}$, $n_{L,S,F}$ 分别为基频光、拉曼光与和频光的角频率,光子数密度和在和频晶体中的折射率; d_{eff} 为和频晶体的有效非线性系数; λ_F 为和频光的波长; t_r 为和频晶体的长度; t_r 为激光在谐振腔内往返一周所用的时间; h 为普朗克常数, ϵ_0 为真空介电常数。

将和频项代入参考文献[9]主动调 Q 拉曼激光器的速率方程组中,再根据参考文献[14]对方程的计算方法,对其进行类似处理。为了方便研究激光器的各个具体参数的变化与其输出性能的关系,对方程组进行归一化,引入归一化时间 τ ,激光光轴处归

一化基频光光子数密度 $\Phi_L(0, \tau)$, 光轴处归一化拉曼光光子数密度 $\Phi_S(0, \tau)$ 和光轴处归一化初始反转粒子数密度 N :

$$\Phi_L(0, \tau) = \phi_{LL}(0, t) \frac{2\gamma_L \sigma l_c}{\ln(1/R_L) + L_L} \quad (3)$$

$$\Phi_S(0, \tau) = \phi_{SR}(0, t) \frac{2\gamma_L \sigma l_c}{\ln(1/R_L) + L_L} \quad (4)$$

$$N = \frac{n(0, 0)}{n_{th}(0, 0)} \quad (5)$$

将公式(3)~(5)代入到方程组中, 然后整理后的归一化的速率方程组为:

$$\frac{d\Phi_L(0, \tau)}{d\tau} = \Phi_L(0, \tau)N(0, 0) \int_0^1 \exp\{-A(\tau)x^\beta\} dx - M\Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau) - \Phi_L(0, \tau) - F\Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau) \quad (6)$$

$$\frac{d\Phi_S(0, \tau)}{d\tau} = M\Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau)k_{is}^2 - K\Phi_S(0, \tau) + K_{sp}\Phi_L(0, \tau)k_{is}^2 - Fk_{is}^2\Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau) \quad (7)$$

其中

$$x = \exp\left[-2r^2\left(\frac{1}{w_{LL}^2} + \frac{1}{w_p^2}\right)\right], A = \int_0^\tau \Phi_L(0, \tau) d\tau, \beta = \frac{1}{1 + w_{LL}^2/w_p^2}, K = \frac{\ln(1/R_S) + L_S}{\ln(1/R_L) + L_L}, K_{sp} = k_{sp} \frac{t_r}{[\ln(1/R_L) + L_L]}, F = \frac{K_N I_F \omega_L \omega_S}{2\gamma_L \sigma l_c \omega_F} \frac{w_{SR}^2}{w_{LF}^2 + w_{SF}^2}, M = \frac{ghv_R c l_R}{\gamma_L \sigma l_c} \frac{1}{1 + k_{is}^2}, k_{is} = \frac{w_{LR}}{w_{SR}} \quad (8)$$

公式(6)~(7)表示光轴处归一化的基频光光子数密度和拉曼光的光子数密度随归一化时间变化的规律。其中 $k_{is} = w_{LL}/w_{SR}$; M 为归一化的拉曼增益系数; K_{sp} 为归一化自发拉曼散射系数; F 为归一化和频因子; K 为拉曼光和基频光的损耗比; N 为光轴处基频光初始反转粒子数密度和其阈值的比值; $n_{th}(0, 0)$ 为激光光轴处基频光反转粒子数密度的阈值大小; $\phi_{LL}(r, t)$ 为激光介质中基频光光子数密度; $\phi_{SR}(r, t)$ 为拉曼晶体中拉曼光光子数密度; $n(r, t)$ 为腔内反转粒子数密度的分布; l_R 为拉曼晶体的长度; v_R 为拉曼光的频率; γ_L 和 σ 分别为激光介质的反转因子和受激发射截面面积; g 和 k_{sp} 分别为拉曼晶体的拉曼增益系数和自拉曼散射系数; R_L 和 R_S 分别为输出镜对基频光和对拉曼光的反射率; L_L 与 L_S 分别为腔内基频光和拉曼光的固有损耗; $w_{LL, LR, LF}$ 分别代表基频光在激光介质、拉曼晶体及和频晶体中的光束半径; $w_{SR, SF}$

为拉曼光在拉曼晶体及在和频介质中的光束半径。

1.2 和频光脉冲的输出特性的参量表示

由参考文献[13]中对激光输出特性的计算方法, 可以得到和频光输出的脉冲峰值功率表达为:

$$P_{Fmax} = \frac{\pi w_{LL}^2 chv_F}{8\gamma_L \sigma l_c} [\ln(1/R_L) + L_L]^2 \times \frac{w_{LF}^2 + w_{SF}^2}{w_{LF}^2} F[\Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau)]_{max} \quad (9)$$

和频光的单脉冲能量表达为:

$$E_F = \frac{\pi w_{LL}^2 hv_F}{4\gamma_L \sigma} [\ln(1/R_L) + L_L]^2 \times \frac{w_{LF}^2 + w_{SF}^2}{w_{LF}^2} F \int \Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau) d\tau \quad (10)$$

用 $\Delta\tau$ 表示激光脉冲宽度, 即光子数密度从最大值的一半上升到最大值的时间与从最大值下降到最大值一半的时间之和。

为了方便分析, 令

$$\Phi_{Fmax} = F[\Phi_L(0, \tau_m)\Phi_S(0, \tau_m)]_{max} \quad (11)$$

$$\Phi_{Finteg} = F \int \Phi_L(0, \tau)\Phi_S(0, \tau) d\tau \quad (12)$$

经过简化, 用 Φ_{Fmax} 、 Φ_{Finteg} 和 $\Delta\tau$ 分别表示和频光的脉冲峰值功率, 单脉冲能量以及脉冲宽度的大小。

2 主动调 Q 腔内和频拉曼激光器输出性能的数值模拟及分析

2.1 归一化综合参量的合理取值范围

为了简化运算, 在计算过程中, 令 $k_{is} = 1, \beta = 0.5$, 即基频光光束与泵浦光完全耦合匹配, 并由典型的实验装置参数和常用晶体的参数估算归一化参量的合理取值范围。表 1 即为得到的各个归一化参量的合理取值范围。

表 1 各归一化综合参量的合理取值范围

Tab.1 Reasonable value scope of normalized comprehensive parameters

Comprehensive parameter	Reasonable value scope
K_{sp}	$6 \times 10^{-14} - 6 \times 10^{-13}$
N	3-30
K	5-18
M	5-75
F	2-90

2.2 综合参量的变化对于和频脉冲输出性能的影响

为了使计算简便,在以下的模拟计算中,令 $K_{sp}=9 \times 10^{-14}$ 。

图 1 表示在 $M=24, K=6$ 时,图(a)中 Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 随 F 的变化,每组线从上到下 N 取值依次为 8, 7.5, 7, 6.5, 6;图(b)中 $\Delta\tau$ 随 F 的变化,从左往右 N 取值依次为 6, 6.5, 7, 7.5, 8。

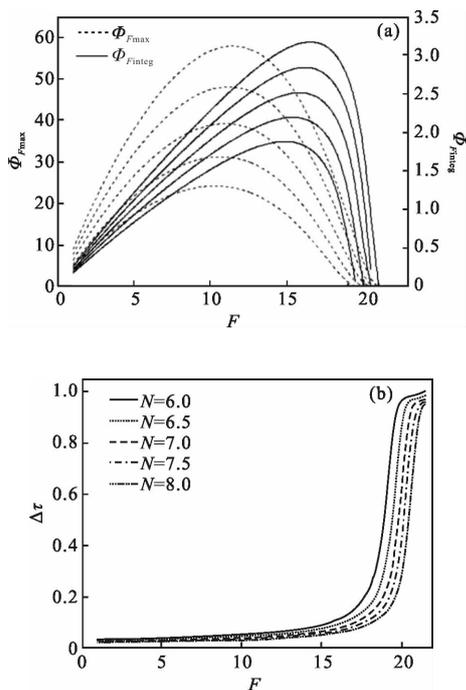


图 1 在 $M=24, K=6$ 时, (a) Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 随 F 的变化, 每组线 N 的取值从上到下依次为 8, 7.5, 7, 6.5, 6; (b) $\Delta\tau$ 随 F 的变化, 从左往右 N 取值依次为 6, 6.5, 7, 7.5, 8

Fig.1 With $M=24, K=6$, (a) Φ_{Fmax} and Φ_{Finteg} versus F , for each group of lines, N equals 8, 7.5, 7, 6.5, 6 from top to bottom; (b) $\Delta\tau$ versus F , N equals 6, 6.5, 7, 7.5, 8 from left to right

由图 1 知, Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 在 F 较小时随 F 的增加而增长, 直至到达峰值后又快速减小, N 值越大, Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 的峰值越大, 且对于不同的 N , Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 取峰值时对应的 F 不同, Φ_{Fmax} 取峰值时 F 约为 10~12。而 F 在 15~17 的范围内, Φ_{Finteg} 取得峰值。而 $\Delta\tau$ 先随 F 的增加保持较小幅度地上升, 当 F 到达特定值时, $\Delta\tau$ 快速增长。

在 F 较小时, 随着 F 的增长, 基频光光子与拉曼光光子不断合成和频光光子, 故产生的和频光光子数随着 F 的上升会较快的升高, 然而当 F 升高到

一定值后, 较高的和频效率会消耗大量的基频光光子与拉曼光光子, 且拉曼效应也会消耗一定数量的基频光光子, 基频光光子的大量消耗会影响反转粒子向基频光光子的转换, 也会降低拉曼光光子的生成效率, 进一步影响了和频作用的进行, 所以说当 F 值太大时, Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 的值会不断减小。另一方面, N 取值的大小代表了激光器的反转粒子数密度的大小, N 变大, 则产生的基频光光子数目更多, 和频光光子数也会增多, 相应的和频效率增加。从以上分析中可看出, 尽管 F 作为和频因子, 但并不是 F 越大, 输出的和频光能量和功率就越大, F 应当有一个最优取值。

如图 2 所示, 在 $F=15, K=6$ 时, 图(a)中 Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 随 M 的变化, 每组线从上到下 N 依次为 8, 7.5, 7, 6.5, 6; 图(b)中 $\Delta\tau$ 随 M 的变化, 从左到右 N 取值依次为 8, 7.5, 7, 6.5, 6。

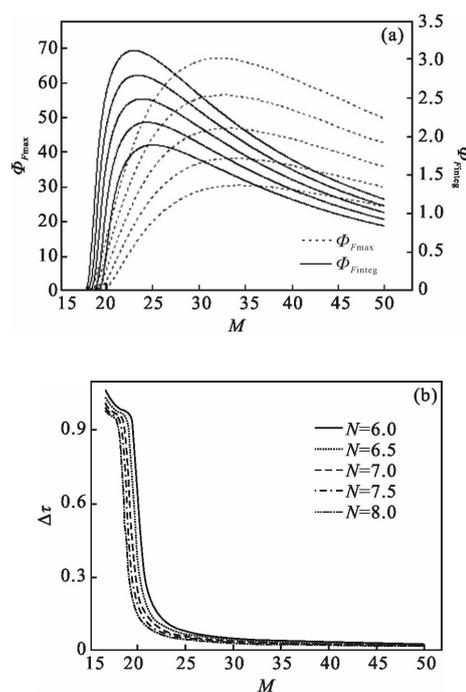


图 2 在 $F=15, K=6$ 时, (a) Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 随 M 的变化, 每组线从上到下 N 取值依次为 8, 7.5, 7, 6.5, 6; (b) $\Delta\tau$ 随 M 的变化, 从左到右 N 取值依次为 8, 7.5, 7, 6.5, 6

Fig.2 With $F=15, K=6$, (a) Φ_{Fmax} and Φ_{Finteg} versus M , for each group of lines, N equals 8, 7.5, 7, 6.5, 6 from top to bottom; (b) $\Delta\tau$ versus F , N equals 8, 7.5, 7, 6.5, 6 from left to right

从图 2 中看到, Φ_{Fmax} 和 Φ_{Finteg} 在 M 较小时的取

值非常小,然后随着 M 的升高快速增长,到达峰值后,又随着 M 的增加较为缓慢地下降。 N 越大, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 达到的峰值越大,并且在模拟曲线中,其峰值对应的 M 大小不同, $\Phi_{F_{max}}$ 取峰值的位置在 $M=30$ 附近。而在 $M=22$ 左右时, $\Phi_{F_{integ}}$ 取得峰值。 $\Delta\tau$ 在 M 较小时减小得较慢,当 M 增长到某一值后, $\Delta\tau$ 快速下降,直至下降到一定程度后趋于平稳。

M 是归一化的拉曼增益系数,当 M 值较小时,拉曼作用不能高效地发生,在一定范围内,随着 M 值的增加,拉曼作用会逐渐增强,也会使和频效率逐渐增加;当 M 达到某个值时,出现较大拉曼转换效率,和频光脉冲能量达到最大。之后 M 继续升高,拉曼光光子数增加,这必然要消耗更多的基频光光子,进一步影响了反转粒子向基频光光子的转换,使拉曼效应的效率降低,必然也会使和频效率降低。由此可见, M 应当有一个最优化的取值。

从图 2 看到, N 越大, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 的峰值越大。 N 的取值与输入泵浦功率成正比关系,在特定取值区间内,若泵浦功率越大,则和频作用效率越高。但是如果 N 值偏大,实际实验中产生的热效应会使谐振腔的稳定性变得很差。并且,还会出现光波的多脉冲,和频过程的也会受到一定的影响。

图 3 表示在 $N=6, K=6$ 时,图(a)中 $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 随 F 的变化,每组线从左到右 M 取值依次为 20, 24, 28, 32, 36;图(b)中 $\Delta\tau$ 随 F 的变化,从左到右 M 依次为 20, 24, 28, 32, 36。

如上图所示,当 F 较小时, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 随 F 的增加而快速增长,直至达到峰值后又快速减小,且 M 越大, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 的最大值越高,相应的 F 值也会越大。 $\Delta\tau$ 在 F 较小时十分缓慢地上升,当 F 增加一定程度后,迅速升高,且 M 值越大,快速增长时对应的 F 越大。

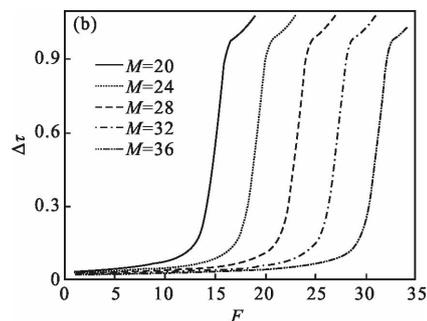
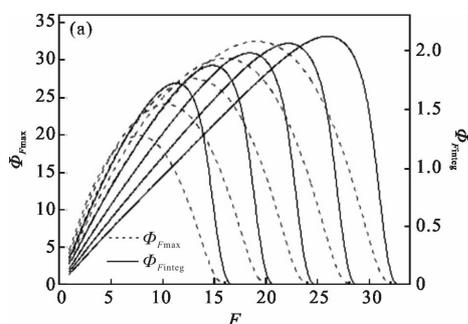


图 3 在 $N=6, K=6$ 时, (a) $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 随 F 的变化, 每组线从左到右 M 取值依次为 20, 24, 28, 32, 36; (b) $\Delta\tau$ 随 F 的变化, 从左到右 M 取值依次为 20, 24, 28, 32, 36
Fig.3 With $N=6, K=6$, (a) $\Phi_{F_{max}}$ and $\Phi_{F_{integ}}$ versus F , for each group of lines, M equals 20, 24, 28, 32, 36 from left to right; (b) $\Delta\tau$ versus F , M equals 20, 24, 28, 32, 36 from left to right

从理论上讲,在基频光光子数和拉曼光光子数十分充足的条件下, F 值越大,和频作的效率越高, M 值越大,拉曼转换效率会越高。但是考虑到 M 值增加到一定值后,高的拉曼转换效率会影响到反转粒子向基频光光子的转换,基频光生成的效率降低,拉曼转换效率也会由此降低,从而会使和频的效率降低。另一方面,和频效率太高会阻碍受激拉曼散射效应的进行,使拉曼转换效率降低,进而使和频效率降低。即和频过程与拉曼转换之间存在动态的相互制衡, F 和 M 值之间应该有相互匹配的最佳取值。

图 4 为在 $M=24, N=6$ 时,图(a)中 $\Phi_{F_{max}}$ 、 $\Phi_{F_{integ}}$ 随 F 的变化,每组线从上到下 K 取值依次为 2, 6, 10, 14, 18;图(b)中 $\Delta\tau$ 随 F 的变化,从左到右 K 取值依次为 18, 14, 10, 6, 2。

由图 4 知,当 F 较小时, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 的值随 F 的增加而上升,当到达峰值后就迅速下降。且 K 越小, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 的峰值越大,其峰值对应的 F 值也会更大。并且, $\Phi_{F_{max}}$ 取最大值时, F 在 8~11 范围内, $\Phi_{F_{integ}}$ 取峰值时对应的 F 在 12~16 之间;在 F 较小时保持平稳,只有微小的上升幅度,但当 F 增加到某值后就快速上升, K 值越小,快速增长时对应的 F 就越大。

在 F 较小时,随着 F 增加,和频效率也不断增加,和频效率持续上升。但当 F 达到一定值后,和频效率开始下降, $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 也快速降低,这是因为高的和频效率消耗大量的基频光光子和拉曼光光

子,使得激光反转粒子向基频光的转换效率降低,同时受激拉曼散射的效率降低,进而使和频效率减小。另一方面, K 的定义是拉曼光和基频光损耗的比值, K 的取值越大,对应着激光腔内损耗越大,在其他参数条件确定时,这一般主要与输出耦合镜对拉曼光的反射率减小有关。反射率减小会使腔内的拉曼光相对减少,从而使和频效率降低,所以 $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 随 K 的增长而减小。从分析中看出, F 与 K 之间有相互匹配的最佳取值。

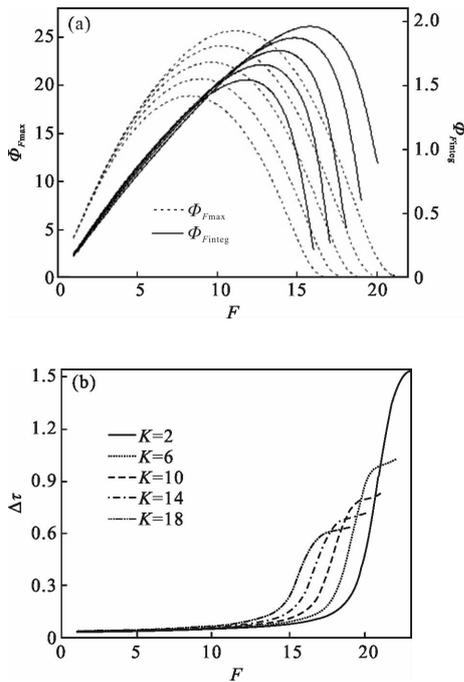


图 4 在 $M=24, N=6$ 时, (a) $\Phi_{F_{max}}, \Phi_{F_{integ}}$ 随 F 的变化, 每组线从上到下 K 取值依次为 2, 6, 10, 14, 18; (b) $\Delta\tau$ 随 F 的变化, 从左到右 K 取值依次为 18, 14, 10, 6, 2

Fig.4 With $M=24, N=6$, (a) $\Phi_{F_{max}}$ and $\Phi_{F_{integ}}$ versus F , for each group of lines, K equals 2, 6, 10, 14, 18 from top to bottom; (b) $\Delta\tau$ versus F , K equals 18, 14, 10, 6, 2 from left to right

2.3 F 和 M 的匹配关系

从对图 3 的分析知, 反转粒子向基频光的转换过程、拉曼过程以及和频过程之间存在动态的相互制衡, F 和 M 值之间会有相互匹配的最佳取值。

图 5 描述了主动调 Q 腔内和频拉曼激光器进行数值模拟时, 为了使 (a) $\Phi_{F_{max}}$ 与 (b) $\Phi_{F_{integ}}$ 达到最大, 当 $K=6$, 对一定 M 值, F 的最佳匹配值随 N 的变化, 每组线从上到下 N 分别为 30, 20, 14, 12, 10, 8, 6, 4。

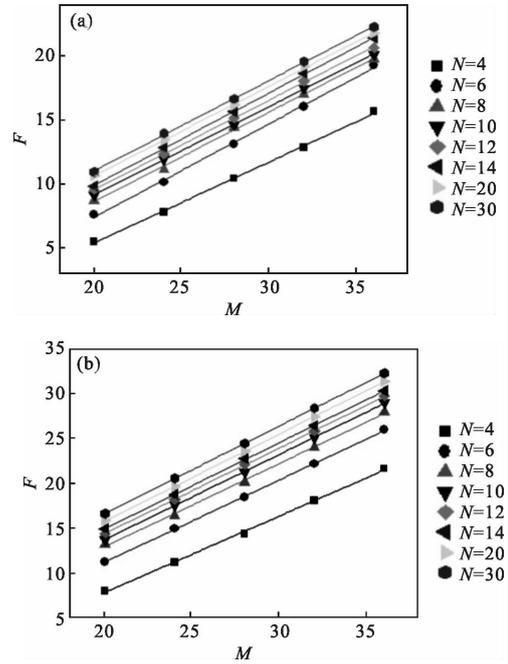


图 5 在 $K=6$ 时, 为了实现 (a) $\Phi_{F_{max}}$, (b) $\Phi_{F_{integ}}$ 最大, 对一定 M 值, F 的最佳匹配值随 N 的变化, 每组线从上到下 N 分别为 30, 20, 14, 12, 10, 8, 6, 4

Fig.5 In order to realize maximum value of (a) $\Phi_{F_{max}}$, (b) $\Phi_{F_{integ}}$ with $K=6$, for certain M , the optimal match value of F changes with N , for each group of lines, N is equal to 30, 20, 14, 12, 10, 8, 6, 4 from top to bottom

从图 5 中看出, 为了实现 $\Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 的最大, F 和 M 的匹配值基本呈线性关系。表 2 为在 $K=6, \Phi_{F_{max}}$ 和 $\Phi_{F_{integ}}$ 取最大值时, F 和 M 拟合的匹配直线方程。从表中可知, 当 $\Phi_{F_{max}}$ 取最大值时, 随着 N 值不断变大, F 和 M 匹配直线的斜率基本稳定在 0.7 左右, 在 Y 轴上的截距不断减小。而当 $\Phi_{F_{integ}}$ 取达到最大时, 随着 N 变大, 其匹配直线的斜率缓慢增加, 在 Y 轴上的截距不

表 2 F 和 M 匹配值的拟合方程

Tab.2 Fitted equations of matching values of F and M

	$\Phi_{F_{max}}$	$\Phi_{F_{integ}}$
$N=4$	$F=0.63M-7.12$	$F=0.85M-9.06$
$N=6$	$F=0.73M-7.07$	$F=0.91M-6.96$
$N=8$	$F=0.70M-5.25$	$F=0.93M-5.48$
$N=10$	$F=0.69M-4.53$	$F=0.95M-5.11$
$N=12$	$F=0.70M-4.33$	$F=0.95M-4.57$
$N=14$	$F=0.72M-4.44$	$F=0.96M-4.17$
$N=20$	$F=0.70M-3.25$	$F=0.97M-3.54$
$N=30$	$F=0.71M-3.02$	$F=0.98M-2.80$

断减小。综合来看,随着 N 值不断变大, F 和 M 的匹配关系逐渐趋于稳定。结合综合参量的定义式知,在其它条件确定的时, F 和 M 的匹配关系一般表现为拉曼晶体长度与和频晶体长度的匹配。

2.4 对于实验的理论分析

对参考文献[7]的实验应用本理论进行计算和分析。参考文献 [7] 中的实验是主动调 Q Nd:YAG/SrWO₄/KTP 拉曼和频黄绿光激光器,实验的最高和频光功率为 2.41 W,相应转换效率为 11.8%。忽略晶体的热效应,计算得到此激光器的 $M=21$, $F=26$,由于该实验中泵浦功率较高,估算其 N 值约在 20~30 之间,从图 5 的 F 和 M 的匹配曲线中知,此时并没有达到最佳的匹配, M 值偏小,若想达到最佳匹配的效果,对于最大输出功率, M 应在 40~42 之间;对于最大的脉冲能量, M 应在 29~31 之间。综合考虑具体的实验装置,若想提高和频转换效率,应该适度地增大 M 值到 30~40,在其他条件确定的情况下,一般要通过合理地增加拉曼晶体的长度或者压缩腔长来达到目的。

3 结 论

推导了主动调 Q 腔内和频拉曼激光器的归一化速率方程组,归纳得到七个综合参量 $k_s, \beta, K_p, N, M, F, K$ 。在具体实验参数的基础上估算了各个归一化参量的合理取值范围并对其进行数值模拟,主要是计算了归一化的反转粒子数密度 N ,归一化的拉曼增益系数 M ,归一化的和频因子 F 和拉曼光与基频光的损耗比 K 的变化对和频光脉冲峰值功率、单脉冲能量及脉冲宽度的影响。从计算曲线的分析中可知和频光的产生是激光反转粒子受激辐射跃迁过程、拉曼转换过程与和频过程的共同作用,三波能量合理分配才能得到最大的和频光效率。为实现和频光脉冲峰值功率和单脉冲能量的最大,对 F 和 M 的匹配值进行数值拟合分析,发现它们之间呈线性匹配关系,此结论可对实验进行数值分析来指导实验设置的优化。

参考文献:

- [1] Pask H M. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(1): 3-56.
- [2] Yuning Wang, Quan Zheng, Yi Yao, et al. Intracavity sum-frequency diode side-pumped all-solid-state generation yellow laser at 589 nm with an output power of 20.5 W[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(9): 1876-1880.
- [3] Su Fufang, Zhang Xingyu, Wang Weitao, et al. Diode-pumped intracavity yellow-green Raman laser at 560nm with sum-frequency-generation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 66(3): 122-124.
- [4] Pask H M, Mildren R P, Piper J A. Optical field dynamics in a wavelength-versatile, all-solid-state intracavity cascaded pulsed Raman laser[J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(2): 507-513.
- [5] Kananovich A, Demidovich A, Danailov M, et al. All-solid-state quasi-CW yellow laser with intracavity self-Raman conversion and sum frequency generation [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(8): 573.
- [6] Su Fufang, Zhang Xingyu, Wang Weitao, et al. High-efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/KTP Raman laser at 1 096 nm wavelength[J]. *Optics Communications*, 2013, 305(9): 201-203.
- [7] Zhang Huanian, Chen Xiaohan, Wang Qingpu, et al. Efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/SrWO₄ Raman laser operating at 1 252.4 nm [J]. *Optics Communications*, 2015, 335(1): 28-31.
- [8] Du Chenlin, Guo Yayin, Yu Yongqin, et al. High power Q-switched intracavity sum-frequency generation and self-Raman laser at 559 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47(4): 43-46.
- [9] Ding Shuanghong, Zhang Xingyu, Wang Qingpu, et al. Modeling of actively Q-switched intracavity raman lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(8): 722-729.
- [10] David J Spence, Peter Dekker, Helen M Pask. Modeling of continuous wave intracavity Raman lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 756-768.
- [11] Ding S, Wang P, Qing X, et al. Analysis of actively Q-switched intracavity frequency-doubled solid-state yellow Raman lasers[J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(4): 819-827.
- [12] Li Shutao, Dong Yuan, Jin Guangyong, et al. Normalized theoretical analysis of continuous-wave intracavity frequency-doubled Raman laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 71-75. (in Chinese)
- [13] Huangfu Junqiang, Jia Haixu, Yang Lili, et al. Rate equation theory of LD pumped passively Q-switched intracavity sum-frequency Raman laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606006. (in Chinese)
- [14] Liu Yongna. Theoretical and experimental study of LD pumped passively Q-switched intracavity frequency-doubled Raman yellow laser[D]. Yantai: Yantai University, 2012. (in Chinese)