

全固态窄脉冲523.5 nm微型激光器的研究

李 权, 金秦隆, 程 成, 曾文博, 马雪欢, 杨禹霖, 肖 倍, 刘国军, 乔忠良,
曲 轶*

海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省院士团队创新中心, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2023年2月24日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

摘 要

文章介绍了微型LD端面泵浦的窄脉冲Nd:YLF激光器。采用透过率为70%的Cr:YAG晶体作为被动调Q晶体, 在泵浦功率为5 W, 1.33 kHz的重复频率下, 得到脉冲能量150 μ J的1047 nm基频光输出, 再通过LBO腔外倍频, 最终实现脉宽为2 ns, 脉冲能量为67.7 μ J的523.5 nm脉冲激光输出。

关键词

全固态激光器, 端面抽运Nd:YLF, 523.5 nm窄脉冲激光器

Study on All Solid State Narrow Pulse 523.5 nm Micro Green Laser

Quan Li, Qinlong Jin, Cheng Cheng, Wenbo Zeng, Xuehuan Ma, Yulin Yang, Bei Xiao,
Guojun Liu, Zhongliang Qiao, Yi Qu*

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Academician Team Innovation Center of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Feb. 24th, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

In this paper, a micro LD end pumped Nd:YLF laser with narrow pulse is described. Using Cr:YAG crystal with transmit ability of 70% as passive Q-switched crystal, the pulsed optical output power of the 1047 nm fundamental is 150 μ J with a pump power of 5 W and a repetition frequency of

*通讯作者。

文章引用: 李权, 金秦隆, 程成, 曾文博, 马雪欢, 杨禹霖, 肖倍, 刘国军, 乔忠良, 曲轶. 全固态窄脉冲 523.5 nm 微型激光器的研究[J]. 光电子, 2023, 13(1): 36-42. DOI: 10.12677/oe.2023.131005

1.33 kHz. Then, a laser at 523.5 nm with a pulse width of 2 ns and pulse energy of 67.7 μJ is finally achieved by LBO external cavity frequency doubling.

Keywords

All-Solid-State Laser, End Pumped Nd:YLF, 523.5 nm Narrow-Pulse Laser

Copyright © 2023 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

LD 端面泵浦的窄脉冲绿光微型激光器具有结构紧凑、体积小、重量轻、重复频率高、脉冲窄、峰值功率高等优点，在激光雷达、激光微加工、遥感监测、非线性频率转换、三维成像、光通信、医疗等领域有着广泛的应用前景[1] [2] [3]。通过泵浦 Nd:YAG 和 Nd:YLF 晶体产生 1047 nm (π 偏振)和 1053 nm (σ 偏振)的激光输出，再进行二次倍频是获得绿光输出的有效方法。由于窄脉冲绿光激光器的广泛应用，国内外许多科研人员都对 523.5 nm 全固态激光器进行过深入的研究。1992 年，霍玉晶等人率先用 LD 泵浦 Nd:YLF 晶体实现 5.2 mW 的 1047 nm 输出，通过 MgO:LN 晶体腔内倍频实现了 0.46 mW 的 524 nm 脉冲输出[4]。2008 年，Daijun Li 等人研究了基于临界腔的 523 nm 大能量激光器，获得的激光能量为 15.1 mJ，脉宽为 7.1 ns [5]。2015 年，Qi Yang 等人采用 MOPA 技术实现了 520 mJ 的高能量 523.5 nm 激光输出[6]。微型窄脉冲的 523.5 nm 的绿光激光在激光雷达，激光微加工等领域有重要应用[7]，但关于 523.5 nm 脉冲激光器的研究大多集中在大能量激光方面的研究，关于窄脉冲的 523.5 nm 的微型激光器研究较少，因此本文着重研究微型窄脉冲绿光激光器。在调 Q 方面，被动调 Q 体积小，成本低，操作方便，更易实现激光器的小型化，且被动调 Q 无需外电路控制，对激光电源和外电路控制的要求小，更易于实现集成化，由于调 Q 晶体尺寸小，可将脉宽压缩到很短，更易实现窄脉宽，高功率。在激光晶体方面，由于 Nd:YLF 的上能级寿命较长为 480 μs ，约为 Nd:YAG 上能级寿命的 2 倍，利于获得更窄脉冲输出[8]；同时 Nd:YLF 具有较低的热效应，利于获得高功率输出。因此泵浦 Nd:YLF 晶体，采用被动调 Q 进行倍频是实现高功率，窄脉冲 523.5 nm 激光输出的有效方法。

本文通过半导体激光端面泵浦 Nd:YLF 晶体产生 1047 nm，并采用饱和吸收晶体 Cr:YAG 晶体实现窄脉冲激光输出，在腔外用 I 类相位匹配 LBO 晶体实现倍频，最终得到脉宽为 2 ns，脉冲能量为 67.7 μJ 的 523.5 nm 窄脉冲绿光激光输出，倍频转换率为 45%。

2. 理论分析

2.1. 激光晶体的选取

为了得到高功率的 1047 nm 激光，选用 a 切割的 Nd:YLF 晶体。

用 808 nm 半导体激光器做光源直接照射掺杂浓度为 1.0% 的 a-cut Nd:YLF 晶体，ANDO AQ-6315A 光谱分析仪得到的发射谱如图 1 所示[9]。

由图 1 可以知，1.0 μm 辐射波长有两种： π 偏振光 1047 nm 和 σ 偏振光 1053 nm，对应 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 跃迁，其中 1047 nm 光的强度最大。1047 nm 的受激发射截面($1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)是 1053 nm ($1.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)

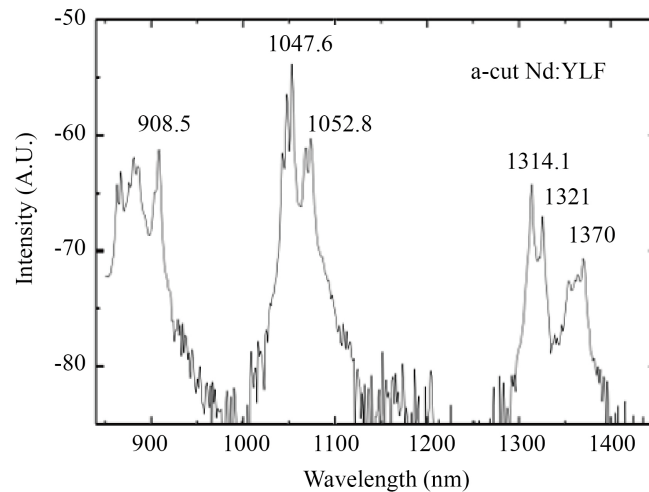


Figure 1. Emission spectrum of Nd:YLF crystal
图 1. Nd:YLF 晶体发射谱

的 1.5 倍。因此，采用 a 轴切割晶体的激光谐振腔，增益最大时的输出是 1047 nm 波长，可以通过腔内加入布儒斯特片、将晶体切成布儒斯特角或倾斜腔镜的方法选择 1053 nm 输出。晶体在 1.3 μm 附近还有两个发射峰，是 π 偏振光 1321 nm 和 σ 偏振光 1313 nm，对应 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁。在 0.9 μm 附近也有发射峰 908 nm，对应 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 跃迁。晶体在 1.3 μm 和 0.9 μm 波长处的辐射强度都明显低于 1.0 μm 处的，所以，最容易实现激光输出的是 1.0 μm，要获得 1.3 μm 和 0.9 μm 输出，必须采用一定的选频措施，抑制 1.0 μm 振荡。从图 1 中还可以看出，晶体在 1370 nm 还有一条发射谱线，但对应这一波长的受激发射截面很小，不容易实现激光振荡，通常不予考虑[9]。

2.2. 倍频晶体选取

1047 nm 基频光二倍频至 523.5 nm 时，经 SNLO 软件模拟计算得出 LBO 晶体的相位匹配角度 $\theta = 90^\circ$ ， $\varphi = 12.4^\circ$ ，匹配方式为 I 类相位匹配，有效非线性系数为 0.83 pm/V，走离角为 7.52 mrad·cm。由于 LBO 晶体走离角小较，对光斑的尺寸影响较小；非线性系数高，有较高的光光转化效率；抗损伤阈值高等优点，根据上述优点选取 LBO 晶体作为倍频晶体。并根据相位匹配角度，对晶体进行切割并定制。

2.3. 被动调 Q 晶体选取

由于 Cr:YAG 晶体在 1 μm 附近有较宽的吸收峰，因此选取 Cr:YAG 晶体作为被动调 Q 晶体。考虑到被动调 Q 透过率对激光脉冲的影响[10]，分别选用两种透过率的 Cr:YAG 晶体，透射率分别为 70% 与 80%，进而分析了其对基频光脉冲的影响，从而选取最佳透过率，得到更高转换效率的倍频光。

3. 实验装置

本实验的实验装置如图 2 所示，图 2 中半导体激光波长为 808 nm，最高输出功率为 5 W。入射镜为非球面聚焦镜，焦距为 6 mm，聚焦后焦点光斑直径约为 200 μm。为增大泵浦光透过率提高泵浦效率，聚焦镜双端镀有 808 nm 的增透膜，透过率大于 99.9%。Nd:YLF 晶体掺杂离子浓度为 1%，尺寸为 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ 。Nd:YLF 晶体左端入射面镀有 808 nm 的增透膜和 1047 nm 的高反膜，右端出射面镀有 1047 nm 的增透膜。Cr:YAG 被动调 Q 晶体尺寸为 $3 \times 3 \times 2 \text{ mm}^3$ ，两端镀有 1047 nm 的增透膜。为提升谐振腔稳定性，选取平-凹镜作为输出镜，输出镜曲率半径为 100 mm，输出镜 1047 nm 透过率为 10%。LBO 倍

频晶体采用 I 类相位匹配, 其切割角度为 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 21.7^\circ$ 。523.5 nm 滤光片是吸收型滤光片, 可以吸收红外波段的激光, 从而得到 523.5 nm 激光输出。为压缩谐振腔腔长, 紧贴放置激光晶体、调 Q 晶体和输出镜, 整体谐振腔长为 6 mm。

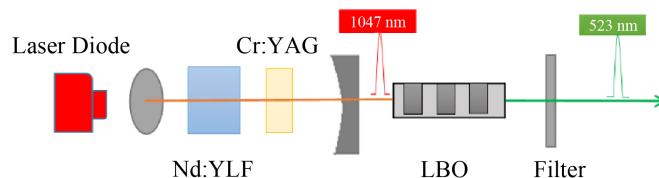


Figure 2. 523.5 nm experimental device diagram

图 2. 523.5 nm 实验装置图

4. 实验结果与分析

为得到较高能量及峰值功率的基频光, 分别选取 70% 与 80% 两种不同透过率的 Cr:YAG 晶体进行对比实验。得到基频光 1047 nm 输出的平均功率, 单脉冲能量, 峰值功率与泵浦功率的关系图 3~5 所示。由图可知基频光输出平均功率、单脉冲能量、峰值功率与泵浦功率均为线性关系, 即泵浦功率越高, 基频光的平均功率、单脉冲能量、峰值功率越高。通过比较不同透过率的 Cr:YAG 晶体对应的输出情况可知, 透过率较高的 Cr:YAG 晶体可以得到较高的平均功率, 而透过率较低的 Cr:YAG 晶体可以得到较高的单脉冲能量与峰值功率。这是因为透过率越低的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, Cr^{4+} 掺杂浓度越高, 其饱和损耗越大, 需要更多的能量才能使基态漂白, 而更高的能量又导致更强的激发态吸收, 其脉冲能量、峰值功率都会更大。

图 6 是 523.5 nm 输出功率与泵浦功率的关系图。从图 6 中可以看出, 倍频光输出功率与泵浦功率呈线性关系, 泵浦功率越高, 得到倍频光的功率越高, 透过率较低的 Cr:YAG 晶体可以得到较高功率的 523.5 nm 的倍频光, 由此可以得出影响倍频效率的主要因素是基频光的单脉冲能量与峰值功率, 而平均功率不起到决定性的作用。这是因为基频光的单脉冲能量和峰值功率越高, 其功率密度 ($\frac{P_{\omega}}{A}$) 也越高, 而

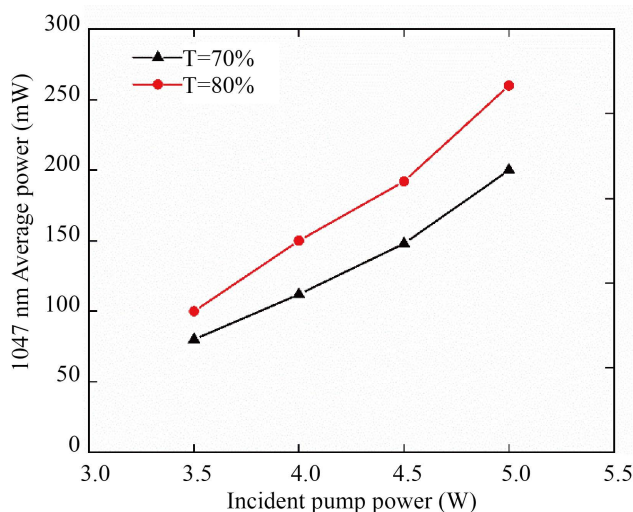


Figure 3. Variation of average output power at 1047 nm with pump power

图 3. 1047 nm 平均输出功率随泵浦功率的变化

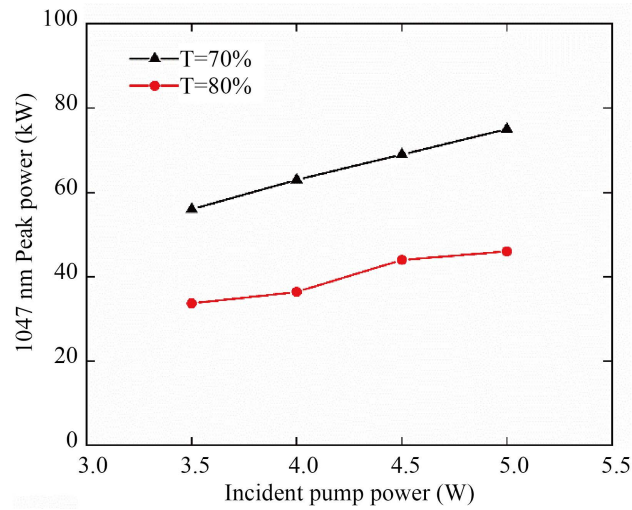


Figure 4. Relation between output single pulse energy and pump power

图 4. 输出单脉冲能量与泵浦功率的关系

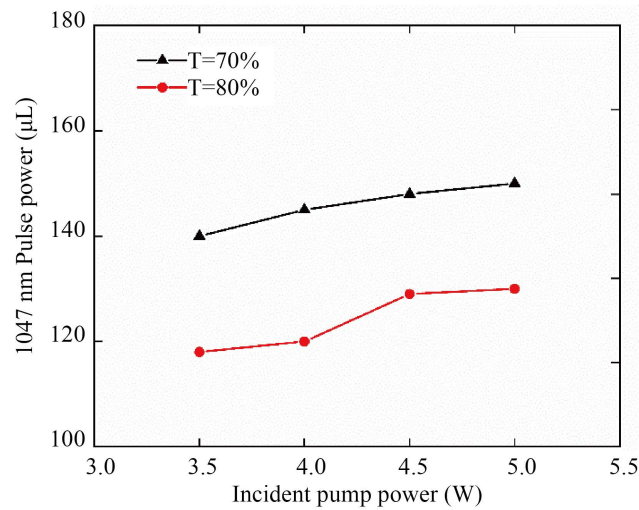


Figure 5. Relation between output peak power and pump power

图 5. 输出峰值功率与泵浦功率的关系

倍频效率与基频光的功率密度成正比。

产生二次谐波的效率可表示为[11] [12]:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[l_c K^{1/2} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \text{sinc} \left(\frac{l_c \Delta k}{2} \right) \right], k = 2\eta_0^3 \frac{v_{\omega}^2 d_{\text{eff}}^2}{(n^{\omega})^2 n^{2\omega}} \quad (1-1)$$

其中, $P_{2\omega}$ 和 P_{ω} 分别是基频光和倍频光的功率; l_c 是非线性晶体的长度; A 是基频光在非线性晶体中的截面积; $n^{2\omega}$ 和 n^{ω} 代表了基频光和倍频光在非线性晶体中的折射率; d_{eff} 是非线性晶体的有效非线性系数; $\eta_0 = \sqrt{u_0/\epsilon_0 \epsilon} = 377/n_0$, 为平面波阻抗; Δk 是基频光和倍频光在非线性晶体中的相位匹配。

由式(1-1)可以看出, 倍频效率 η_{SHG} 与基频光的功率密度 (P_{ω}/A) 成正比。在 5 W 泵浦功率下, 利用透过率为 80% 的 Cr:YAG 晶体进行调 Q, 得到 1047 nm 基频光输出功率为 260 mW, 倍频光 523.5 nm 的功

率为 78 mW, 倍频效率为 30%。透过率为 70% 的 Cr:YAG 晶体调 Q, 得到 1047 nm 基频光输出功率为 200 mW, 倍频光 523.5 nm 的功率为 90 mW, 倍频效率为 45%。使用海洋公司的 HR4000 光谱仪测得 523.5 nm 的光谱图如图 7 所示。使用 Thorlab 公司生产的 DET02AFC 探测器测得 523.5 nm 的脉宽图, 测试结果脉宽为 2 ns, 上升时间为 1 ns 左右。

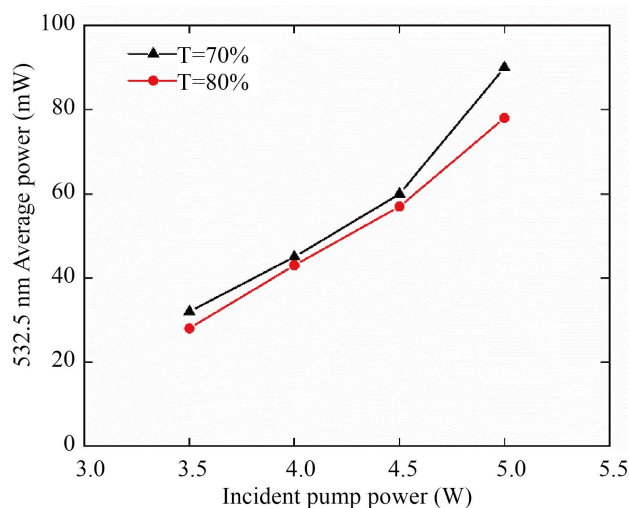


Figure 6. Relation between 523.5 nm output power and pump power
图 6. 523.5 nm 输出功率与泵浦功率的关系

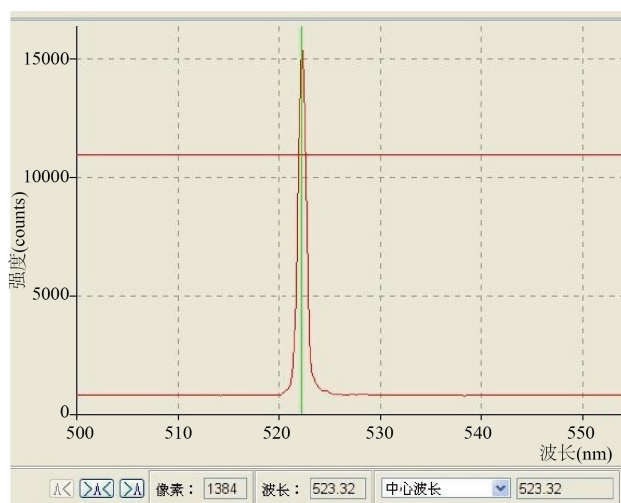


Figure 7. 523.5 nm laser output spectrum
图 7. 523.5 nm 激光器输出光谱图

5. 结论

本文研究了一种窄脉冲 523.5 nm 的被动调 Q 激光器, 用半导体激光端面泵浦 Nd:YLF 晶体产生 1047 nm 基频光, 并用 Cr:YAG 晶体作为该激光器的调 Q 晶体, 并分析了 70% 和 80% 两种不同透过率 Cr:YAG 调 Q 晶体对基频光平均功率、单脉冲能量、峰值功率的影响, 测量了 LBO 晶体倍频得到 523.5 nm 的平均功率, 分析影响倍频效率的因素, 采用透过率为 70% 的 Cr:YAG 晶体做为调 Q 晶体, 得到平均功率为 90 mW, 脉宽为 2 ns, 脉冲能量为 67.7 μ J 的 523.5 nm 激光输出, 成功研究出窄脉冲高能量的 TEM₀₀ 模

523.5 nm 激光输出, 可为激光微加工提供理想的光源。

基金项目

国家自然科学基金(62274048, 61864002, 61964007, 11764012); 海南省重点研发项目(ZDYF2020020, ZDYF2020036, ZDYF2020217); 海南省科技重大计划项目(ZDKJ2019005); 中国工程科技发展战略项目(No.19-HN-XZ-07); 海南省院士创新平台专项研究项目(YSPTZX202034); 海南省自然科学基金(519MS051, 121QN228, 120MS031, 618QN241); 海南省科研项目(hnky2020-24); 海南省研究生创新科研项目(hsyx2021-85, Qhys2021-327, Qhys2021-325)、海南师范大学大学生创新创业训练计划/海南师范大学大学生创新创业开放基金(榕树基金, 202211658002X, hscy2022-3, S202211658002X)。

参考文献

- [1] 王旭, 程光华, 等. LD 泵浦被动调 QYb:YAG 薄片激光器实验研究[J]. 光子学报, 2016, 45(3): 1-5.
- [2] Corkum, P.B., Brunel, F. and Sherman, N.K. (1998) Thermal Response of Metals to Ultrashort Pulse Laser Excitation. *Physical Review Letters*, **61**, 2286-2289.
- [3] Abbas, H.S., Kren, C., Danicke, V., *et al.* (2020) Modeling and Temperature Control of Retinal Laser Therapy. *IFAC-Papers Online*, **53**, 16451-16456. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.733>
- [4] 霍玉晶, 张沁馨, 等. LD 泵浦的 Nd:YLF 激光器及倍频激光器[J]. 激光与红外, 1992, 22(3): 37-40.
- [5] Li, D.J., Ma, Z., *et al.* (2008) Diode-End-Pumped Double Nd:YLF Slab Laser with High Energy, Short Pulse Width, and Diffraction-Limited Quality. *Optics Letters*, **33**, 1708-1710. <https://doi.org/10.1364/OL.33.001708>
- [6] Yang, Q., Zhu, X.L., *et al.* (2015) High Energy 523nm Nd:YLF Pulsed Slab Laser with Novel Pump Beam Waveguide Design. *Optics Communications*, **354**, 414-418. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.06.022>
- [7] 郭秀明, 朱晓磊, 等. LD 抽运的 Nd:YLF/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 534-536.
- [8] 刘国宏. 全固态连续单频 Nd:YLF 激光器的研制[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2009.
- [9] 潘淑娣. Nd:YLF 晶体特性及全固态激光器研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2007.
- [10] 巩马理, 翟刚, 时顺森, 等. Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收特性测量[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 124-127.
- [11] Smith, R. (1970) Theory of Intracavity Optical Second-Harmonic Generation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **6**, 215-223. <https://doi.org/10.1109/JQE.1970.1076440>
- [12] Abbas, B. (2007) Optimization of Intracavity Q-Switched Laser Frequency Doubling. *Optics & Laser Technology*, **39**, 710-714. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2006.03.016>