第 43 卷 第 10 期
2016 年 10 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 43, No. 10
October, 2016

全固态双共振 KTP Ⅱ 类相位匹配腔内和频 578 nm 黄激光器

杨建明[1,2,3] 檀慧明[1] 田玉冰[1] 姚文明[1] 马刚飞[1,3]
鞠乔俊[1,4] 张 龙[1] 陈建生[1] 高 静[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]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033
[3]中国科学院大学，北京 100049
[4]南京理工大学电子工程与光电技术学院，江苏 南京 210094

摘要 提出了全固态双共振 KTP Ⅱ 类相位匹配腔内和频连续波 578 nm 黄光激光器，利用两种增益介质 Yb…YAG和 Nd…YAG 分别得到 1030 nm 和 1319 nm 基频谱线，通过 KTP Ⅱ 类临界相位匹配进行腔内和频实现了 578 nm 黄激光输出。实验中输出 578 nm 黄激光，同时输出 582 nm 和频光成分。通过光谱分析，该现象是由于 Nd…YAG晶体中对应能级跃迁为 $R_2 \rightarrow X_3$ 的 1338 nm 谱线起振，并与 1030 nm 谱线产生了和频作用。当 Yb…YAG和Nd…YAG的抽运功率分别为 10.3 W 和 3.7 W 时，得到 55 mW 的黄激光输出，并且在 30 min 内的功率稳定性优于 4.7%。利用格兰棱镜测量了基频光与和频光的偏振特性，结果表明，对于两个各向同性的激光晶体而言，谐振腔结构以及和频晶体的方位角均影响其相应基频光的偏振特性，两者均可使基频光的偏振方向向有利于和频作用的偏振方向改变。

关键词 激光光学；全固态激光器；腔内和频；Ⅱ 类相位匹配
中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A
doi: 10.3788/CJL201643.1001010

All-Solid-State Doubly Resonant Intracavity Sum-Frequency 578 nm Yellow Laser with KTP Type Ⅱ Phase Matching

Yang Jianming[1,2,3] Tan Huiming[1] Tian Yubing[1] Yao Wenming[1] Ma Gangfei[1,3]
Ju Qiaojun[1,4] Zhang Long[1] Chen Jiansheng[1] Gao Jing[1]

[1]*Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu* 215163, *China*
[2]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*
[3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
[4]*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu* 210094, *China*

Abstract An all-solid-state doubly resonant intracavity sum-frequency continuous-wave 578 nm yellow laser with

收稿日期：2016-06-07；**收到修改稿日期**：2016-07-19
基金项目：国家自然科学基金(61405236)、国家高技术研究发展计划(2015AA021106)、江苏省自然科学基金(BK20131170)、苏州市应用基础研究计划(SYG201404)

作者简介：杨建明(1988—)，男，博士研究生，主要从事全固态激光及非线性光学频率变换技术方面的研究。
E-mail: yjmlaser@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方面的研究。
E-mail: tanhm@ciomp.ac.cn
*通信联系人。E-mail: owengaojing@126.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

KTP type Ⅱ phase matching is studied. Two kinds of gain media, Yb…YAG and Nd…YAG, are used to generate spectral lines of the fundamental frequency at 1030 nm and 1319 nm. The 578 nm yellow laser output is achieved by intracavity sum-frequency with KTP type Ⅱ critical phase matching. It is found in the experiment that besides the output of the yellow laser at 578 nm, an output of sum-frequency yellow laser at 582 nm is found at the same time. By spectral analysis, the phenomena are ascribed to the oscillation of 1338 nm from the transition of $R_2 \rightarrow X_3$ in Nd…YAG crystal and the sum-frequency generation (SFG) between the wavelengths of 1030 nm and 1338 nm. When the pump powers of Yb…YAG and Nd…YAG are 10.3 W and 3.7 W respectively, the yellow laser with the output power of 55 mW is obtained. The power stability of the output laser is better than 4.7% within 30 min. By using a Glan prism, the polarization characteristics of the fundamental frequency light and the sum-frequency light are measured. The results show that for the two isotropic laser crystals, both the resonator structure and the azimuth angle of the SFG crystal have influence on the polarization characteristics of the corresponding fundamental frequency light, and both of them can change the polarization direction of the fundamental frequency light to the direction which benefits to the sum-frequency process.

Key words laser optics; all-solid-state lasers; intracavity sum-frequency; type Ⅱ phase matching

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.7300

1 引　言

波长 578 nm 位于氧合血红蛋白的第 3 个吸收峰的位置，使用 578 nm 激光照射病变部位时，色基氧合血红蛋白吸收光能量成为热源，红细胞遭到破坏，使病变部位的畸形血管阻塞、坏死，从而达到治疗目的。因此 578 nm 黄光激光器在血管性皮肤病治疗方面具有重要作用[1]。578 nm 黄激光的另一个重要的应用为对糖尿病引起的老年眼底视网膜黄斑病变的治疗。波长为 578 nm 的黄光位于人体血红蛋白吸收峰较强的位置，对叶黄素的吸收较低，因此利用 578 nm 的黄光激光可以治疗视网膜黄斑病变。此外，由于 578 nm 在 Yb 原子钟对应 $^1S_0 \rightarrow {}^3P_0$ 的跃迁能级，578 nm 激光器也广泛应用于光学原子钟方面的研究[2]。

目前，多种途径可以获得发射波长约为 578 nm 的黄光激光器。使用直接发射黄激光的材料（比如机固体染料[3]、铜蒸气、掺杂稀土离子激光晶体[4]等）是早期实现 578 nm 激光输出的主要方法。染料激光器和铜蒸气激光器均存在安全性差、工艺复杂、体积庞大等问题，限制了其在某些特殊条件下的应用。2012 年，Bowman 等[5]使用激光二极管抽运 Dy…YAG 单晶直接得到发射峰值约为 579 nm 的黄激光。由于掺杂 Dy^{3+} 材料的吸收峰位于蓝光或紫外波段，缺乏有效的抽运手段，难以得到高效的黄光输出。采用非线性频率变换技术成为目前产生 578 nm 黄光激光的常用方法。1999 年，Pask 等[6]将 Nd…YAG 和 $LiIO_3$ 分别作为激光晶体和拉曼晶体，实现波长为 1064 nm 的基频；对基频进行拉曼频移，得到波长为 1155 nm 的一阶斯托克斯拉曼光；使用三硼酸锂（LBO）晶体对基频进行腔内倍频，得到平均功率为 1.2 W 的 578 nm 高功率调 Q 脉冲激光。2011 年，Lee 等[7]使用周期极化铌酸锂波导（WG-PPLN）对半导体激光器发射的 1156 nm 激光直接倍频得到功率大于 10 mW 的 578 nm 激光输出。2010 年，Hosaka 等[8]利用脊型 WG-PPLN 对 Nd…YAG 激光器和Yb…YAG激光器发射的 1319 nm 和 1030 nm 激光进行腔外和频，得到功率为 150 mW、波长为 578 nm 的激光输出。2014 年，Kantola 等[9]利用光泵半导体技术与腔内倍频技术，得到 578 nm 波长附近的瓦级黄激光输出。

本课题组利用双共振腔结构，以 Yb…YAG 和 Nd…YAG 晶体作为增益介质，实现了 LBO Ⅰ 类相位匹配腔内和频 578 nm 黄激光[10]。当 Yb…YAG 和 Nd…YAG 的抽运功率分别为 10.3 W 和 3.7 W 时，获得黄激光的最高输出功率约为 37.5 mW。与 LBO Ⅰ 类临界相位匹配和频相比，Ⅱ 类临界相位匹配磷酸钛氧钾（KTP）晶体具有非线性系数大、发散角小等优点。本文通过 Ⅱ 类临界相位匹配 KTP 进行腔内和频，获得了最高输出功率为 55 mW 的连续波 578 nm 黄激光，计算了不同腔长条件下的腔内基频光束宽度，与相应的黄激光输出功率作比较，详细分析了 Ⅱ 类临界相位匹配时的基频光偏振特性。

2 实验方案

腔内和频 578 nm 黄激光的实验装置如图 1 所示。腔型采用双共振腔结构，两台抽运源均为光纤耦合的激光二极管阵列（LDA），LDA1 发射的中心波长为 940 nm，光纤芯径为 300 μm，数值孔径（NA）为 0.22。利

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用两个曲率半径为 50 mm 的 940 nm 全反镜将抽运光聚焦到 Yb…YAG 薄片晶体上进行四程抽运以实现 1030 nm 谱线振荡。Nd…YAG 的抽运源为 LDA2，中心波长为 808 nm，光纤芯径为 200 μm，数值孔径为 0.22。LDA2 发出的抽运光经过光纤耦合至准直聚焦镜，f_1 为准直镜焦距（$f_1=30$ mm），f_2 为聚焦镜焦距（$f_2=60$ mm），直径为 400 μm 的聚焦光斑注入 Nd…YAG 晶体。图中 d_1 为分束镜（M1）与 Yb…YAG 输入端面的距离，d_2 为 M1 与 Nd…YAG 输入端面的距离，d_3 为 M1 与平凹镜（M2）的距离（共用分臂长度）。

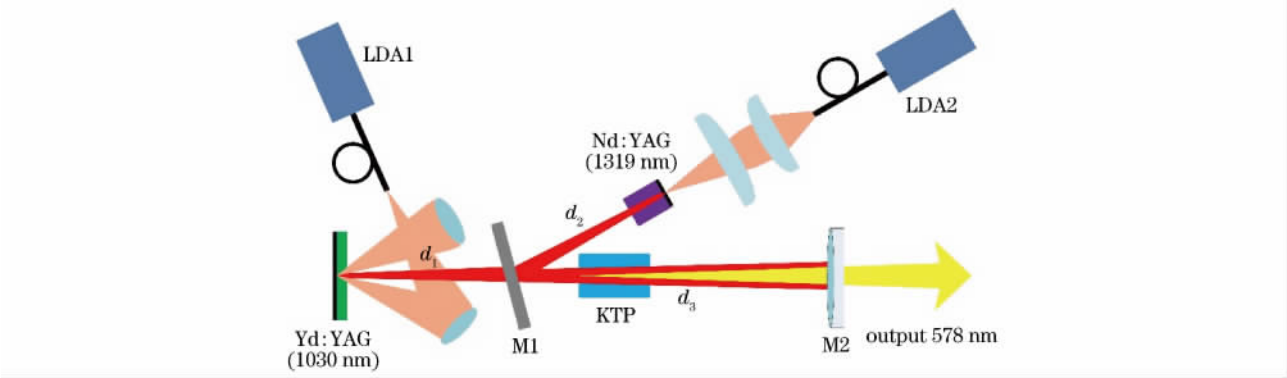

图 1　腔内和频 578 nm 黄激光实验装置

Fig. 1　Experimental setup of intracavitary sum-frequency 578 nm yellow laser

Yb…YAG 薄片晶体（晶体大小为 11 mm × 0.42 mm）的掺杂浓度为 10%（原子分数），端面镀有具有高透射率（T）或者高反射率（R）的膜。抽运端面镀有对 940 nm（$T>99.6\%$）和 1030 nm（$T>99.9\%$）的高透膜，水冷端镀有对 940 nm 和 1030 nm 的高反膜（$R>99.9\%$）。掺杂浓度为 1%的 Nd…YAG 晶体（晶体大小为5 mm×6 mm）抽运端面镀有对 808 nm 减反（$T>95\%$）、对 1319 nm 高反（$R>99.9\%$）的膜，另一端面镀有对 1319 nm 的减反膜（$T>99.8\%$）。和频晶体 KTP（晶体大小为 3 mm×3 mm×11 mm）按照对 1030 nm 和 1319 nm Ⅱ类临界相位匹配的方向 $\theta=90°$、$\varphi=4.8°$切割（θ 为波矢与非线性晶体光轴 z 的夹角，φ 为波矢在 xy 面上的投影与 x 轴的夹角）。两端镀有对波长 1030 nm、1319 nm和 578 nm 的减反膜。Nd…YAG 晶体和 KTP 晶体共同固定在制冷器（TEC）上，通过热敏电阻负反馈控制温度，温控精度为 0.1 ℃。

双共振腔由产生 1030 nm 振荡的直线腔和产生 1319 nm 的 V 型腔构成。Yb…YAG 的制冷端面与 Nd…YAG的抽运端面分别构成 1030 nm 与 1319 nm 的输入腔镜。分束镜由 1 mm 厚的石英玻璃制成。分束镜的一面对波长为 1030 nm、入射角度为 10°的 p 偏振入射光高透；另一面对波长为 1319 nm、入射角度为 10°的 s 偏振入射光高反，并对波长 1030 nm 的 p 偏振入射光高透；两面都镀有对波长 1064 nm 的减反膜，以抑制 Nd…YAG晶体的 1064 nm 谱线竞争。曲率半径为 200 mm 的 M2 作为输出镜，凹面镀有对1030 nm高反（$R>99.99\%$）、对 1319 nm 高反（$R>99.97\%$）、对 578 nm 增透的膜，平面镀有对 578 nm 减反（$T>96\%$）的膜。

3　实验结果及讨论

利用光线传输矩阵和稳定腔条件[11]，同时考虑抽运光利用率，并且尽量满足两基频光在 KTP 晶体中的充分交叠（要求两束基频光在交叠处的束宽相等），腔长设计如图 2 所示。黑色实线和黑色点划线分别为 $d_1=50$ mm、$d_1=70$ mm 时的 1319 nm 激光总腔长，红色实线和红光红色点划线分别为 $d_1=50$ mm、$d_1=70$ mm时的 1030 nm 激光总腔长，参考点腔镜 M2 位于横坐标 110 mm 处。理论上，非线性晶体中的基频光束宽越窄，光功率密度越高，和频效率越高。进行初步实验时，由于受到机械装置的空间限制，d_1 最短为 70 mm，设计 1030 nm 的振荡腔长为 110 mm，1319 nm 的振荡腔长为 83 mm，共用分臂长度$d_3=40$ mm，如图 2 中虚线部分所示，此时 KTP 位置的束宽半径约为 230 μm。改进装置后，d_1 可缩短为50 mm，d_2 可缩短为 24 mm，如图 2 中实线部分所示，此时 KTP 位置的束宽半径约为 210 μm。

两种腔长设计得到的和频黄激光的输出功率如图 3 所示。和频光输出功率随 Yb…YAG 抽运功率的变化较为平缓，接近线性。这一现象符合和频过程小信号近似理论中功率与两基频光功率的乘积成正比的表述[12]。两种腔长的黄激光总阈值功率均约为 2.5 W，Yb…YAG 与 Nd…YAG 对应的抽运功率分别为 2 W

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和 0.5 W。比较两种腔长设计，得到短腔长的黄激光输出功率优于长腔长。当 Yb…YAG 的抽运功率为 10.3 W、Nd…YAG 的抽运功率为 3.7 W 时，$d_1=50$ mm 对应的结构得到的黄激光输出最高功率为55 mW，与 $d_1=70$ mm 的结构相比，输出功率提高了 28%。当黄光输出功率最高时，两抽运光功率相差很多，出现此现象的原因可归结为两点：1) 1030 nm 谱线跃迁属于 Yb…YAG 晶体的准三能级系统[13]，存在受激发射截面小和再吸收的缺陷[14]；2) 1030 nm 激光谐振腔引入约为 0.2%的分束镜插入损耗。当 Nd…YAG 的抽运功率为 3.7 W 时，随着 Yb…YAG 的抽运功率的增加，黄光的输出功率也增加；当 Yb…YAG 的抽运功率超过10.5 W时，黄光的输出功率开始下降。产生这种现象的原因可能是 1319 nm 的基频光光子耗尽以后出现逆转换，即当 1319 nm 的光子缺乏时，578 nm 的光子与 1030 nm 的光子差频转换效率高于1319 nm与1030 nm和频转换效率，引起 578 nm 黄光激光输出功率下降。由图 2 可知，$d_1=70$ mm 的谐振腔输出功率的下降比 $d_1=50$ mm 的谐振腔输出功率的下降更加明显，这是由于 $d_1=70$ mm 谐振腔在和频晶体内的功率密度低于 $d_1=50$ mm 谐振腔在和频晶体内的功率密度，因此 1319 nm 的基频光光子更容易耗尽。

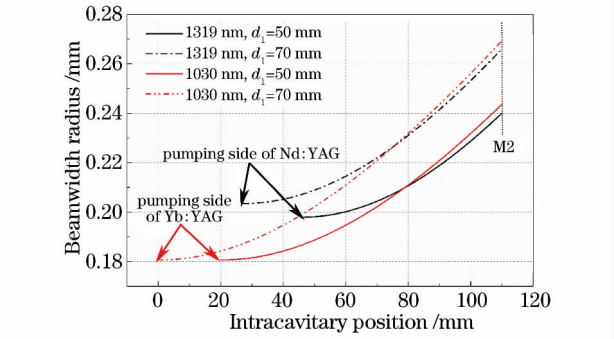

图 2　腔内不同位置的基频光束宽半径

Fig. 2　Beamwidth radii of fundamental frequency at different intracavitary positions

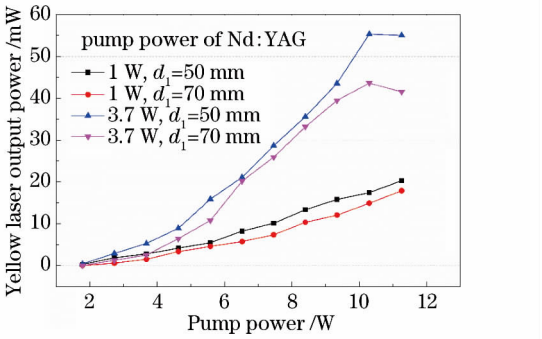

图 3　黄激光输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3　Relationship between yellow output power and pump power

调节谐振腔时，黄激光颜色经常出现微小变化，采用分辨率约为 1.1 nm 的光纤光谱仪(MayaPro2000，Ocean Optics 公司)测得的黄光光谱如图 4 所示。当黄激光输出功率为 55 mW 时，由图 4 的实线部分可以看出，输出的光谱成分由 578 nm 的主峰和极弱的 582 nm 的次峰构成。微调 KTP 的方位角时，谱线的峰值能量发生改变，黄激光输出功率下降。图 4 的虚线部分为黄激光输出功率约为20 mW的光谱分布，582 nm 处的峰值高于 578 nm 处的峰值。经计算分析，1338 nm 与 1030 nm 的和频光波长为 582 nm。对于 Nd…YAG 晶体，1338 nm 与 1319 nm 的受激发射截面接近，分别为0.92×10^{-19} cm^{2}和 0.87×10^{-19} cm^2[15]。对于如此相近的两条谱线，Nd…YAG 谐振腔镜膜系难以抑制1338 nm的谱线，因此推测 Nd…YAG 产生的激光同时包含 1319 nm 和 1338 nm 波长。使用分辨率约为 2 nm 的红外光谱仪(NIRQuest512，Ocean Optics 公司)测量 Nd…YAG 基频光输出光谱，结果如图 4 插图所示，证实了1338 nm振荡能量的存在，并与 1319 nm 形成增益竞争，此现象对 578 nm 激光的输出功率及稳定性产生影响。

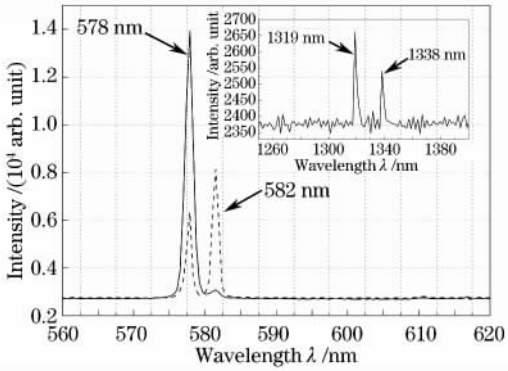

图 4　黄激光以及 Nd…YAG 激光(插图)光谱图

Fig. 4　Spectra of yellow laser and Nd…YAG laser (inset)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为了分析两种各向同性的增益介质产生的基频光在和频过程中的偏振特性，利用格兰棱镜研究和频光与基频光的偏振特性，如图 5 所示。进行图 5(a)、(b)的测量时，KTP 晶体的安装方位与图 6(a)、(b)测量时晶体的安装方位相对应，KTP 晶体的 o 光、e 光偏振方向以及腔形结构中的 p、s 偏振方向如图 6 所示。当格兰棱镜的方位角为 90°时，为 p 偏振方向；当格兰棱镜的方位角为 180°时，为 s 偏振方向。图 5(a)、(b)分别为 KTP 晶体方位角相差 90°时的测量结果。图 5(a)中黄光输出功率为 51 mW 的 578 nm 激光（偏振比p/s为 141/1）与 1030 nm激光（p 光与 s 光的偏振比为 119/1）均为 p 偏振，1319 nm 激光为部分偏振(s 光与 p 光的偏振比为 2.2/1)。理论上满足 KTP 晶体Ⅱ类相位匹配时，1319 nm 激光为 o 光，1030 nm、578 nm 激光为 e 光。当 KTP 晶体的方位角改变 90°时，微调谐振腔后得到黄光输出功率为 47 mW，此时 578 nm 激光的偏振方向转变为 s 偏振，1319 nm 激光仍为部分偏振，偏振比明显降低。由于 Nd…YAG 与 Yb…YAG 均为各向同性的激光晶体[16]，谐振腔微调后，Nd…YAG 产生的 1319 nm 激光偏振方向向有利于和频作用的 p 偏振方向改变。图 5(a)中 1319 nm 激光的 s 偏振分量功率与图 5(b)中 1319 nm 激光的 p 偏振分量功率均约为10 mW，即将 KTP 方位角旋转 90°后，1319 nm 激光参与和频作用，腔内功率密度变化不大；对于 1030 nm 激光，p 光与 s 光的偏振比为 12/1，偏振比有所下降，但仍具有较高的偏振度。这一现象可能是由于分束镜的插入及膜系对 1030 nm 的 s 偏振引入的损耗比对 p 偏振引入的损耗大。计算得到图 5(b)中参与和频作用的 1030 nm 激光的 s 偏振分量的腔内功率密度约为图 5(a)中 p 偏振分量的 1/15。由此可得，不仅谐振腔结构改变了基频光的偏振态，产生和频过程中，1030 nm 激光的 s 偏振分量的增益远大于 p 偏振分量，使 1030 nm 激光偏振方向进一步向有利于和频作用的方向改变。若通过选偏器件对腔内基频光的偏振进行选择，和频效率会进一步提高。

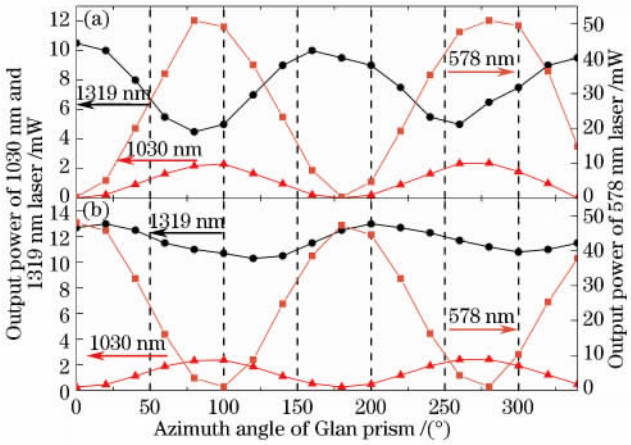

图 5　不同偏振条件下 578，1030，1319 nm 的激光输出功率随格兰棱镜方位角的变化。(a) KTP 晶体中 o 光偏振为 s 偏振方向；(b) KTP 晶体中 o 光偏振为 p 偏振

Fig. 5　Relationship between output powers of 578, 1030, 1319 nm laser and azimuth angles of Glan prism under different polarizations. (a) Polarization of ordinary light in KTP crystal is s polarization; (b) polarization of ordinary light in KTP crystal is p polarization

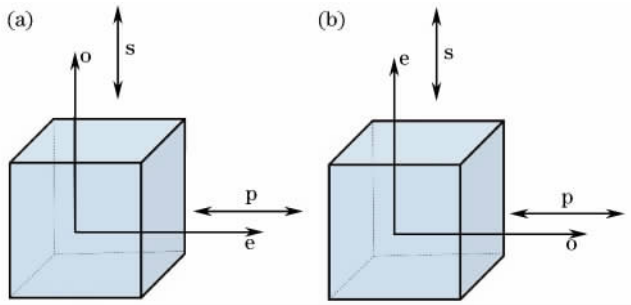

图 6　与图 5 对应的 KTP 晶体方位角。(a) KTP 晶体中 o 光偏振为 s 偏振；(b) KTP 晶体中 o 光偏振为 p 偏振

Fig. 6　Azimuth angles of KTP crystal corresponding to Fig. 5. (a) Polarization of ordinary light in KTP crystal is s polarization; (b) polarization of ordinary light in KTP crystal is p polarization

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

当黄激光平均输出功率为 50 mW 时，使用光束质量分析仪 M^2-200-FW(Ophir-Spircon 公司)测得的黄光光斑水平与垂直方向的激光束质量因子分别为 1.26 和 1.24；光束质量分析仪的运行时间在 30 min 以内测得的功率稳定性优于 4.7%，如图 7 所示。较大的功率波动主要是由于 1338 nm 和 1319 nm 的谱线竞争。

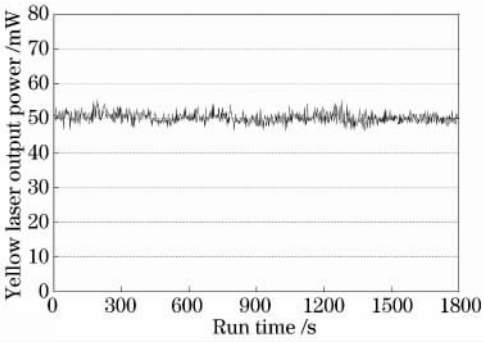

图 7　黄激光平均输出功率随分析仪运行时间的变化

Fig. 7　Relationship between average output power of yellow laser and run time of analyzer

4　结　　论

采用双共振腔型结构，通过两种增益介质 Yb…YAG 和 Nd…YAG 分别得到 1030 nm 和 1319 nm 基频谱线。利用 KTP Ⅱ类相位匹配腔内和频，实现了 578 nm 连续波黄激光输出。分析基频光在不同条件下的偏振特性，结果表明，谐振腔结构以及和频晶体的方位角均影响相应基频光的偏振特性，两者均可以使基频光的偏振方向向有利于和频作用的偏振方向改变。当 Yb…YAG 和 Nd…YAG 的的抽运功率分别为 10.3 W和 3.7 W 时，获得黄激光最高输出功率为 55 mW，转换效率较低。下一步实验拟采用增加折叠分臂的方案使和频晶体处两基频光的束宽进一步压缩，同时在腔内添加选偏器件，以提高和频效率。对于由 1338 nm 的起振引起的 582 nm 谱线竞争，可以使用标准具或双折射滤光片进行波长选择，从而实现单波长输出。

参　考　文　献

1　Lee H I, Lim Y Y, Kim B J, *et al*. Clinicopathologic efficacy of copper bromide plus/yellow laser (578 nm with 511 nm) for treatment of melasma in Asian patients[J]. Dermatol Surg, 2010, 36(6): 885-893.

2　Hong F L, Inaba H, Hosaka K, *et al*. Doppler-free spectroscopy of molecular iodine using a frequency-stable light source at 578 nm[J]. Opt Express, 2009, 17(3): 1652-1659.

3　Fukuda M, Kodama K, Yamamoto H, *et al*. Solid-state laser with newly synthesized pigment[J]. Dyes and Pigments, 2002, 53(1): 67-72.

4　Zhang S J, Cheng Z X, Zhuo Z, *et al*. Yellow laser potential at 585 nm of monoclinic $GdCa_4O(BO_3)_3$…Dy crystal[J]. Physica Status Solidi (a), 2000, 181(2): 485-490.

5　Bowman S R, O′Connor S, Condon N J. Diode pumped yellow dysprosium lasers[J]. Opt Express, 2012, 20(12): 12906-12911.

6　Pask H M, Piper J A. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2 W average power[J]. Opt Lett, 1999, 24(21): 1490-1492.

7　Lee W K, Park C Y, Yu D H, *et al*. Generation of 578 nm yellow light over 10 mW by second harmonic generation of an 1156 nm external-cavity diode laser[J]. Opt Express, 2011, 19(18): 17453-17461.

8　Hosaka K, Inaba H J, Nakajima Y, *et al*. Evaluation of the clock laser for an Yb lattice clock using an optic fiber comb [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2010, 57(3): 606-612.

9　Kantola E, Leinonen T, Ranta S, *et al*. High-efficiency 20 W yellow VECSEL[J]. Opt Express, 2014, 22(6): 6372-6380.

10　Yang J M, Tan H M, Tian Y B, *et al*. Generation of a 578 nm yellow laser by the use of sum-frequency mixing in a branched cavity[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1500607.

11　Yao Jianquan, Xu Degang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

姚建铨，徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. **北京：科学出版社**，2007.

12 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al*. Nonlinear optics[M]. 2nd ed. Xi′an: Xidian University Press, 2012: 139-141.

石顺祥，陈国夫，赵　卫，等. 非线性光学[M]. **2 版. 西安：西安电子科技大学出版社**，2012：139-141.

13 Liu Q, Fu X, Gong M, *et al*. Effects of the temperature dependence of absorption coefficients in edge-pumped Yb…YAG slab lasers[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(9): 2081-2089.

14 Taira T, Tulloch W M, Byer R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb…YAG lasers[J]. Appl Opt, 1997, 36(9): 1867-1874.

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

16 Liu Q, Liu J H, Gong M. Dual-rod, 100 Hz, 388 mJ nanosecond Nd…YAG oscillator[J]. Appl Opt, 2011, 50(8): 1186-1189.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net