

文章编号 1004-924X(2004)05-0459-06

激光二级管泵浦 KTP 腔内和频激光器及噪声特性的分析

檀慧明,高兰兰,吕彦飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130022)

摘要:给出了采用了激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 晶体产生 1064 nm 与 1342 nm 双谱线振荡的实验研究,通过 KTP 晶体 II 类相位匹配腔内和频产生输出波长为 593.5 nm 的橙黄色激光的实验。在不同泵浦功率下,测量和分析了该激光器的噪声特性。根据和频激光器输出的纵模结构测量结果与和频光耦合波方程,研究了和频激光器的噪声与参与和频的基频光纵模之间的关系。结果表明:对于激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体,KTP II 类位相匹配腔内和频激光器,如参与和频的 2 个波长中有一个波长为单纵模工作,尽管和频光输出为多个纵模,该激光器的输出仍为低噪声状态。如参与和频的 2 个波长全为多纵模,和频光输出为高噪声状态。在腔内和频过程中,虽然没有倍频过程中的和频引起模式竞争,但参与和频 2 个基频光的不同模式间的交叉和频和同一波长的不同模式间的增益饱和,也产生了与绿光问题类似的输出噪声和不稳定状态,但噪声特性要好于同类的腔内倍频激光器。

关键词:LD 泵浦;腔内和频;全固体;噪声特性

中图分类号:TN248.4 **文献标识码:**A

Noise characteristics of laser diode pumped solid-state laser by intracavity sum-frequency of KTP phase matching II

TAN Hui-ming, GAO Lan-lan, LUI Yan-fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: The laser diode pumped Nd:YVO₄ crystal and intracavity sum-frequency by KTP nonlinear crystal phase matching II to generate the orange-yellow laser of 593.5 nm from the wavelengths of 1064 nm and 1342 nm is presented. The noise characteristics of laser has been measured and analyzed in different pumping power. According to the longitudinal mode structure of sum-frequency output, which is measured by F-P scanning interferometer and coupled-wave equationship of sum-frequency generation, the relations between the noise of intracavity sum-frequency laser and the longitudinal mode structure of fundamental frequency has been researched. The results show that the output is low noise operating if the one of wavelengths in intracavity sum-frequency generation is single longitudinal mode in the sum-frequency laser with Nd:YVO₄ as gain materials and KTP phase matching II as sum frequency crystals. The cross sum-frequen-

收稿日期:2004-06-22;修订日期:2004-08-18.

基金项目:国家 863 计划资助(No. 2002AA311140)

cy generation between different modes of different wavelengths and gain saturation between different mode of the same wavelength cause noise and instability, which is the same as "green problems", but noise amplitude is lower than intracavity-doubled laser with the same crystals.

Key words: laser diode pump; intracavity sum-frequency generation; all-solid state; noise characteristics

1 引言

激光二极管作为泵浦光源的全固体激光器具有体积小,结构紧凑,效率高和光束质量好等优点,具有广泛的应用前景。通过腔内倍频、和频和差频等非线性光学混频效应,可高效率的获得不同于腔内振荡波长的激光输出。目前激光二极管泵浦腔内混频激光的主要应用是倍频激光器。已有大量的文章对激光二极管泵浦腔内倍频激光器的噪声特性进行了研究,并已获得了广泛的应用。

由于大多数激光晶体具有多个跃迁谱线,如果通过谐振腔参数的控制,在激光谐振腔内获得两个以上不同波长的激光谱线振荡,选择确定切割的非线性晶体在腔内和频,可高效的获得比激光振荡谱线短的和频激光波长输出。

腔内和频激光器的基础是腔内多波长的产生,从 90 年代初开始,有些作者已对各种掺钕激光晶体多波长振荡与输出的可能性进行了研究^[1-3],并从理论上给出了多波长振荡的条件^[4]。目前利用多波长在非线性晶体内和频产生新波长激光的研究主要是采用腔外和频^[5-6]或外腔和频^[7-8]方法,而腔内和频激光器的研究主要有 H. M. Kretschmann 等采用复合腔结构,对 Nd:YAP 的 1 080 nm 谱线与 Nd:YAG 的 1 444 nm 谱线腔内和频,获得了 618 nm 的接近红色的激光输出^[9]和 Yung-Fu Chen 等采用 3 镜谐振腔结构研究了激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 的 Q 开关脉冲激光器^[10],获得了 593 nm 橙黄色脉冲激光输出。

与腔内倍频激光器相比,腔内和频激光器的研究较少,尤其对腔内和频激光器噪声特性的研究还未见报道。本文研究了由激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 晶体产生 1 064 nm 与 1 342 nm 双谱线振荡,KTP 晶体 II 类相位匹配,腔内和频产生输出波长为 593.5 nm 的橙黄色激光及其噪声特性。根据和频光的纵模测量结果与和频过程的耦合波方程,分析了腔内参与和频的基频光的纵模

数量与激光器和频输出噪声特性的关系。

2 实验方案

激光二极管泵浦腔内和频激光器实验采用的装置如图 1 所示,其中激光二极管和圆化耦合系统与一般的激光二极管泵浦腔内倍频绿激光器类似。实验中采用了受激发射截面比较接近的 Nd:YVO₄ 的 1 064 nm 和 1 342 nm 的跃迁谱线。Nd:YVO₄ 的能级结构如图 2 所示,用于和频的 2 个跃迁谱线分别来自于⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2}和⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2}的能级之间。不同文章报道的 1 064 nm 与 1 342 nm 的发射截面有些不同,如考虑其分别是 25×10^{-19} 和 7.6×10^{-19} ,其两谱线的受激发射截面比约为 3.3^[3],获得的和频光的波长为 593.5 nm。

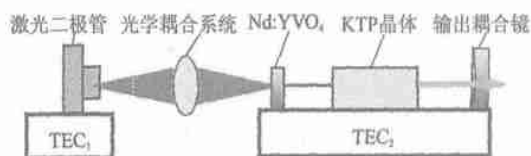


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

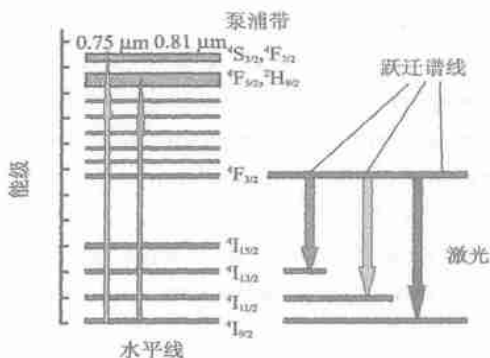


图 2 Nd:YVO₄ 的能级及跃迁图

Fig. 2 Energy level scheme of Nd:YVO₄

Nd:YVO₄ 的泵浦光入射面制备对 808 nm 增透, 1 064 nm 及 1 342 nm 高反的多层介质膜,并作为

一个腔镜。 Nd:YVO_4 的另一面制备对 1 064 nm 及 1 342 nm 减反膜。实验采用了 KTP II 类临界相位匹配非线性晶体。KTP 长度为 5 mm,两端制备 1 064 nm、1 342 nm 和 593.5 nm 的减反膜。输出耦合镜制备对 1 064 nm 和 1 342 nm 高反, 593.5 nm 减反的多层介质膜,保证谐振腔内基频光双波长振荡,和频光从耦合镜输出。激光二极管的发射波长为 808 nm 的椭圆泵浦光,经过园化后在 Nd:YVO_4 内的光斑尺寸约 80 μm ,与根据腔长计算的 1 342 nm 波长的基频光斑相近。

3 实验结果

图 3 是和频光输出功率随激光器工作电流的变化。图中正方形和圆形实心点分别是由高电流开始逐渐降低电流到没有信号输出和由低电流开始逐渐增加电流到最高 1.9 A 时,测量的和频光输出随激光器工作电流的变化。从图 3 中可以看出在激光器工作电流为 1.2 A 和 1.7 A 分别有 2 个回滞曲线,即从降电流和升电流到 1.2 A 或 1.7 A 可分别得到 2 个差别很大的输出功率值,出现明显的输出功率双稳态。为了验证该双稳态不是激光器的输出功率测量误差,改变激光器的工作电流,重复检测获得了类似的结果。图 3 中的正三角和负三角实心点的测量数据分别为激光器工作电流下降和上升时激光器输出功率的重复检测结果,可以看出其现象与首次测量相同,表明了该双稳态确实存在。

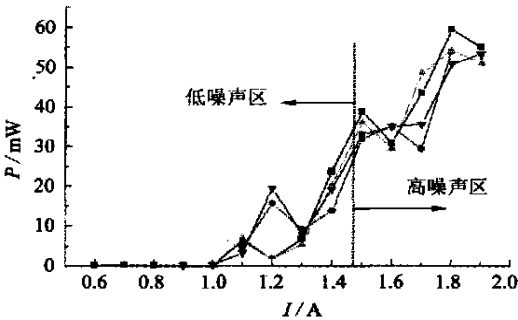
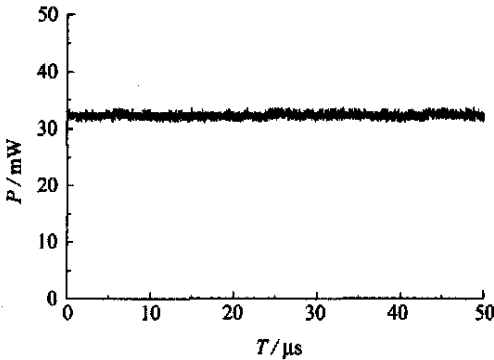


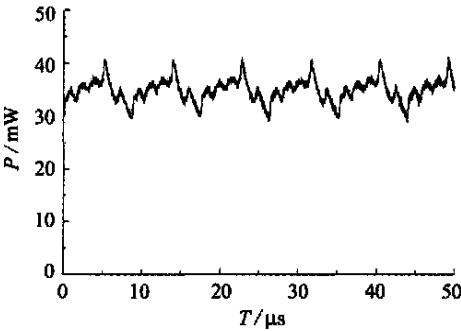
图 3 和频激光输出随工作电流变化

Fig. 3 Sum-frequency output vs operating current
测量中发现,随着工作电流的不同,激光器的

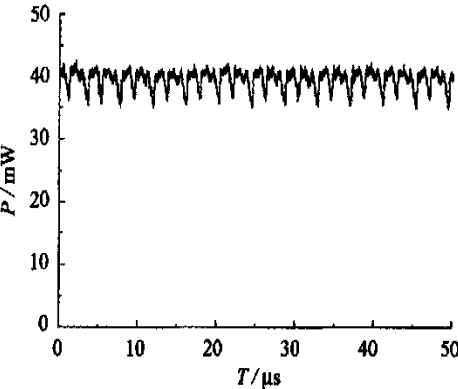
输出分为低噪声和高噪声 2 个区,如图 3 所示。当激光器的工作电流低于 1.5 A 时,输出为低噪声,高于 1.5 A 时,输出为高噪声。图 4(a), (b) 和(c)是工作电流分别为 1.4 A, 1.6 A 和 1.8 A 时采用高速示波器测量的输出高频噪声信号,图 5(a), (b) 和(c)是与图 4 对应时间阈值信号傅里叶变换的噪声频谱。



(a) 1.4 A



(b) 1.6 A



(c) 1.8 A

图 4 不同工作电流时输出噪声的时间信号

Fig. 4 Time trace of sum-frequency vs different operating current

在探测器前挡住激光输出信号,示波器的测量信号具有与图 4(a) 中当激光器工作电流为 1.4 A 时同样的起伏,表明图 4(a) 中的信号起伏主要是电噪声。从图 5(a) 的对应噪声频谱可以估计工作电流为 1.4 A 时激光器的输出噪声应低于 0.2 %。图 5(a) 中在 3.2 MHz 和 3.8 MHz 左右的 2 个噪声峰应是与图 4(a) 对应的测量系统的电噪声,观察当激光器工作电流为 1.6 A 和 1.8 A 时输出功率噪声频谱的图 5(b) 和(c),在同样的频率下也可以看到类似的电噪声峰,只是噪声幅度略有不同。当激光二极管的工作电流为 1.6 A 时,从图 4(b) 中的时间曲线可看到明显的噪声,同样从图 5(b) 中可看到,噪声的最大频率在

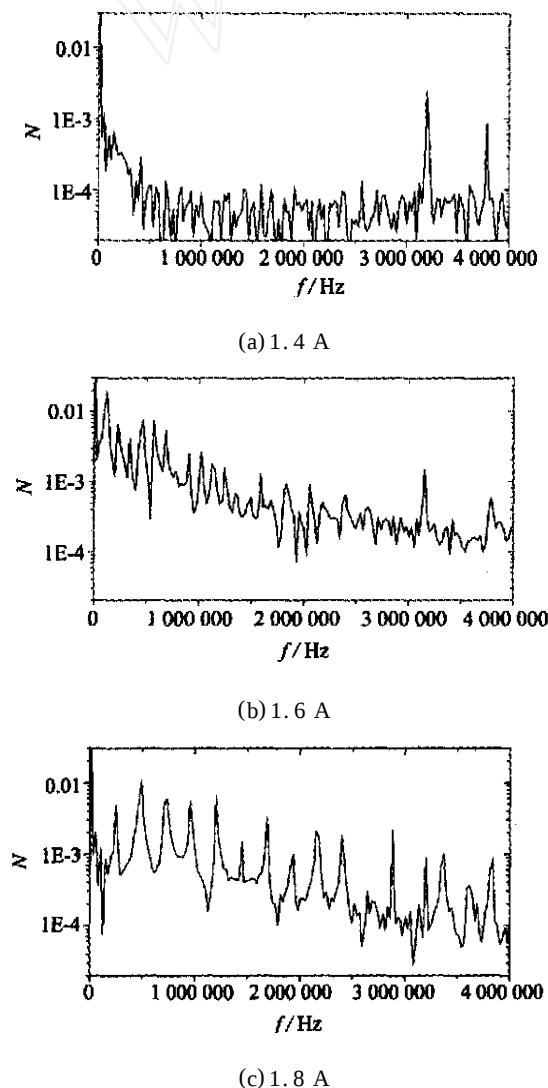


图 5 不同工作电流时输出噪声频谱

Fig. 5 Frequency spectrum of amplitude noise corresponding to Fig. 3

120 kHz 附近。从图 4(c) 和图 5(c) 的激光器工作电流为 1.8 A 时测量的噪声曲线及计算的频谱曲线可以看出,随着激光器工作电流的增加,激光器的噪声频率也增加,最大噪声的频率在 500 kHz 左右,噪声周期 $2 \mu\text{s}$, 低于类似倍频激光器噪声周期 $5.3 \mu\text{s}$ 的一半^[11]。但不论激光的工作电流如何,该激光器的噪声明显的低于文献[11]中类似的采用 Nd:YVO₄ 作为激光增益介质和 KTP 倍频晶体 II 类相位匹配的腔内倍频激光器的噪声。

4 分析讨论

为了分析腔内和频激光器噪声现象与谐振腔

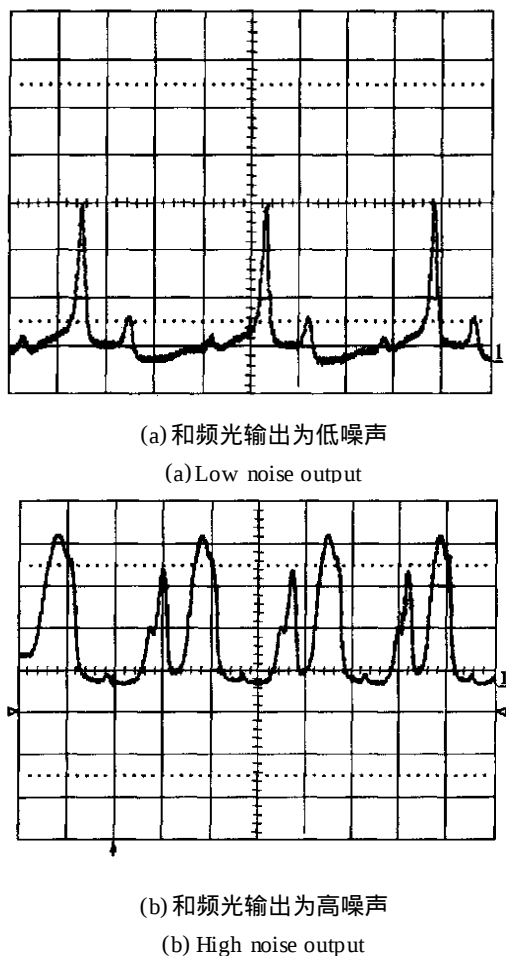


图 6 不同噪声时和频光的纵模

Fig. 6 Longitudinal mode of intracavity sum frequency by scanning Fabry-Perot

内振荡基频光纵模数量的关系,用扫描法-珀干涉仪分别在低噪声和高噪声时测量了和频激光输出的纵模结构。图 6(a)所示,在低噪声时和频光的输出有 3 个纵模,这与腔内倍频激光器不同。图 6(b)所示,在高噪声时和频光的输出有五个纵模。对于该测量结果可以用耦合波方程进行分析。

设谐振腔内有分别来自于激光增益介质 2 个不同跃迁谱线的波长 λ_1 和 λ_2 振荡,每个波长都为多纵模工作。由于这些纵模的频率间隔与波长 λ_1 和 λ_2 之间的频率间隔相比非常小,可认为同一波长的所有纵模是相同频率。当波长 λ_1 和 λ_2 通过非线性晶体时,和频光的非线性耦合波方程为:

$$\frac{dA_3(z)}{dz} = i \frac{\omega_3}{2n_3c} \chi^{(2)} [- (\omega_1 + \omega_2); \omega_1, \omega_2] \times A_1(z) A_2(z) e(i\Delta kz), \quad (1)$$

ω_1, ω_2 与 ω_3 分别为波长 λ_1, λ_2 与和频光波长 λ_3 的圆频率, $A_1(z), A_2(z)$ 和 $A_3(z)$ 分别为波长 λ_1, λ_2 和 λ_3 的振幅, n_3 是和频光在非线性晶体内的折射率, $\chi^{(2)} [- (\omega_1 + \omega_2); \omega_1, \omega_2]$ 是波长 λ_1 与 λ_2 和频产生波长 λ_3 的二阶极化率。 $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$, 是和频过程中的位相失配, k_1, k_2 和 k_3 分别为波长 λ_1, λ_2 和 λ_3 的波矢, c 是真空中光速。

在小信号转换近似下,即 $A_1(z) = A_1(0), A_2(z) = A_2(0)$ 。积分(1)式从 $z = 0$ 到 $z = L$,并考虑到 $A_3(0) = 0$,可得到在非线性晶体的长度 L 处和频二次谐波场的振幅。考虑到光强与振幅的关系,通过晶体后,和频光的光强度为:

$$I_3 = \frac{cn_3}{8\pi} \left(\frac{\omega_3}{2n_3c} \chi^{(2)} \right)^2 I_1(0) I_2(0) L^2 \left[\frac{\sin(\frac{\Delta kL}{2})}{\frac{\Delta kL}{2}} \right]^2, \quad (2)$$

I_1, I_2 和 I_3 分别为波长 λ_1, λ_2 和 λ_3 的光强。

令

$$Q = \frac{cn_3}{8\pi} \left(\frac{\omega_3}{2n_3c} \chi^{(2)} \right)^2 L^2 \left[\frac{\sin(\frac{\Delta kL}{2})}{\frac{\Delta kL}{2}} \right]^2, \quad (3)$$

(2)式改为:

$$I_3 = Q I_1(0) I_2(0) \quad (4)$$

设波长 λ_1 由两个纵模组成,其中一个纵模的

振荡频率为 ν_1 ,相邻的另一个纵模的振荡频率为 $\nu_1 + \Delta \nu_1$ 。波长 λ_2 由等频率间隔的 3 个纵模组成,其中一个纵模的振荡频率为 ν_2 ,相邻第 1 个纵模的振荡频率为 $\nu_2 + \Delta \nu_2$,相邻第 2 个纵模的振荡频率为 $\nu_2 + 2\Delta \nu_2$ 。考虑到每个波长的纵模数,(4)式可写成:

$$\begin{aligned} I_3 &= Q [I_1(\nu_1) + I_1(\nu_1 + \Delta \nu_1)] \\ &\quad [I_2(\nu_2 + \Delta \nu_2) + I_2(\nu_2 + 2\Delta \nu_2)] \\ &= Q [I_{31}(\nu_1 + \nu_2) + I_{32}(\nu_1 + \nu_2 + \Delta \nu_1) + I_{33} \\ &\quad (\nu_1 + \nu_2 + \Delta \nu_2) + I_{35}(\nu_1 + \nu_2 + 2\Delta \nu_2) + I_{36} \\ &\quad (\nu_1 + \nu_2 + \Delta \nu_1 + 2\Delta \nu_2)], \end{aligned} \quad (5)$$

上式可见,波长 λ_1 的两个纵模与波长 λ_2 的 3 个纵模和频可产生 6 个纵模。这 6 个纵模中, I_{32} 与 I_{33} 之间和 I_{34} 和 I_{35} 之间的频率间隔为 $\Delta \nu_1 - \Delta \nu_2$,其余 3 个纵模间隔为 $\Delta \nu_1$ 。由于 $\Delta \nu_1$ 和 $\Delta \nu_2$ 为正数, $\Delta \nu_1$ 应大于 $\Delta \nu_1 - \Delta \nu_2$ 。图 6(b)测量的结果是 5 个纵模,可考虑是由于一个纵模远离增益带宽的中心,产生和频激光的功率低没有被测量到。图 6(b)测量到 5 个纵模的 4 个纵模间隔中,有 2 个纵模间隔小,根据每个纵模在图中的位置,间隔小的纵模的位置应在 I_{32} 与 I_{33} 之间和 I_{34} 和 I_{35} 之间,根据图中每个纵模的距离,可估计这两个纵模间隔是其余间隔的 1/4 到 1/3,这些都与对(5)式分析一致。根据以上的分析可以认为,在图 6(b)测量的高噪声激光输出的和频过程中,参与和频的 2 个基频光波长的一个波长有 2 个纵模,另一个有 3 个纵模。

在图 6(a)中所示低噪声和频激光的输出有间隔相等的 3 个纵模产生。根据前面的分析,在图 6(a)的低噪声和频激光器中应该有一个波长在单纵模工作,另一个波长有 3 个纵模。(4)式可写成:

$$\begin{aligned} I_3 &= Q [I_1(\nu_1)] [I_2(\nu_2) + I_2(\nu_2 + \Delta \nu_2) + \\ &\quad I_2(\nu_2 + 2\Delta \nu_2)] \\ &= Q [I_{31}(\nu_1 + \nu_2) + I_{32}(\nu_1 + \nu_2 + \Delta \nu_2) + \\ &\quad I_{33}(\nu_1 + \nu_2 + 2\Delta \nu_2)], \end{aligned} \quad (6)$$

既应有 3 个等频率间隔纵模的和频激光输出,这与图 6(a)的测量结果一致。

5 结 论

根据以上的分析可以认为,对于激光二极管

泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体, KTP II 类位相匹配腔内和频激光器, 如参与和频的两个波长中有一个波长为单纵模工作, 尽管和频光输出为多个纵模, 该激光器的输出仍为低噪声状态。如参与和频的两个波长全为多纵模, 和频光输出为高噪声状态。在腔内和频过程中, 虽然没有倍频过程中的和频

引起模式竞争, 但参与和频两个基频光的不同模式间的交叉和频和同一波长的不同模式间的增益饱和, 也产生了与绿光问题类似的输出噪声和不稳定状态, 但噪声特性要好于同类的腔内倍频激光器。

参考文献:

- [1] NADTOCHEEV V E, NANIL O E. Two-wave emission from a cw solid-state YAG:Nd³⁺ laser[J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1989, 19(4): 444-446.
- [2] SHEN H Y, ZENG R R, ZHOU Y P, et al. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ and $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(20): 1937-1938.
- [3] CHEN Y F. Cw dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys.*, 2000, B70: 475-478.
- [4] HONGYUAN S. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing[J]. *Chinese Physics Letters*, 1990, 7(4): 174-176.
- [5] HENDERSON G A. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68(11): 5451-5455.
- [6] CHEN Y F, TSAI S W, WANG S C, et al. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO₄ dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(20): 1809-1811.
- [7] VANCE J D, SHE C Y, MOOSMULLER H. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400 mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(21): 4891-4896.
- [8] MOOSMULLER H, VANCE J D. Sum-frequency generation of continuous-wave sodium D₂ resonance radiation[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(15): 1135-1137.
- [9] KRETSCHMANN H M, HEINE F, GÜNTHER H. All solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixer[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(19): 1661-1663.
- [10] CHEN Y F, TSAI S W. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ yellow laser with intracavity sum-frequency mixing[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(6): 397-399.
- [11] NAGAI H, KUME M, YOSHIKAWA A, et al. Periodic pulse oscillation in an intracavity-doubled Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(27): 5392-5394.

作者简介: 檀慧明(1954 -), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为固体激光技术, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所新产业公司副总经理。