

# LD泵浦Nd:YAG晶体双波长和频激光器

李恬媛, 高兰兰, 钱喆晔, 井志远

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月29日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月29日

## 摘要

通过激光二极管(LD)泵浦Nd:YAG产生1064 nm、1319 nm、1338 nm基频光, 利用KTP晶体第二类相位匹配获得波长分别为589/593 nm的和频激光输出。从Nd:YAG晶体能级跃迁特性出发, 揭示了Nd:YAG作为工作物质可以产1319/1338 nm激光的可能性。通过非线性光学转换频率及相关理论, 分析了产生双波长和频输出的原理, 同时也为多波长激光器的研究提供了参考。

## 关键词

LD泵浦, 和频激光器, 双波长, Nd:YAG晶体, KTP晶体

# LD Pumped Nd:YAG Crystal Dual-Wavelength and Sum-Frequency Laser

Tianyuan Li, Lanlan Gao, Zheyue Qian, Zhiyuan Jing

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2024; published: May 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Laser diode (LD) pumps Nd:YAG to produce 1064, 1319, 1338 nm fundamental frequency light. The second type of phase matching of KTP crystal is used to obtain the sum-frequency laser output with wavelength of 589/593 nm. Based on the energy level transition characteristics of Nd:YAG crystals, the possibility that Nd:YAG can produce 1319/1338 nm laser as a working substance is revealed. By means of nonlinear optical conversion frequency and related theories, the principle of generating dual-wavelength and sum-frequency output is analyzed, which also provides a reference for the research of multi-wavelength lasers.

## Keywords

LD Pump, Sum-Frequency Laser, Dual-Wavelength, Nd:YAG Crystal, KTP Crystal

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全固态和频激光器因其更加宽泛的波长输出范围以及更高的输出转化频率, 被广泛应用于光通信、激光雷达、科学研究[1] [2] [3] [4]以及国防军事[5]等领域。近年来, 研究人员通过各种途径来获得高效的全固态黄光激光器。目前在固体激光器方面产生黄色激光的途径主要有: 能够直接发射黄光激光的固体材料、双波长和频、受激拉曼散射(SRS)效应和直接倍频红外波长。2004 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的贾富强等人[6], 理论上分析和计算了 Nd:YAG 激光器双波长同时运转时输出镜的透过率, 提出在 1064 nm 和 1319 nm 连续的双波长运转的前提下, 适当减小输出镜对增益较大谱线的透过率, 可以在腔内加入 I 类临界相位匹配的 LBO 获得更高的 589 nm 和频效率。2021 年 6 月, 中国运载火箭技术研究所冉子涵等人[7], 利用 LD 端面脉冲泵浦 Nd:YAG, LBO 晶体腔外倍频与和频, 产生 1064 nm、532 nm、355 nm 激光输出。

掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)是目前最常用的全固态激光器工作物质之一, 它( $\text{Nd}^{3+}$ )主要有 1050~1120 nm、870~950 nm、1310~1350 nm 三条谱线带[8]。这三条谱线带中主要的发射谱线为 1064 nm ( ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ )、1319 nm ( ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ ), 946 nm ( ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ )。在激发 1319 nm 激光时, 由于斯塔克能级分裂, 通常会伴随着相邻谱线 1338 nm 激光输出。1064 nm 的发射截面为  $8.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 1319 nm 的发射截面为  $1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 1338 nm 的发射截面为  $1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 其中 1064 nm 的发射截面最大, 是 1319/1338 nm 发射截面的 5 倍, 1064 nm 首先起振, 由于模式竞争会抑制 1319 nm 起振。

和频选用的 KTP 晶体是一种性能十分优秀的非线性晶体, 其具有允许角度大、透光波段宽、非线性系数大、走离角小等[9]优点, 加之其生产技术成熟, 价格相对较低, 且易储存, 使之成为了目前使用较多的非线性晶体。Nd:YAG 发射谱线较多, 本文通过在 Nd:YAG 晶体端面上镀具有高选择性的介质膜来调节谐振腔内损耗, 抑制部分 1064 nm 激光的起振, 使用 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体可以产生相对独立的 1064 nm、1319 nm、1338 nm 三束基频光, 通过 KTP 晶体非线性转化过程可以获得 589/593 nm 和频双波长激光输出。

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 激光二极管(LD)的中心波长为 808 nm, 它的最大输出功率为 4.6 W, 利用聚焦透镜 OC 对泵浦光进行光束整形、准直后入射到 M1。M1 作为 1064 nm 谐振腔的一个输入镜, 左端面镀膜: HT@808 nm, HR@1064 nm。右端面镀膜: AR@1064 nm。Nd:YAG (3 mm × 3 mm × 5 mm), 掺杂浓度 1at.%, 用铝箔包裹并且固定在一个铜槽中, 左端面镀膜: HT@808 nm, HR@1319 nm, 作为 1319 nm 谐振腔的一个腔镜, 右端镀膜: @HR@1064 nm/1319 nm。输出镜 M2 是曲率半径为 100 mm 的平凹镜, 凹面镀膜: HR@1064 nm/1319 nm, HT@589 nm, 平面镀膜: HT@589 nm。和频晶体 KTP (3 mm × 3 mm × 7 mm)采用 II 类临界相位匹配, 两端面均镀膜: HT@1319 nm/1064 nm/589 nm。LD 和谐振腔分别用半

导体致冷器(TEC1, TEC2)控制温度, 确保激光器稳定运行。

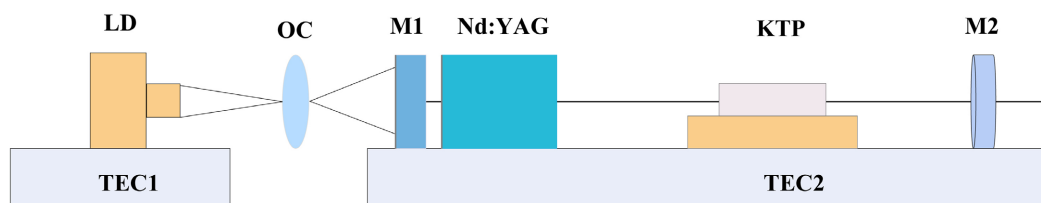


Figure 1. Experimental device diagram  
图 1. 实验装置图

### 3. 实验结果及理论分析

#### 3.1. Nd:YAG 产生双波长振荡的理论分析

Nd:YAG 的能级跃迁图[10], 如图 2 所示, 从图中可以看出每个能级跃迁谱线并不是固定的, 而是在一定波长范围内的, 即各能级存在着一定带宽。Nd:YAG 有 1050~1120 nm、870~950 nm、1310~1350 nm 三条谱线带。这三条谱线带中主要的发射谱线为 1064 nm ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ )、1319 nm ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ), 946 nm ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ )。其中  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  和  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  跃迁属于四能级系统, 阈值低, 是 Nd:YAG 主要的跃迁谱线。

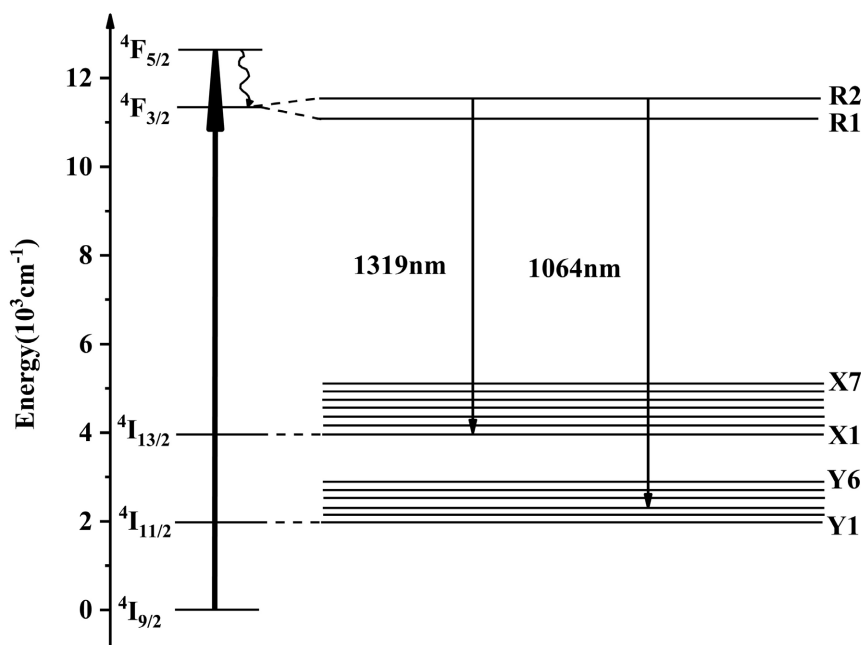


Figure 2. Energy level of Nd:YAG  
图 2. Nd:YAG 能级图

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  谱线带(1310 nm~1350 nm)的主要跃迁波长如表 1 所示。从表 1 [11]可以看出, 1319 nm 和 1338 nm 的受激发射截面均为  $1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 所以当 1319 nm 起振时, 1338 nm 波长也会随之出现。而其他波长由于受激发射截面相对较低, 阈值较大, 在 1319/1338 nm 起振后, 其他波长并不会发生振荡。1064 nm ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ )的受激发射截面为  $8.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  远大于 1319/1338 nm 的受激发射截面, 在正常的工作情况下, 1064 nm 首先起振, 由于模式竞争会抑制 1319 nm 起振。本文通过在 Nd:YAG 晶体端面上镀具有高选择性的介质膜, 抑制部分 1064 nm 激光的起振, 从而获得 1319 nm 激光的输出, 同时伴随 1338

nm 激光输出。

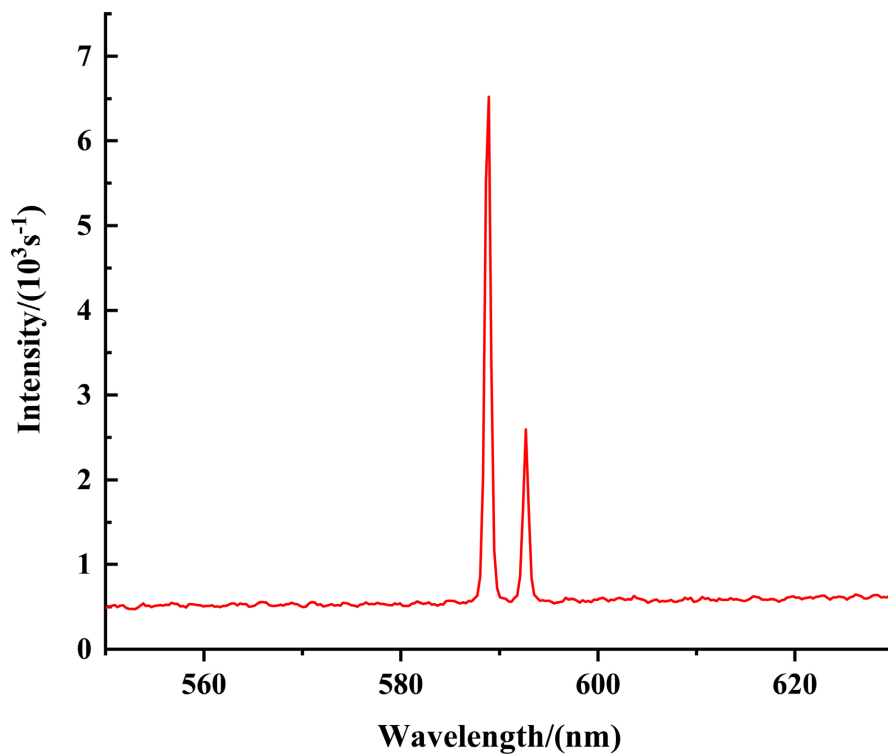
**Table 1.** Emission cross sections for the main transition wavelengths of the  ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{13/2}$  spectral band (1310 nm~1350 nm) of Nd:YAG

**表 1.** Nd:YAG 晶体  ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{13/2}$  谱线带(1310 nm~1350 nm)的主要跃迁波长的发射截面

波长/mm	受激发射截面/ $(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$
1319	1.5
1338	1.5
1335	0.92
1357	0.88
1353	0.35

### 3.2. 实验结果

使用 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体, 将 KTP 晶体放入谐振腔内, 并调整 KTP 晶体的角度, 在一定的角度下, 利用光谱仪观测光谱如图 3、图 4 所示。根据图 3 可以看出, 经 KTP 晶体和频后得到了两条激光谱线, 分别为 589 nm 和 593 nm。理论分析中 1319 nm 和 1338 nm 的受激发射截面相近, 所以当 1319 nm 起振时, 1338 nm 也会随之起振, 其他波长由于受激发射截面相对较低, 阈值较大, 因此并不会发生振荡。腔内非线性转换过程只有 1064 nm + 1319 nm 和频与 1064 + 1338 nm 和频产生 589/593 nm 和频双波长激光输出, 因此实验得到的光谱图与理论分析一致。光谱仪观测基频光的光谱, 得到的结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出 Nd:YAG 晶体有三条谱线起振, 波长分别为 1064 nm、1319 nm、1338 nm。



**Figure 3.** Spectrum of 589 nm sum-frequency optical

**图 3.** 和频光 589 nm 光谱图

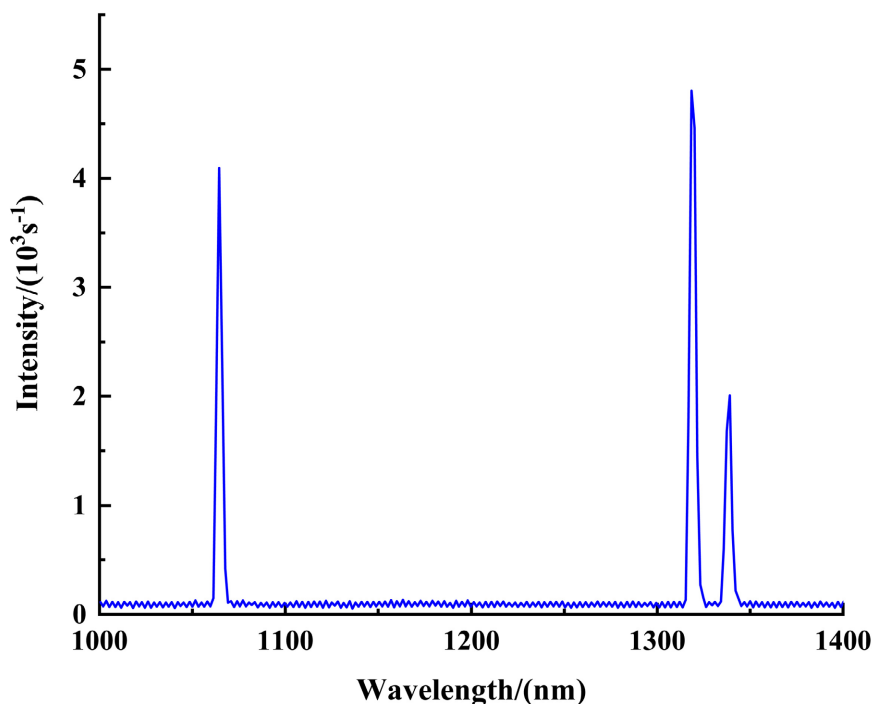


Figure 4. Spectrum of fundamental frequency  
图 4. 基频光光谱图

589 nm 和频光光谱如图 3 所示, 由图 3 中的谱线可以看出, 输出的光谱由 589 nm 的主峰和极弱的 593 nm 的次峰这两条谱线构成。经过计算分析, 1064 nm 与 1319 nm 和频输出光波长为 589 nm, 1064 nm 与 1338 nm 和频输出光波长为 593 nm。根据 Nd:YAG 晶体四能级系统可知, Nd:YAG 晶体发射谱线有很多条, 1319 nm 谱线发生斯塔克能级分裂形成 1338 nm 谱线, 1338 nm 和 1319 nm 的受激发射截面接近。由于这两条谱线非常相近, 且 Nd:YAG 谐振腔镜镀膜难以抑制 1338 nm 谱线起振, 因此推测 Nd:YAG 同时产生 1338 nm 和 1319 nm 这两个波长的激光。基频光光谱如图 4 所示, 能看到有 1064 nm、1319 nm、1338 nm 三条谱线, 验证了 1338 nm 激光的存在, 并与 1319 nm 激光形成增益竞争, 此现象会对 589 nm 激光的输出功率以及稳定性产生影响。

#### 4. 讨论

LD 泵浦 Nd:YAG 晶体, 得到的基频光波长为 1064 nm、1319 nm、1338 nm, 通过 KTP 晶体进行和频或倍频。图 5 是使用 SNLO 软件计算 KTP 晶体 II 类相位匹配 1064 + 1319 nm 和频, 1064 + 1338 nm 和频, 1319 + 1338 nm 和频, 1319 nm 倍频, 1338 nm 倍频, 1064 nm 倍频这几种非线性频率变换过程的最佳相位匹配角。各和频与倍频的相位匹配方向如图 6 所示:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$  分别代表 1064 nm + 1319 nm 和频, 1064 nm + 1338 nm 和频, 1319 nm + 1338 nm 和频, 1319 nm 倍频, 1338 nm 倍频, 1064 nm 倍频的相位匹配方向。此时上述 6 个非线性变换过程的最佳相位匹配角, 非线性系数以及允许角度等相位匹配参数如表 2 所示。对于其他和频和倍频情况, 由于基频光入射角度远远超过了其最大允许角度, 无法实现非线性变化过程, 无法输出其所对应的和频或倍频光, 最终只有 589/593 nm 两束和频光输出。

非线性过程对应的相位匹配方向以及有效非线性系数, 如表 2 所示。从表 2 可以看出, 1064 nm + 1319 nm 和频( $\theta = 78.5^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )与 1064 nm + 1338 nm 和频( $\theta = 78.1^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )的最佳相位匹配角十分相近, 仅相差  $0.4^\circ$ 。如果基频光沿( $\theta = 78.3^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )入射时, 基频光注入角度均在二者的允许角度范围之内( $3.62/0.5 \text{ mrad} =$

7.4 rad = 0.43°), 且两者的非线性系数与最佳相位匹配角下的非线性系数( $d_{eff} = 3.71$  pm/V, 3.69 pm/V)基本相同, 上述两种非线性转换过程可能同时存在。

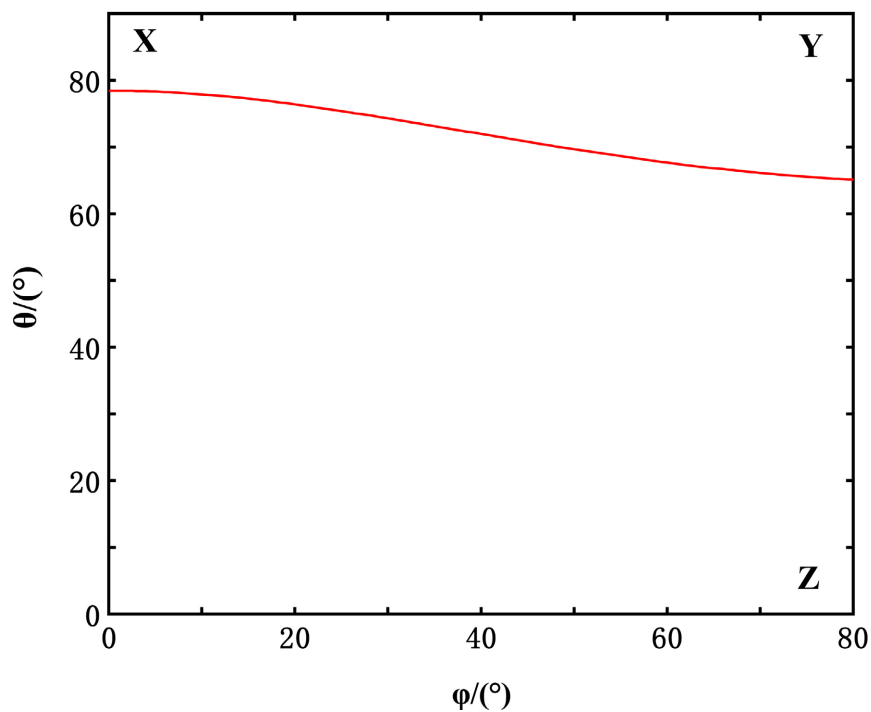


Figure 5. Phase matching angle of KTP for nonlinear processes

图 5. KTP 晶体非线性过程的相位匹配角

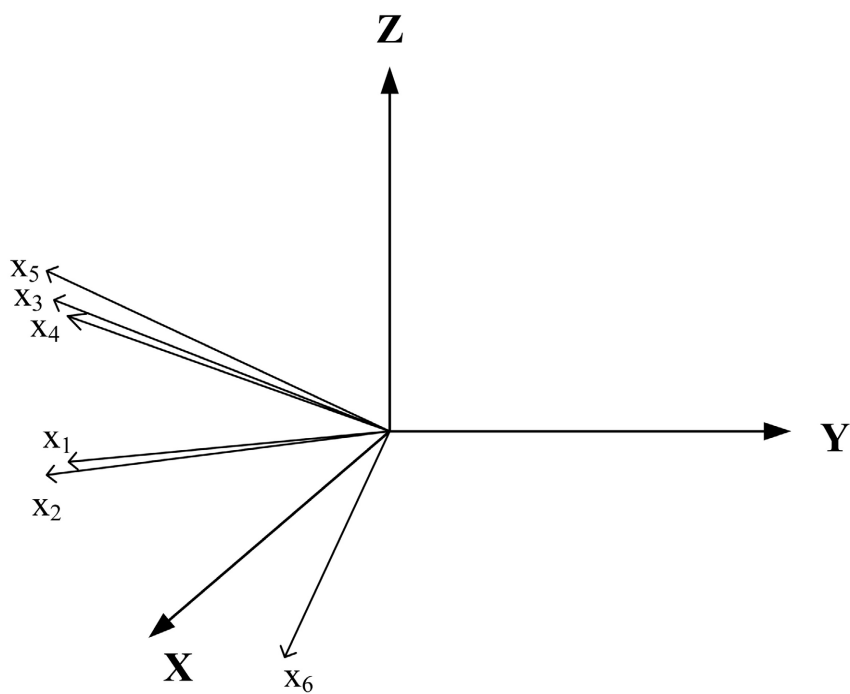


Figure 6. Phase matching of KTP for nonlinear processes

图 6. KTP 晶体的非线性过程相位匹配角

**Table 2.** Phase matching parameters for KTP crystal  
**表 2.** KTP 晶体的相位匹配参数

SFM/SHG	Phase match angle ( $\theta, \varphi$ )	$d_{eff}$ (pm/V)	Mix accept angle (mrad·cm)
1064 (o) + 1319 (e) = 589 (o)	( $\theta = 78.5^\circ, \varphi = 0^\circ$ )	3.71	3.62
1064 (o) + 1338 (e) = 593 (o)	( $\theta = 78.1^\circ, \varphi = 0^\circ$ )	3.69	3.56
1319 (o) + 1338 (e) = 664 (o)	( $\theta = 59.7^\circ, \varphi = 0^\circ$ )	3.11	1.71
1319 (o) + 1319 (e) = 659 (o)	( $\theta = 59.8^\circ, \varphi = 0^\circ$ )	3.12	1.68
1338 (o) + 1338 (e) = 669 (o)	( $\theta = 59.0^\circ, \varphi = 0^\circ$ )	3.08	1.69
1064 (o) + 1064 (e) = 532 (o)	( $\theta = 90.0^\circ, \varphi = 0^\circ$ )	3.58	62.62

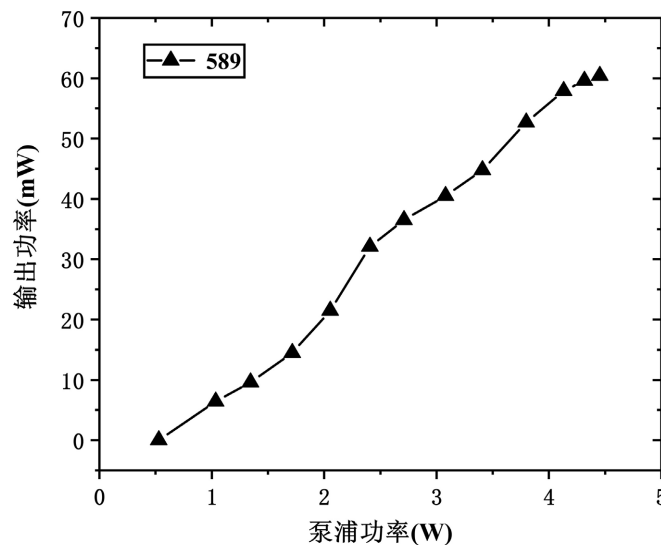
根据相位匹配和非线性光转换频率公式[12] [13]:

$$\eta \propto \left( \left| \frac{\sin(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2} \right| \right)^2 \quad (1)$$

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

式中  $\Delta k$  为相位匹配量,  $n_3$  为和频光在和频晶体中的折射率,  $n_i$  ( $i=1,2$ ) 为基频光在和频晶体中的折射率。当基频光以( $\theta = 78.3^\circ, \varphi = 0^\circ$ )入射时, 由上述公式可知, 1064 nm + 1319 nm 和频, 1064 nm + 1338 nm 和频的相位因子的平方值分别为 79%和 77%, 在忽略其他因素时, 二者和频转换效率基本相同, 即经 KTP 晶体和频后可以产生 589/593 nm 和频激光输出。对于其他和频和倍频情况, 由于基频光入射角度远远超过了其最大允许角度, 无法实现非线性变化过程, 无法输出其所对应的和频或倍频光, 最终只有 589/593 nm 两束和频光输出。

通过放入和频晶体 KTP 获得 589/593 nm 和频光输出, 从功率曲线可以看出, 和频光随着泵浦功率增加的输出功率曲线如图 7 所示。589/593 nm 激光的输出光功率为 530 mW, 随着泵浦功率的逐渐增大, 输出激光的功率也逐渐增大, 当泵浦功率为 4.6 W 时, 测得 589/593 nm 激光器的输出功率为 60.4 mW。



**Figure 7.** 589/593 nm sum-frequency optical output power  
**图 7.** 589/593 nm 和频光输出功率变化曲线



## 5. 总结

本文利用 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体, 通过插入 KTP 和频产生 589/593 nm 激光输出的实验。由于 1064 nm + 1319 nm 和频与 1064 + 1338 nm 和频的最佳相位匹配角相近, 转换效率基本相同, 因此产生 589/593 nm 和频激光输出, 本文得到的实验光谱图与理论分析一致。本文实验结果表明: Nd:YAG 发射谱线较多, 对于波长相近的谱线, 通过改变和频非线性转换效率可以得到双波长振荡, 利用选择性介质膜调节谐振腔内损耗, 可以产生相对独立的三束基频光, 因此利用 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体是实现多波长激光器的有效方法。同时利用允许角度范围较大的 KTP 晶体实现非线性转化过程可以获得和频双波长激光输出。本论文研究内容为实现多波长基频光激光器或谐波激光器提供了一定的参考。

## 参考文献

- [1] 张增明, 姚焜, 齐开国, 等. 波长 1320 nm 的 Nd<sup>3+</sup>:YAG 锁模脉冲激光器[J]. 量子电子学报, 1999(1): 47-49.
- [2] 董啸岳, 刘爽, 秘国江, 等. 1116 nm 单频脉冲 Nd:YAG 激光器[J]. 光子学报, 2024, 53(1): 20-29.
- [3] 夏媛. 全固态钠层风温探测激光雷达关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [4] 尤威, 杨学宗, 陈卫标, 冯衍. 589 nm 激光钠导星技术研究综述(特邀) [J]. 光电技术应用, 2021, 36(5): 1-14+22.
- [5] 王浩宇. 基于 Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG/YAG 键合晶体双波长拉曼激光及 578.5 nm 黄光激光研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2021.
- [6] 贾富强, 卜铁坤, 郑权, 薛庆华, 谭成桥. LD 泵浦腔内和频连续 589 nm 黄光激光器[J]. 激光与红外, 2004(6): 439-441.
- [7] 冉子涵, 赵一鸣, 李静, 李之通, 李祚涵. LD 端面泵浦千赫兹多波长激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 229-235.
- [8] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002: 44-47.
- [9] 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): 87-91.
- [10] 杨博达. 多波长 LDAs 脉冲泵浦 Nd:YAG 激光器[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [11] 马毅, 王卫民, 庞毓, 等. Nd:YAG1319nm 三纵模脉冲激光器设计分析[J]. 强激光与粒子束, 2005(S1): 151-154.
- [12] 邵志强, 高兰兰, 张辰. 全固态 561nm 倍频激光器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 107-111.
- [13] 姚建铨, 徐德刚. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.