

全固态腔内 SHG/SFG 多波长黄光激光器

李 智^{1,2} 檀慧明¹ 田玉冰¹ 王 帆¹

(¹ 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 报道了一种利用大功率激光二极管端面抽运 Nd:YAG 激光晶体产生基频光, 并通过非线性晶体的腔内倍频(SHG)与和频(SFG), 实现多个二次谐波同时连续输出的多波长黄光激光器。将 Nd:YAG 晶体的 1112.1、1115.9、1122.7 nm 谱线作为基频光, 利用 LBO 和 BIBO 进行非线性光学频率变换, 同时获得了三个倍频光及三个和频光激光输出。从理论上对基频光同时受激跃迁和非线性频率变换相位匹配进行了分析。实验结果与理论分析表明, 当基频光的性能相对接近时, 合理地选择性能较好的非线性晶体对基频光同时进行倍频和和频是获得全固态多波长激光器的一种实用方法, 合理地设计激光器谐振腔能够提高激光器的稳定性。

关键词 激光器; 全固态激光器; 多波长黄激光; 腔内倍频与和频; Nd:YAG

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0214001

All-Solid-State Multi-Wavelength Yellow Laser Intra-Cavity SHG/SFG

Li Zhi^{1,2} Tan Huiming¹ Tian Yubing¹ Wang Fan¹

(¹ *Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract With the use of fundamental wave of high power laser diode end-pumped Nd:YAG and the intra-cavity second-harmonic generation (SHG) effect and sum-frequency generation (SFG) effect of nonlinear optical crystal, a multi-wavelength yellow laser with simultaneous multi-second-harmonic outputs is proposed. By using 1112.1, 1115.9, 1122.7 nm outputs of Nd:YAG as fundamental waves, and selecting LBO and BIBO for nonlinear frequency conversion, three SHG lights and three SFG lights are obtained at the same time. The simultaneous stimulated transition of fundamental frequency lights and the phase matching nonlinear frequency conversion are analyzed theoretically. Experimental results and theoretical analysis show that when fundamental waves' performances are relatively close to each other, reasonably choosing nonlinear crystals with good performance for frequency doubling and sum frequency of wavelengths at the same time is a practical method to realize all-solid-state multi-wavelength laser. Reasonably designing laser resonator can improve the stability of the laser.

Key words lasers; all-solid-state laser; multi-wavelength yellow laser; intra-cavity frequency doubling and sum frequency; Nd:YAG

OCIS codes 140.3480; 140.3515; 140.3580

1 引 言

黄光激光器是流式细胞仪、共聚焦显微镜及其他生物成像装置的理想光源, 也是激光治疗眼科疾

病的最佳波长, 在激光医学和生物医学仪器领域有着重要作用^[1-6]。同时, 黄光在分子生物学和化学等领域也有重要的应用^[7]。多波长黄光激光器, 作

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-09-17

基金项目: 苏州市应用基础研究计划(SYG201208)、苏州市技术专项(ZXG201133)

作者简介: 李 智(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事医用全固态多波长激光技术方面的研究。

E-mail: zlioptic@163.com

导师简介: 檀慧明(1954—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光与非线性光学频率变换技术等方面的研究。

E-mail: tanhm@ciomp.ac.cn(通信联系人)

为基础生物仪器的理想光源,在非线性光学混频和精密激光光谱等方面有重要的应用价值^[8-9]。目前报道的有关多波长激光器有红外、绿光的连续及脉冲输出^[10]。而关于黄光激光器的报道中,有基于非线性光学和频(SFG)技术的Nd:YAG或Nd:YVO₄全固态激光器^[11],有基于非线性光学受激拉曼散射的全固态自拉曼激光器^[12],还有铜蒸气激光器和染料激光器等。

但是,受能带的限制,黄光激光输出还不能直接利用半导体激光器实现,目前只能由光抽运半导体激光器(OPSL)的倍频(SHG)^[4]或二极管抽运全固态激光器(DPSSL)的非线性光学倍频或和频技术实现。有关利用二阶非线性光学技术的三波长连续全固态黄光激光器的报道较少。对于Nd:YAG的激光谱线,除了1064、1319、946 nm谱线,还存在由于能级的斯塔克分裂而在能级⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}跃迁中存在的R₂→Y₆,R₁→Y₅,R₁→Y₆三种子能级跃迁,谱线分别对应1112.1、1115.9、1122.7 nm。这三条谱线相对性能接近^[13],增益都较低。要使得这种低增益谱线在谐振腔内起振,就必须抑制高增益谱线。本文利用光纤耦合输出的808 nm半导体激光器抽运Nd:YAG,利用特殊设计的谐振腔膜系抑制了增益较大的1064、1319 nm等谱线,使增益较低的1112.1、1115.9、1122.7 nm跃迁谱线能够受激起振输出。实验中分别用LBO和BIBO进行腔内非线性频率变换。利用三个基频光谱线,通过腔内倍频与和频,获得了6条谱线的同时输出。对实验结果进行了理论分析。同时还研究了通过谐振腔的设计提高热稳定性的方法。

2 实验装置

实验结构图如图1所示。抽运源使用LIMO公司生产的激光二极管(LD),经过数值孔径为0.22的光纤耦合输出,最大输出功率为32 W,中心波长为807.5 nm。抽运光经过耦合光学系统(OC)准直聚焦后射入谐振腔,谐振腔腔长约为40 mm。输入镜为曲率半径R₁=50 mm的平凹镜,其左端面镀膜为808 nm减反(AR)膜(透射率T>90%),右端面镀膜为1123 nm高反(HR)膜(反射率R>95%)及1345~1320 nm、1070~1060 nm、810~806 nm高透(HT)膜(T>90%)。分别用镀相同膜系的平面镜和曲率半径R₂=200 mm的平凹镜作为输出镜,其左端面镀膜为1123 nm HR(R>95%)和564~559 nm HT膜(T>95%),右端面镀膜均为561.5 nm HT膜

(T>95%)。激光介质Nd:YAG,掺杂原子数分数为1.10%,尺寸为3 mm×3 mm×10 mm,晶体两端镀有1123、808 nm的减反膜(T>80%)。倍频晶体LBO和BIBO均按1123 nm倍频角度切割,尺寸分别为2 mm×2 mm×10 mm和3 mm×3 mm×2 mm,两块晶体两端均镀有基频光1123 nm和倍频光561 nm的高透膜(T>90%),以降低其插入损耗。抽运源与谐振腔分别由半导体制冷器TEC1和TEC2进行温控。

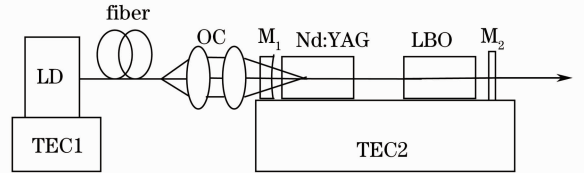


图1 实验结构图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

3 实验结果与讨论

实验中,为了提高谐振腔热稳定性,需要设计热不灵敏的稳定腔。把激光介质等效为一个厚透镜,非线性晶体等效为均匀介质,假设M₁到Nd:YAG左端面的距离为L₁,Nd:YAG的厚度为D₁,折射率为N₁,左右端面曲率半径分别为r₁和r₂,则其焦距及前后主距分别为^[14]

$$f_T = \frac{N_1 r_1 r_2}{(N_1 - 1)[N_1(r_2 - r_1) + (N_1 - 1)D_1]},$$

$$h_1 = -\frac{r_1 D_1}{N_1(r_2 - r_1) - (N_1 - 1)D_1},$$

$$h_2 = \frac{r_2 D_1}{N_1(r_2 - r_1) - (N_1 - 1)D_1}.$$

假设右端面到LBO左端面距离为L₂,LBO厚度为D₂,折射率为N₂,其右端面到M₂距离为L₃。根据ABCD矩阵理论,谐振腔内光束单程变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{D_2}{N_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{h_2}{f_T} & h_1 + h_2 - \frac{h_1 h_2}{f_T} \\ -\frac{1}{f_T} & 1 - \frac{h_1}{f_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

谐振腔横模能自再现的G参数为:G₁=a-b/R₁,G₂=d-b/R₂,谐振腔的稳定性条件为:0<G₁G₂<1。实验参数为:L₁=2 mm,L₂=15 mm,L₃=2 mm,D₁=D₂=10 mm,N₁=1.82,N₂=1.57,r₁=r₂=100000 mm,R₁=50 mm,R₂=∞ or 200 mm,计算可

得 G 参数: $G_1 = 0.4890$, $G_2 = 1$ or 0.8722 , $G_1 G_2 = 0.4890$ or 0.4265 。

可知,当输出镜 M_2 曲率半径 R_2 为无穷大或 200 mm 时都可满足 $0 < G_1 G_2 < 1$, 即满足稳定腔条件。

实验时,首先调节 LD 的温控,使 LD 的发射峰与 Nd:YAG 的吸收峰 808.7 nm 重合。然后调节输出镜到晶体的位置及晶体温控,当注入的抽运电流达到 11 A 时,利用红外感光卡片可检测到激光输出,故可认为阈值电流为 11 A 。反复调节输出镜使红外输出光斑和功率达到最佳状态。当达到最佳状态时,用海洋光学公司 NIRQUEST 型光谱仪(分辨率为 1.7 nm)测量输出激光的光谱,如图 2 所示。可知激光器有三条谱线同时运转。由于实验室的光谱仪分辨率局限和仪器误差的存在,图中三条谱线峰并不是精确地位于 1112.1 、 1115.9 、 1122.7 nm , 而在其附近。同时可知,在 946 、 1064 、 1319 nm 波段处并没有谱线起振。图 2 中微小波浪形状是由于实验中采集光谱时背景噪声导致的不平滑。由于增益较大的 1064 、 1319 、 946 nm 谱线已经被抑制,三条低增益谱线已获得起振,这表明谐振腔设计及膜系设计是合理的。

图 3(a) 和 (b) 分别为在腔内插入非线性晶体

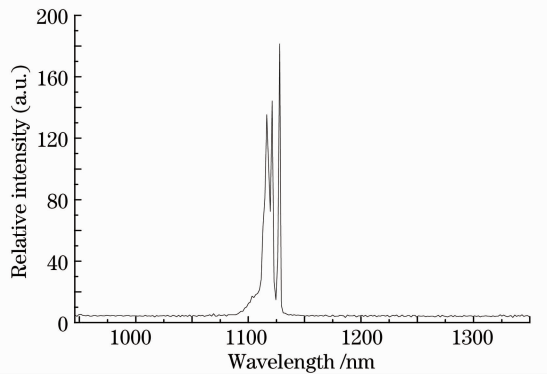
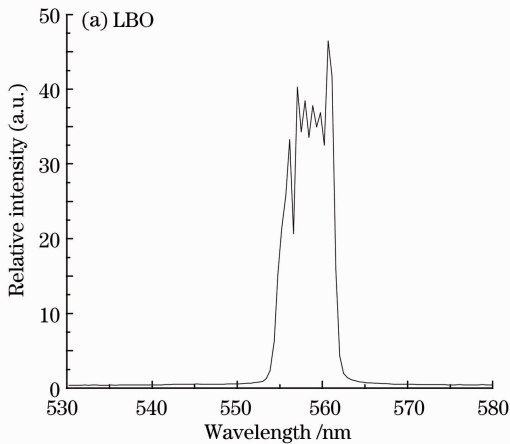


图 2 基频光光谱

Fig. 2 Spectrum of the laser lines

LBO 和 BIBO,注入抽运电流为 24 A 时输出的 SHG 和 SFG 光谱图,使用的光谱仪为海洋光学公司的 MayaPro2000 型光纤光谱仪(分辨率为 0.48 nm)。图 3(a)和 (b)中都有明显的 6 个峰,即为 1112.1 、 1115.9 、 1122.7 nm 基频光在非线性晶体内经过三波耦合获得的 556 、 557.9 、 561.4 nm 倍频光以及 1112.1 nm 与 1115.9 nm 、 1112.1 nm 与 1122.7 nm 、 1115.9 nm 与 1122.7 nm 的 557 、 558.7 、 559.6 nm 和频光谱。两图光谱的谱线峰各不相同主要是由非线性光学频率变换效率不同所致,图中曲线不平滑是由背景噪声所致。

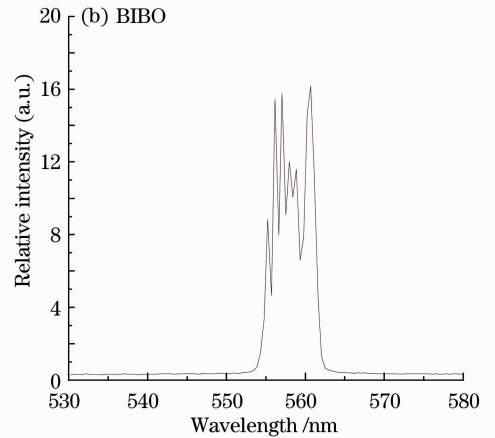


图 3 24 A 抽运电流时不同非线性晶体输出的黄光光谱

Fig. 3 Spectra of yellow lasers with different nonlinear crystals under pumping current of 24 A

图 4(a)和 (b)分别为基频光通过 LBO 和 BIBO 光学频率变换后输出的黄光总功率随抽运电流变化图。可知采用 $R=200\text{ mm}$ 的输出镜的输出功率比 $R=\infty$ 的输出功率略大,腔内插入 LBO 的输出功率大于插入 BIBO 时的输出功率。这是因为在稳态小信号近似下和频光功率密度与基频光功率密度 P_{ω_1} 、 P_{ω_2} 、有效非线性系数 d_{eff} 及非线性晶体长度 l 的平方成正比,即 $P_{\omega_1+\omega_2} \propto (d_{\text{eff}} l^2 P_{\omega_1} P_{\omega_2})$ 。当基频光

频率 $\omega_1 = \omega_2$ 时,倍频光功率密度 $P_{2\omega_1} \propto (d_{\text{eff}} l^2 P_{\omega_1}^2)$,且非线性晶体的长度 l 必须小于孔径长度 $l_a = a/\rho$, a 为晶体孔径, ρ 为走离角。计算可知, LBO 和 BIBO 的孔径长度分别约为 2000 、 24 mm , 均大于各自长度。由于 LBO 的非线性光学频率变换作用的长度为 BIBO 的 5 倍,其有效非线性系数为 0.836 ,约为 BIBO 的 $1/3$,因此通过 LBO 非线性光学频率变换的效率比 BIBO 高。通过 ABCD 矩

阵理论计算得输出镜 $R = 200 \text{ mm}$ 和 $R = \infty$ 时非线性晶体内基频光斑大小分别为 97.7 、 $98.8 \mu\text{m}$ ，即

$R = 200 \text{ mm}$ 时非线性晶体内光功率相对较大，因此转换效率也相对较高。

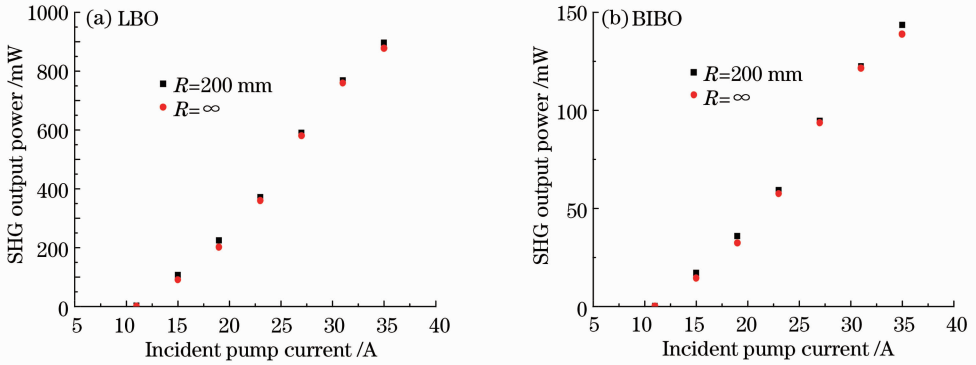


图 4 不同非线性晶体输出黄光总功率随抽运电流变化

Fig. 4 Sum of yellow lasers output power versus incident pump current

4 理论分析

4.1 激光谱线

在 Nd:YAG 激光晶体中,钕离子(Nd^{3+})取代 YAG 基质中的钇离子(Y^{3+})。 Nd^{3+} 在晶格场作用下发生了斯塔克分裂,其能级结构和主要激光谱线的跃迁如图 5 所示。 Z_1 能级上的粒子被抽运到高能级 ${}^4F_{5/2} + {}^2H_{9/2}$ 上经过非辐射跃迁到 ${}^4F_{3/2}$ 的子能级 R_1 、 R_2 上(其二者之间粒子数分布比为 $3:2$)，由于受激辐射跃迁到不同的下能级因而对应了不同的激光谱线^[13,15]。

表 1 为 Nd:YAG 中 1064、1319、946、1112.1、1115.9、1122.7 nm 激光谱线的激光特性比较。可知 1064 nm 是增益最强的谱线,而 1112.1、1115.9、1122.7 nm 三条谱线的受激发射横截面 σ 较小,且荧光分支比 β 和相对性能等都比较接近。因此,要获得这三条谱线运转,就必须设计合理的谐振腔膜通过提高透射率和增大起振的阈值功率来抑制 1064、1319、946 nm,然而由于 $1.1 \mu\text{m}$ 波段的三条谱线波长接近,根据文献[16],可以得到三波长同时

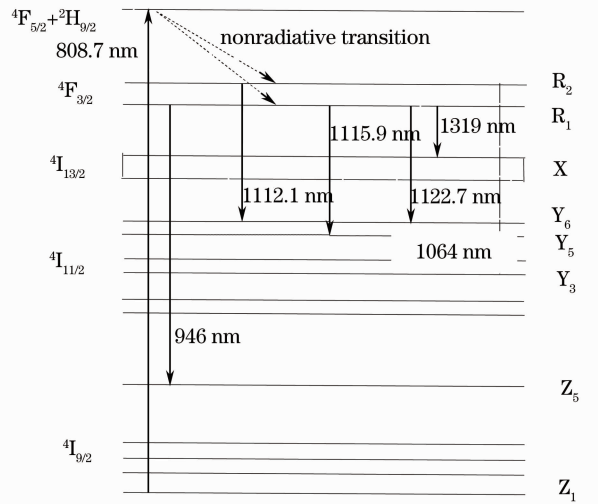


图 5 Nd:YAG 的能级图和主要跃迁谱线

Fig. 5 Diagram of the energy levels of Nd:YAG with a description of main pumping lines and transition lines

运转的条件为

$$\frac{L_c + T_{1112.1}}{2\sigma_{1112.1}} = \frac{L_c + T_{1115.9}}{3\sigma_{1115.9}} = \frac{L_c + T_{1122.7}}{3\sigma_{1122.7}}, \quad (2)$$

表 1 Nd:YAG 中 1064、1319、946、1112.1、1115.9、1122.7 nm 激光谱线的激光特性比较

Table 1 Comparison of laser performance of Nd:YAG at 1064, 1319, 946, 1112.1, 1115.9, 1122.7 nm transition lines

λ / nm	Transition	$\sigma / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Delta\nu / \text{cm}^{-1}$	β	Relative performance
1064	$R_2 \rightarrow Y_3$	45.8	5	0.135	100
1319	$R_2 \rightarrow X_1$	8.9	6	0.018	34
946	$R_1 \rightarrow Z_5$	5.1	9	0.040	46
1112.1	$R_2 \rightarrow Y_6$	3.6	14	0.025	49
1115.9	$R_1 \rightarrow Y_5$	2.9	16	0.034	46
1122.7	$R_1 \rightarrow Y_6$	3.0	13	0.030	40

式中 L_c 为腔内损耗, $T_{1112.1}$, $T_{1115.9}$, $T_{1122.7}$ 和 $\sigma_{1112.1}$, $\sigma_{1115.9}$, $\sigma_{1122.7}$ 分别为 1112.1, 1115.9, 1122.7 nm 光的耦合器透射率和受激发射横截面。由表 1 可知, 在镀膜工艺限制下, 波长接近的透射率相差不是很大, 使得三条谱线同时达到激光阈值而在谐振腔内稳定谐振成为可能。

4.2 非线性晶体

针对实验中用的非线性晶体 LBO 和 BIBO, 通过 SNLO 软件计算得到两种晶体对 1112.1、1115.9、1122.7 nm 三条谱线的倍频及和频参数, 分别如表 2

和表 3 所示。由表 2 可知, 六种频率变换过程中相位匹配角 θ 相同即 $\delta\theta=0$, 而 φ 不同, 在 LBO 中最大差 $\delta\varphi=0.7^\circ$, 最小匹配允许角 $\Delta\varphi \cdot L=13.73 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$ 。实验中 LBO 长度为 1 cm, 故最小相位匹配允许角 $\Delta\varphi=13.73 \text{ mrad}$ (约 0.8°)。由于 $\Delta\varphi>\delta\varphi$, 因此当满足一种频率变换的最佳匹配方位角时, 其他频率变换的最佳匹配方位与其之差都在匹配允许方位内。故理论上 LBO 内六种频率变换过程都存在, 但相位匹配因子与相位匹配角失配量有关, 即

$$\Delta k = \Delta k \Big|_{\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m} + \left(\delta\theta \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta} + \delta\varphi \frac{\partial \Delta k}{\partial \varphi} \right) \Big|_{\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m} + \frac{1}{2} \left(\delta\theta \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta} + \delta\varphi \frac{\partial \Delta k}{\partial \varphi} \right)^2 \Big|_{\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m}. \quad (3)$$

由 $\delta\theta=0$ 可知, 各类频率变换相位匹配 φ 角之差 $\delta\varphi$ 越大, 相位匹配因子越大, 转换效率就越小。

表 2 LBO 在 XY 主平面内 1112.1、1115.9、1122.7 nm 的倍频及和频相位匹配参数

Table 2 Phase matching parameters of frequency-doubling and sum-frequency at 1112.1, 1115.9, 1122.7 nm on XY principal plane of LBO

SHG /SFG	Matching angle $(\theta, \varphi) / (^\circ)$	Minimal acceptable angle / $(\text{mrad}\cdot\text{cm})$	$d_{\text{eff}} / (\text{pm}/\text{V})$
1112.1 nm(o)+1112.1 nm(o)=556.1 nm(e)	(90, 8.3)	$\Delta\theta \cdot L=13.73$, $\Delta\varphi \cdot L=13.73$	0.836
1115.9 nm(o)+1115.9 nm(o)=558 nm(e)	(90, 8.0)	$\Delta\theta \cdot L=14.19$, $\Delta\varphi \cdot L=14.19$	0.836
1122.7 nm(o)+1122.7 nm(o)=561.4 nm(e)	(90, 7.6)	$\Delta\theta \cdot L=15.11$, $\Delta\varphi \cdot L=15.11$	0.836
1112.1 nm(o)+1115.9 nm(o)=557 nm(e)	(90, 8.1)	$\Delta\theta \cdot L=13.98$, $\Delta\varphi \cdot L=13.93$	0.836
1112.1 nm(o)+1122.7 nm(o)=558.7 nm(e)	(90, 7.9)	$\Delta\theta \cdot L=14.45$, $\Delta\varphi \cdot L=14.31$	0.836
1115.9 nm(o)+1122.7 nm(o)=559.6 nm(e)	(90, 7.8)	$\Delta\theta \cdot L=14.68$, $\Delta\varphi \cdot L=14.59$	0.836

表 3 BIBO 在 XZ 主平面内 1112.1、1115.9、1122.7 nm 的倍频及和频相位匹配参数

Table 3 Phase matching parameters of frequency-doubling and sum-frequency at 1112.1, 1115.9, 1122.7 nm on XZ principal plane of BIBO

HG /SFG	Matching angle $(\theta, \varphi) / (^\circ)$	Minimal acceptable angle / $(\text{mrad}\cdot\text{cm})$	$d_{\text{eff}} / (\text{pm}/\text{V})$
1112.1 nm(e)+1112.1 nm(e)=556.1 nm(o)	(39.7, 0)	$\Delta\theta \cdot L=0.73$, $\Delta\varphi \cdot L=0.73$	-2.23
1115.9 nm(e)+1115.9 nm(e)=558 nm(o)	(39.7, 0)	$\Delta\theta \cdot L=0.73$, $\Delta\varphi \cdot L=0.73$	-2.23
1122.7 nm(e)+1122.7 nm(e)=561.4 nm(o)	(39.5, 0)	$\Delta\theta \cdot L=0.74$, $\Delta\varphi \cdot L=0.74$	-2.22
1112.1 nm(e)+1115.9 nm(e)=557 nm(o)	(39.7, 0)	$\Delta\theta \cdot L=0.73$, $\Delta\varphi \cdot L=0.73$	-2.23
1112.1 nm(e)+1122.7 nm(e)=558.7 nm(o)	(39.6, 0)	$\Delta\theta \cdot L=0.74$, $\Delta\varphi \cdot L=0.73$	-2.23
1115.9 nm(e)+1122.7 nm(e)=559.6 nm(o)	(39.6, 0)	$\Delta\theta \cdot L=0.74$, $\Delta\varphi \cdot L=0.73$	-2.23

同理, 由表 3 可知, BiBO 的最大 $\delta\theta=0.2^\circ$, $\delta\varphi=0$ 。对于 θ , 最小匹配允许角 $\Delta\theta \cdot L=0.73 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$, BIBO 的长度为 2 mm, 计算的最小相位匹配角 $\Delta\theta=3.65 \text{ mrad}$ (约 0.2°), 等于 $\delta\theta$ 。同理 BIBO 内六种频率转换过程也都存在, 其转换效率也各不相同。根据非线性光学理论, 有效非线性系数与相位匹配角 θ 和方位角 φ 有关。而表 2 中有效非线性系数值相同 (φ 角变化较小), d_{eff} 需要精确到更低数位时才能有差异。由表 3 可知当 $\Delta\theta=0.2^\circ$ 时, d_{eff} 相差 0.01。由于允许角与晶体长度有关, 故合理选择非线性晶

体的长度是控制频率变换过程的有效手段, 即选择适当的非线性晶体尺寸可作为选频方法之一。同时, 选择恰当的非线性晶体切割角度能获得不同的多波长谐波输出。

5 结 论

研究和分析了 Nd:YAG 的 1112.1、1115.9、1122.7 nm 三条谱线在一个镀有特殊谐振腔内同时运转以及三条谱线经过 LBO 和 BIBO 非线性晶体的频率变换过程, 获得了 $0.55 \mu\text{m}$ 波段的黄激光。

实验结果与理论分析都表明,对于频率和受激发射截面都接近的激光谱线,通过非线性频率变换以及合理的晶体角度与温度控制,可获得多个光波的同时输出;合理地选择非线性晶体能够有效地控制非线性变换过程,获得实用的激光器。

参 考 文 献

- 1 E L Tanzi, J R Lupton, T S Alster. Lasers in dermatology: four decades of progress [J]. *J Am Acad Dermatol*, 2003, 49(1): 1-34.
- 2 W Telford, M Murga, T Hawley, *et al.*. DPSS yellow-green 561-nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry [J]. *Cytomet Part A*, 2005, 68(1): 36-44.
- 3 Cui Jinjiang, Tan Huiming, Wang Fan, *et al.*. High power medical all-solid-state 561 nm yellow laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011401.
崔锦江, 檀慧明, 王 帆, 等. 大功率医用全固态 561 nm 黄光激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 011401.
- 4 Tian Yubing, Tan Huiming, Cui Jinjiang, *et al.*. Development of all-solid-state medical laser for skin vascular dermatosis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030004.
田玉冰, 檀慧明, 崔锦江, 等. 用于血管性皮肤病治疗的固体激光技术概述[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030004.
- 5 Duan Yanmin, Zhu Haiyong, Feng Zhengrong, *et al.*. Laser diode end-pumped Nd: YVO₄ self-Raman laser at 559 nm with sum-frequency mixing [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0502002.
段延敏, 朱海永, 凤正荣, 等. 半导体激光端面抽运 Nd: YVO₄ 自拉曼和频 559 nm 激光[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502002.
- 6 Shao Zhiqiang, Gao Lanlan, Zhang Chen. Research on 561 nm frequency-double all-solid-state laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 031401.
邵志强, 高兰兰, 张 辰. 全固态 561 nm 倍频激光器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 031401.
- 7 Jia Fuqiang, Xue Qinghua, Zheng Quan, *et al.*. All-solid-state 556 nm yellow laser by LBO intracavity frequency doubling [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1017-1021.
贾富强, 薛庆华, 郑 权, 等. 全固态 LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1017-1021.
- 8 Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin, *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO₄ crystal [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(1): 11-16.
胡大伟, 王正平, 张怀金, 等. GdVO₄ 晶体的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2008, 35(1): 11-16.
- 9 Jia Peng, Zhang Xingyu, Wang Qingpu, *et al.*. Laser diode-pumped Nd: YVO₄ self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(10): 1309-1313.
贾 鹏, 张行愚, 王青圃, 等. 激光二极管抽运的自拉曼 Nd: YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1309-1313.
- 10 Gao Lanlan, Tan Huiming, Wang Wei, *et al.*. LD pumped Nd: YVO₄ CW three-wavelength laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1749-1753.
高兰兰, 檀慧明, 王 巍, 等. LD 抽运 Nd: YVO₄ 连续 3 波长激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1749-1753.
- 11 Y F Chen, S W Tai, S C Wang, *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.
- 12 Yanmin Duan, Haiyong Zhu, Chenghui Huang, *et al.*. Potential sodium D₂ resonance radiation generated by intra-cavity SHG of a c-cut Nd: YVO₄ self-Raman laser [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 6333-6338.
- 13 W Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Trans. Beijing: Science Press, 2002.
W 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002.
- 14 Shi Shunxiang, Wang Xue'en, Liu Jinsong, *et al.*. *Physical Optics and Applied Optics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松, 等. *物理光学与应用光学*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- 15 S Singh, R G Smith, L G Van Uitert. Stimulated emission cross-section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminium garnet at room temperature [J]. *Phys Rev B*, 1974, 10(6): 2566-2572.
- 16 C Y Li, Y Bo, J L Xu, *et al.*. Simultaneous dual-wavelength oscillation at 1116 and 1123 nm of Nd: YAG laser [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(19): 4574-4576.

栏目编辑: 张 腾