掺钕激光晶体双波长振荡条件的理论研究

李景照[1,2],陈振强[2],朱思祁[2],李安明[2],李 真[2],尹 浩[2]

(1. 顺德职业技术学院 电子与信息工程学院,广东 佛山 528300;
2. 暨南大学 光电工程研究所,广东 广州 510632)

摘 要: 阐述了具有双下能级四能级结构的激光介质产生双波长激光的原理,介绍了二镜腔内两个波长同时振荡所要满足的阈值公式,数值计算发现空间烧孔效应的存在使阈值条件从一条曲线拓宽为一个区域,使两个波长更容易同时起振。然后,计算了激光晶体长度和泵浦功率对双波长阈值条件的影响,结果发现在增益饱和前晶体越长,泵浦功率越高,越容易出现双波长激光。最后,计算了几种常用掺钕激光晶体的双波长阈值曲线,对比发现 Nd:YAP 晶体由于具有两个相近的发射截面而更适合于产生双波长激光。

关键词: 双波长激光器; 四能级系统; 激光阈值; 空间烧孔效应; 激光晶体

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0806003

Theoretical research of the dual-wavelength oscillating condition in Nd-doped laser crystals

Li Jingzhao[1,2], Chen Zhenqiang[2], Zhu Siqi[2], Li Anming[2], Li Zhen[2], Yin Hao[2]

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shunde Polytechnic, Foshan 528300, China;
2. Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The principle of producing dual-wavelength laser was presented in laser crystals of four energy level system with double lower level. The threshold formulas of dual-wavelength simultaneous oscillation in two-mirror cavity were introduced. It was found by calculation that the existence of space hole-burning effect made the threshold condition widened to a region from a curve, which was helpful for dual-wavelength oscillation. Moreover, the effect of the crystal length and pump power on the dual-wavelength threshold were calculated, results show that, before the gain saturation happens, the longer the crystal length is and the higher the pump power is, the more easily the dual-wavelength laser will appear. Finally, the dual-wavelength threshold curves of several common Nd-doped laser crystals were calculated, which showed by comparison that Nd:YAP crystal is more suitable for producing dual-wavelength laser due to its two similar emission cross sections.

Key words: dual-wavelength laser; four-energy-level system; laser threshold; space hole-burning effect; laser crystal

收稿日期: 2016-12-10; **修订日期:** 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61475067);广东省新型特色研究院建设项目(2014B090903014);佛山市科技创新专项(2016AG100413)

作者简介: 李景照(1983-),男,讲师,硕士,主要从事固体激光器和 LED 应用技术方面的研究。Email: ljzhemail@163.com

0 引 言

在传统固体激光器中，由于谱线竞争的存在，激光晶体一般只输出单一波长。近年来，由于在分子的多光子分解[1-2]、差分吸收激光雷达[2-3]、精密激光光谱[2-3]、非线性频率变换[4-5]、共振全息干涉[1,6]等多个领域有着广泛的应用前景，多波长(特别是双波长)激光器的研究日益受到重视，国内外多有报道[7-18]。特别在非线性频率变换研究中，双波长激光通过和频或差频的方法即可产生另一波长的激光，这成了激光频率变换的新研究方向，有利于研发更多不同频率的激光器。因此双波长激光器已成为一个重要的热门研究方向。从一台激光器同时输出两个不同波长激光与分别采用两台不同波长的激光器相比，前者不仅使系统结构紧凑，实现小型化设计，还可降低生产成本。

文中分析了双波长激光器的产生原理，重点分析了二镜腔内产生双波长激光的阈值条件，然后数值计算了掺钕激光晶体产生双波长振荡所需的输出镜反射率范围，并研究了激光晶体长度和泵浦功率对双波长阈值条件的影响，最后对比了几种掺钕激光晶体的双波长阈值条件，找到了最容易产生双波长输出的激光晶体。

1 双波长激光的阈值条件

一台固体激光器输出双波长激光的方法目前主要有 3 类：(1) 单一波长运转的激光器经过频率变换(倍频或和频)后同时输出基频光和变频光[7-10]；(2) 利用激光介质的两个强发射峰产生双波长激光[11-17]；(3) 宽带发射光谱的激光介质通过选频器件实现双波长振荡[18]。其中第(2)种方法结构最简单，激光腔内只需一块激光晶体，文中将对该方法进行详细的理论分析与数值计算。

发射谱具有两个波峰的激光介质有许多，如 Nd:YAG[11-13]、Nd:YAP[14-15]、Nd:YVO_4[16]、Nd:$GdVO_4$[17]等，它们的能级跃迁结构多属于具有双下能级的双波长四能级系统，如图 1 所示。

图 1 中，泵浦到高能级 E_4 的粒子数以无辐射跃迁的形式跃迁到上能级 E_3，产生粒子数反转，向下能级 E_2 受激跃迁，产生激光辐射。由于下能级存在两个相近的能级 E_{2a} 和 E_{2b}，因此受激辐射也有两种可能，从而产生双波长输出。由于下能级的两个能级的跃迁截面存在着差异，一般情况下跃迁截面大的会优先振荡，而另一个波长则会被抑制掉，因此要采取必要的技术才能使双波长得以同时起振。

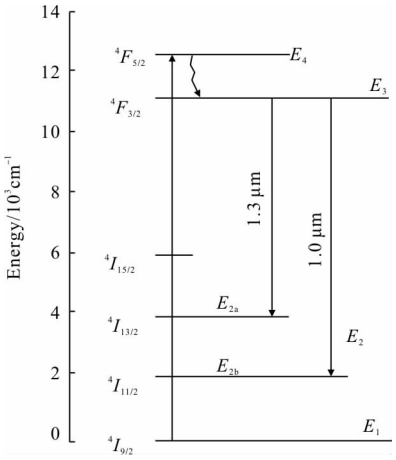


图 1 四能级系统的双波长跃迁示意图

Fig.1 Dual-wavelength transition diagram of the four energy level system

利用波长选择技术实现两个波长同时振荡的激光器满足的条件为：存在两个较强增益谱线的跃迁。图 1 中四能级系统的双波长跃迁示意图，可见从同一上能级出发的两个强跃迁落到了不同的下能级(或同一下能级上的不同子能级)。一般情况下这两种跃迁的跃迁截面相差较大，而且产生的波长在同一谐振腔内发生模式竞争，因此往往只能留下一个波长的振荡。所以要实现激光晶体的双波长运转，就需要调整它们在谐振腔内的损耗，以抵消双方因不同跃迁截面而造成的增益差异，确保它们能在模式竞争中共存而一起振荡。

由激光原理可知，要产生特定谱线跃迁的激光，就得使该谱线的激光阈值低于其他谱线跃迁，从而使该谱线跃迁在形成激光振荡时最先起振，这样就能在模式竞争中占有优势并最终抑制其他谱线跃迁。那么该谱线的激光阈值为[19]：

$$P_{\mathrm{thi}}=\frac{h\nu_i V}{\sigma_i\tau_i\eta_i}\left[\alpha_i+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_i r_i}\right)\right] \tag{1}$$

式中：h 为普朗克常数；V 为泵浦体积；L 为激光介质长度；下标 i 表示第 i 个波长的参数；ν_i 为相应的激光光子频率；σ_i 为激光晶体的跃迁截面；τ_i 为上能级

寿命；η_i 为泵浦效率；α_i 为腔内损耗；而 R_i 和 r_i 分别为输入镜和输出镜对 λ_i 的反射率。对相同激光晶体的同一上能级，可以假设不同波长的 τ_i、η_i、α_i 均为相同，且一般情况下对双波长的全反镜的反射率 R_i 都取 100%。则获得单一波长激光的振荡条件为：

$$P_{th}<P_{the} \tag{2}$$

式中：P_{th} 为所需波长的阈值；P_{the} 为其他波长的阈值。但如果要在谐振腔内实现双波长激光振荡，则两个波长的激光阈值要相等，即

$$P_{th1}=P_{th2} \tag{3}$$

由公式(1)和公式(3)得：

$$\frac{h\nu_1}{\sigma_1\tau_1\eta_1}\left[\alpha_1+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1r_1}\right)\right]=\frac{h\nu_2}{\sigma_2\tau_2\eta_2}\left[\alpha_2+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_2r_2}\right)\right] \tag{4}$$

式中：$\tau_1=\tau_2$，$\eta_1=\eta_2$，$\alpha_1=\alpha_2=\alpha$，$R_1=R_2=1$。代入公式(4)得：

$$\frac{\nu_1}{\sigma_1}\left[\alpha+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{r_1}\right)\right]=\frac{\nu_2}{\sigma_2}\left[\alpha+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{r_2}\right)\right] \tag{5}$$

满足公式(5)的两个波长有相同阈值，可同时振荡而产生双波长激光。

在二镜腔固体激光器中，高功率谐振腔内会出现多纵模振荡，每个纵模都成驻波场分布，波腹处光强大，波节处光强小，由于饱和效应而反转集居数，从而增益系数在波腹处最小，波节处最大，形成增益系数的轴向空间分布。若一纵模的波腹与另一个纵模的波节重合较好，则两模可分用纵向不同空间的反转粒子而同时振荡，这称为空间烧孔效应。也就是在泵浦功率较高时，空间烧孔效应有利于产生双波长激光，根据双波长激光振荡理论，产生双波长激光的条件可放宽为[20]：

$$\frac{2}{1+P_{in}/P_{th1}}\cdot\frac{\sigma_2\nu_1}{\sigma_1\nu_2}\left[\ln\left(\frac{1}{r_1}\right)+2\alpha L\right]\leqslant\ln\left(\frac{1}{r_2}\right)+2\alpha L\leqslant\frac{\sqrt{1+8P_{in}/P_{th1}}+1}{4}\cdot\frac{\sigma_2\nu_1}{\sigma_1\nu_2}\left[\ln\left(\frac{1}{r_1}\right)+2\alpha L\right] \tag{6}$$

式中：P_{in} 为泵浦功率；P_{th1} 为 λ_1 的阈值；r_1、r_2 分别是输出镜对 λ_1、λ_2 的反射率；σ_1、σ_2 分别为 λ_1、λ_2 的受激跃迁截面；L 是激光晶体的有效长度。当满足不等式时，腔内将形成双波长激光振荡，而在不等式范围以外，将只能实现 λ_1 或 λ_2 的单波长激光振荡。

2 计算结果及分析

具有双下能级的四能级系统的掺钕激光晶体均可产生连续双波长振荡，如 Nd:YAG、Nd:YAP 等，表 1 列出了 4 种常用掺钕晶体的跃迁参数。

表 1 几种掺钕晶体的跃迁截面[21]

Tab.1 Transition cross sections of several Nd-doped crystals[21]

Crystals	Nd:YAP	Nd:YVO_4	Nd:YAG	Nd:YLF
τ/μs	150 [22]	98 [24]	230	480
$^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$ λ_1/nm	1 079.5	1 064	1 064	1 047/1 053
$\sigma_1(10^{-19}\ cm^2)$	4.6 [22, 23]	13.0 [24]	4.6 [25]	3.7/2.6
$^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$ λ_2/nm	1 341.4	1342	1 338/1 318	1 313
$\sigma_2(10^{-19}\ cm^2)$	2.2 [23]	6.0 [24]	0.9/0.92 [25]	0.6
σ_1/σ_2	2.09	2.17	5.11/5.00	6.17/4.33

利用表 1 的参数，可计算双波长的振荡条件。当双波长阈值相等，即 $P_{th1}=P_{th2}$ 时，使用公式(5)可计算得到激光晶体双波长输出的反射率条件。以沿 b 轴切割的 Nd:YAP 晶体为例，表 2 列出了计算所用到的全部参数值，代入公式(5)即可算得输出镜对两个波长的反射率 r_1 与 r_2 的关系曲线，如图 2 所示。

表2 Nd:YAP 双波长阈值条件的计算参数

Tab.2 Calculation parameters of the threshold condition for Nd:YAP dual-wavelength laser

C (10^8 m/s)	λ_1/nm	λ_2/nm	ν_1/Hz	ν_2/Hz	σ_1 ($10^{-19}cm^2$)	σ_2 ($10^{-19}cm^2$)	a/%	L/mm
3	1 079.5	1 341.4	C/λ_1	C/λ_2	4.6	2.2	6	30

图 2 对应于二镜腔的 Nd:YAP 激光器，当输出镜对两个波长(1 079.5 nm 和 1 341.4 nm)的反射率在曲线上时，两个波长的振荡阈值相等，从而产生双波长振荡。然而，所需的反射率是一条曲线，这要求输出镜的镀膜对两个波长的反射率刚好落在曲线上，镀膜工艺要求比较高。

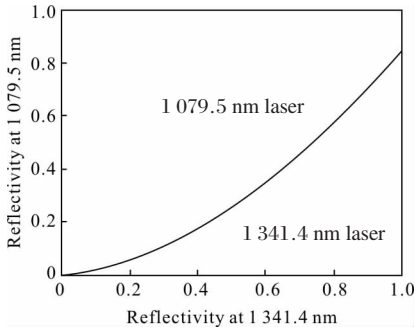


图 2 Nd:YAP 晶体双波长阈值相等时输出镜的反射率曲线

Fig.2 Output mirror reflectivity for producing two equal laser threshold in Nd:YAP

实际的固体激光器中,需要考虑空间烧孔效应,这时要使用不等公式(6)来计算双波长产生的阈值条件。取 $P_{in}=2P_{th1}$,计算掺钕激光晶体产生双波长激光所需的输出镜对两个波长的反射率条件,如图 3 所示。可见,此时双波长激光器输出镜的反射率条件不再是一条曲线,而是由两条曲线所围成的一个范围。由不等公式(6)所满足的条件可知,在一定范围内均能产生双波长激光,即输出镜对双波长的反射率只要满足两条曲线中间部分的条件时就能产生双波长振荡,而在两曲线以外的输出条件则只能产生单一波长。

图3 为二镜腔Nd:YAP 激光器中 1 079.5 nm 和 1 341.4 nm 激光竞争时的阈值条件,图中两条曲线

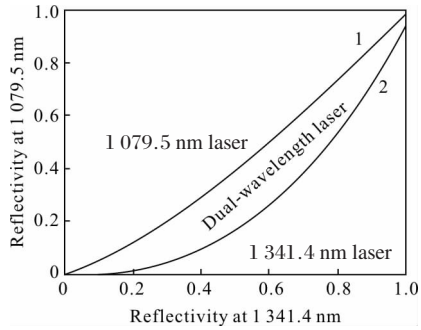


图 3 空间烧孔效应下 Nd:YAP 产生双波长激光所需的输出镜反射率条件

Fig.3 Output mirror reflectivity for producing dual-wavelength laser in Nd:YAP with space hole-burning effect

所包围的部分为同时产生双波长激光所要满足的输出镜反射率范围,而曲线 1 以上的反射率范围则只能产生 1 079.5 nm 单波长激光,曲线 2 以下的范围对应产生 1 341.4 nm 单波长激光。因此要在同一谐振腔内获得 Nd:YAP 晶体的双波长振荡,输出镜必须满足图 3 所要求的反射率条件。另外从图 3 还发现,产生双波长的条件区域偏向图的右下方,即曲线 1 以上区域比曲线 2 以下的更宽,表明了 1.0 μm 激光比 1.3 μm 更容易产生,这是由于前者具有较大的跃迁截面,同等的损耗条件下,1.0 μm 激光阈值更低,更容易起振。

图 4 为考虑空间烧孔效应时 Nd:YAP 产生双波长激光的输出镜反射率曲线在不同泵浦功率下的对比。可见,随着泵浦功率的增加,两条曲线包含的范围越大,双波长振荡的阈值条件越宽,越容易产生双波长激光。这结论与实际相符,因为要产生双波长,泵浦功率必须同时满足两个波长起振的阈值条件,泵浦功率越高越容易满足,越容易产生双波长激光。

图 5 为考虑空间烧孔效应时,二镜腔 Nd:YAP 激光器产生双波长激光所需的输出镜反射率随激光晶体长度的变化曲线。可见,随着晶体长度的增加,产生双波长激光的条件范围越宽。这是由于晶体越

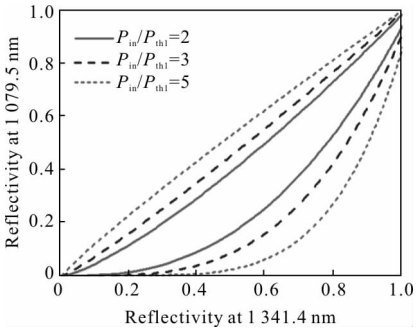


图 4 不同的泵浦功率下 Nd:YAP 双波长激光的阈值条件对比

Fig.4 Comparison of the threshold conditions for Nd:YAP dual-wavelength laser with different pump powers

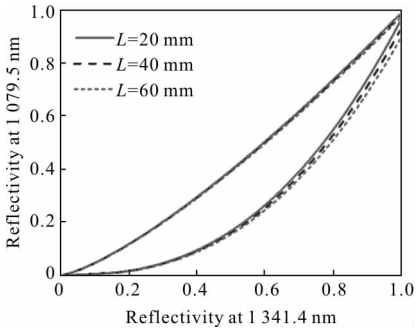
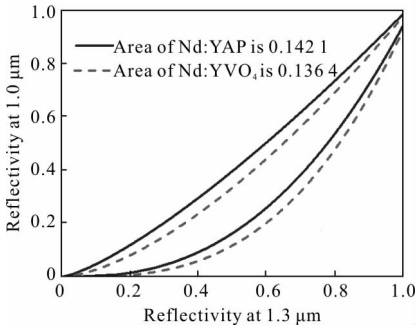


图 5 二镜腔 Nd:YAP 双波长激光器的阈值条件随晶体长度的变化

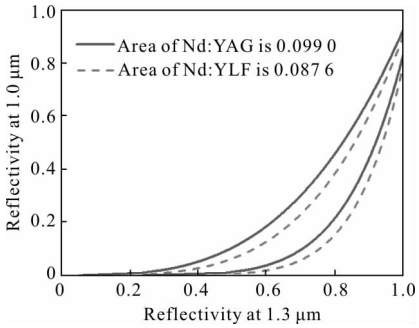
Fig.5 Threshold conditions with different crystal lengths of two-mirror cavity for Nd:YAP dual-wavelength laser

长,激光增益越大,腔内各模式的激光阈值就越低。另外,更长的晶体会导致更强的空间烧孔效应,有利于多纵模振荡,更容易出现双波长激光。但是,晶体不能太长,否则会出现增益饱和,甚至会超出谐振腔稳定性条件而不能产生任何激光。

图 6 为 4 种常用掺钕晶体用于双波长激光器中所需的输出镜反射率曲线图。可见,Nd:YAP 晶体产生双波长所满足的输出镜反射率曲线在图的最上方,面积最大,这说明 Nd:YAP 晶体是这 4 种晶体中最容易产生双波长激光的,$Nd:YVO_4$ 次之,而 Nd:YLF 是最难的。因为在表 1 中 Nd:YAP 晶体在 1.3 μm 与 1.0 μm 这两个波段的跃迁截面积是最接近的,对应两个相差不大的阈值,更容易产生双波长振荡。



(a) Nd:YAP and $Nd:YVO_4$



(b) Nd:YAG and Nd:YLF

图 6 几种掺钕晶体产生双波长激光的阈值条件对比

Fig.6 Dual-wavelength threshold conditions of several Nd-doped laser crystals

3 结 论

文中分析了四能级激光晶体利用两个发射峰实现双波长输出的原理,介绍了二镜腔内两个波长同时振荡所要满足的阈值等式,数值计算结果为输出镜对两个波长的反射率图是一条曲线,然而考虑空间烧孔效应时阈值条件变为不等式,反射率图变为由两条曲线组成的区域,阈值条件更宽松,更容易产生双波长激光。然后用阈值不等式分别计算了晶体长度和泵浦功率对双波长阈值条件的影响,结论是在出现增益饱和前,晶体越长,泵浦功率越高,越容易出现双波长激光。最后对比了 4 种常用掺钕激光晶体的双波长阈值曲线,发现 Nd:YAP 晶体由于其两个波长的发射截面更接近而最容易产生双波长激光。

参考文献:

[1] Akulin V M, Alimpiev S S, Karlov N V, et al. Appreciable increase of the dissociation rate of polyatomic molecules in the re shift of the nonresonant frequency under conditions of two-frequency laser action [J]. ***JETP Letters***, 1977, 25(9): 400-403.

[2] Shen Hongyuan. Dual wavelenglh crystal lasers [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 1994, 21(5): 334-340. (in Chinese)
沈鸿元. 双波长晶体激光器 [J]. 中国激光, 1994, 21(5): 334-340.

[3] Lin Yanfeng, Zhang Ge, Zhu Haiyong, et al. Mechanism of dual-wavelength oscillation in Nd:YAG Q-switched laser [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2009, 58 (6): 3909-3914. (in Chinese)
林燕凤, 张戈, 朱海永, 等. Nd:YAG 调 Q 激光器双波长振荡机理分析[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3909-3914.

[4] Shen H Y, Lin W X, Zeng R R, et al. Twice sum-frequency mixing of a dual-wavelength $Nd:YAlO_3$ laser to get 413.7 nm violet coherent radiation in $LiIO_3$ crystal [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1991, 70(3): 1880-1881.

[5] Shen H Y, Lin W X, Zeng R R, et al. Second-harmonic generation and sum-frequency mixing of double-wavelength $Nd:YAlO_3$ laser to 413.71 nm violet coherent radiation in $LiIO_3$ crystal [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1992, 72(9): 4472-4473.

[6] Weigl F. A generalized technique of two-wavelength, nondiffuse holographic interferometry [J]. ***Applied Optics***, 1971, 10(1): 187-192.

[7] Wang Jiaxian. Cavity design and its parameters choice for a dual-wavelength $Nd:YAG/Cr^{4+}:YAG$ laser [J]. ***Laser Journal***, 2002, 23(5): 14-15. (in Chinese)
王加贤. 双波长输出的 $Nd:YAG/Cr^{4+}:YAG$ 激光器的腔设计与参数选择[J]. 激光杂志, 2002, 23(5): 14-15.

[8] Wan Yong, Han Kai, Han Hong, et al. Repetitive, Raman shifted, (Nd, Ce):YAG laser with twin-wavelength outputs [J]. ***Laser Technology***, 2002, 26(2): 126-128. (in Chinese)
万勇, 韩凯, 韩鸿, 等. 重频双波长输出 (Nd, Ce):YAG 喇曼频移激光器研究[J]. 激光技术, 2002, 26(2): 126-128.

[9] Yan Ying, Luo Yu, Pan Qing, et al. Watt level CW frequency -stabilized Nd:YAP/KTP laser with dual wavelength outputs [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2004, 31(5): 513-517. (in Chinese)
延英, 罗玉, 潘庆, 等. 瓦级连续双波长输出 Nd:YAP/KTP 稳频激光器[J]. 中国激光, 2004, 31(5): 513-517.

[10] Wang Jiaxian, Lv Fengping, Su Feiya. Investigation on a compound resonator Nd:YAG-Cr^{4+}:YAGlaser [J]. ***Chinese Journal of Lasesrs***, 2004, 31(4): 399-402. (in Chinese)
王加贤, 吕凤萍, 苏菲娅. 双调 Q 复合腔 Nd:YAG-Cr^{4+}:YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 399-402.

[11] Wei Yong, Zhang Ge, Huang Chenghui, et al. A 1 318.8 nm/1 338 nm simultaneous dual wavelength Nd:YAG laser [J]. ***Laser and Infrared***, 2005, 35(3): 164-166. (in Chinese)
魏勇, 张戈, 黄呈辉, 等. 1 318.8 nm/1 338 nm 同时振荡双波长 Nd:YAG 激光器[J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 164-166.

[12] Zhang L, Wei Z, Feng B, et al. Simultaneous dual-wavelength Q-switched Nd:YAG laser operating at 1.06 μm and 946 nm [J]. ***Optics Communications***, 2006, 264(1): 51-54.

[13] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, et al. 1 318.8 nm/1 338.2 nm simultaneous dual-wavelength Q-switched Nd:YAG laser [J]. ***Applied Physics B***, 2008, 90(3): 451-454.

[14] Su H, Shen H Y, Lin W X, et al. Computational model of Q-switch Nd:$YAlO_3$ dual-wavelength laser [J]. ***Journal of Applied Physics,*** 1998, 84(12): 6519-6522.

[15] Lin Wenxiong, Shen Hongyuan. A new configuration of the laser cavity for simultaneous dual wavelength Q-switch pulsed Nd:$YAlO_3$ laser [J]. ***Acta Physica Sinica***, 1999, 48(4): 667-672. (in Chinese)
林文雄, 沈鸿元. 一种新型结构的 Nd:$YAlO_3$ 双波长调 Q 脉冲激光器[J]. 物理学报, 1999, 48(4): 667-672.

[16] Lin Y Y, Chen S Y, Chiang A C, et al. Single-longitudinal-mode, tunable dual-wavelength, CW Nd:YVO_4 laser [J]. ***Optics Express***, 2006, 14(12): 5329-5334.

[17] Chai Hongliang, Xue Lin, Huang Haitao, et al. Diode-pumped Nd:$GdVO_4$ laser emitting at four wavelengths [J]. ***Laser and Infrared***, 2007, 37(2): 120-123. (in Chinese)
柴洪亮, 薛林, 黄海涛, 等. 二极管泵浦 Nd:$GdVO_4$ 晶体四波长激光器[J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 120-123.

[18] Saito N, Akagawa K, Wada S, et al. Dual wavelength oscillation by electronic tuning of a Ti:sapphire laser for difference-frequency generation [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington: Optical Society of America, 1998: 68-69.

[19] Shen Hongyuan. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. ***Chinese Physics Letters***, 1990, 7(4): 174-176.

[20] Shen H Y, Su H. Operating conditions of continuous wave simultaneous dual wavelength laser in neodymium host crystals [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1999, 86(12): 6647-6651.

[21] Barnes N P, Gettemy D J, Esterowitz L, et al. Comparison of Nd 1.06 and 1.33 μm operation in various hosts [J]. ***IEEE Journal of Quantum Electronics***, 1987, 23(9): 1434-1451.

[22] Weber M J, Bass M, Andringa K, et al. Czochralski growth and properties of $YAlO_3$ laser crystals [J]. ***Applied Physics Letters***, 1969, 15(10): 342-345.

[23] Shen Hongyuan, Lian Tianguan, Zheng Ruirong, et al. Measurement of the stimulated-emission cross-section for the $^4F_{3/2}$-$^4I_{13/2}$ transition of Nd^{3+} in $YAlO_3$ crystal [J]. ***IEEE Journal of Quantum Electronics***, 1989, 25(2): 144-146.

[24] Tucker A W, Birnbaum M, Fincher C L, et al. Stimulated-emission cross section at 1 064 and 1 342 nm in Nd:YVO_4 [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1977, 48(12): 4907-4911.

[25] Singh S, Smith R G, Uitert L G V. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd^{3+} in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. ***Physical Review B***, 1974, 10(6): 2566-2572.