

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 200424026

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

473nm 全固体蓝光激光器的研究

Study On 473nm All-Solid-State Blue Laser

刘孙丽

指导教师姓名: 蔡志平 教授

专 业 名 称: 光学

论文提交日期: 2007年5月

论文答辩时间: 2007年5月

学位授予日期: 2007年6月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2007年6月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

---

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密 ( ), 在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 ( )

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名:

日期: 年 月 日

导师签名:

日期: 年 月 日

---

## 摘 要

LD 泵浦全固体激光器(简称 DPSSL)是当前世界激光产业研究的热点之一。它正逐步取代一些传统激光器,成为目前发展最为迅速的激光器,广泛应用于材料加工、医疗、军事等领域。

LD 泵浦掺  $\text{Nd}^{3+}$  激光介质,腔内倍频全固体蓝光激光器已成为获得蓝光最有效、最具商业价值的方法,进而成为一个研究热点。但目前瓦级全固体蓝光激光器的研究还不成熟,本文在理论和实验上进行研究,对全固体蓝光激光器的产业化具有一定的参考价值。主要工作如下:

1. 介绍了 Nd:YAG 与 Nd:YVO<sub>4</sub> 的物理、光学特性,并比较它们准三能级跃迁的优、缺点,选取 Nd:YAG 作为激光介质,并对其激光特性进行详细的研究。介绍了能级理论,对 Nd:YAG 准三能级系统进行分析,提出 Nd:YAG 激光晶体的制冷控温是实现 946nm 激光的关键。
2. 介绍了倍频原理,指出提高倍频效率的方法。并对几种倍频晶体进行比较,选出较合适的倍频晶体 LBO。最后,介绍了 LBO 的物理、光学性质及 I 类相位匹配倍频过程。
3. 介绍了几种常用的谐振腔类型,采用 ABCD 传输矩阵求得腔内模式主要参量;指出腔体设计时应特别关注的两点。采用简易的平-平腔,测得不同泵浦功率下 Nd:YAG 晶体的热焦距,对腔体的设计具有一定的参考价值。
4. 设计了平-凹线性腔激光器,并对腔体进行分析,利用 LD 端面泵浦 Nd:YAG, LBO 腔内倍频,采用风冷系统,实现 1.6 W 的蓝光输出,光-光转化效率为 7.8%,为目前线性腔的最高输出功率;分析了实验的优点与不足之处。
5. 设计了 V 型折叠腔,并对腔体各参数进行分析与选定,实现 421mW 的蓝光输出。最后,对实验输出功率不理想的原因进行分析,提出了改进的方法。

**关键词:** Nd:YAG; LBO; 蓝光激光器;

---

## Abstract

At present, LD-pumped solid state lasers (DPSSL) have been developed as one of vital domain in laser field. Furthermore, DPSSL have gradually replaced the traditional laser, which is mainly attributed to its perfect development and its wide applications, such as material processing, medicine, military and so on.

LD-pumped  $\text{Nd}^{3+}$  lasers with intracavity frequency-doubling have proved to be a most efficient and commercial-potential way to achieve the blue laser emission and have attracted more and more attention in recently years. So far, however, the development is still not perfect in watt-level all-solid state blue laser. In this thesis, some theoretical and experimental investigation on continuous wave diode pumped intracavity doubling Nd:YAG blue laser at 473nm have been performed, which will be expected to be useful for commercializing such blue lasers.

This thesis is organized as follows:

1. For the very beginning, the physical and optical characteristics of Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub> laser crystals have been introduced. Comparing both of their advantage and disadvantage over quasi-three-level transition, we finally adopt Nd:YAG crystal as our laser medium in our blue laser. After investigating in details on the properties of quasi-three-level system of Nd:YAG, we show that the temperature control of laser crystals (Nd:YAG) is vital for obtaining the 946nm lasing.
2. we introduce the theory of second-harmonic generation in nonlinear crystals and provide the feasible ways to increase the frequency-doubling efficiency. By comparing those popular frequency-doubling crystals, the outstanding nonlinear crystal, LBO, is adopted in our work. Specifically, the physical and optical properties of LBO are emphasized. Furthermore, the frequency-doubling principle in a LBO crystal at type-I phase matching is also illustrated.
3. A few of different resonant cavities for diode pumped intracavity

---

frequency-doubling blue lasers are given. Based on the ABCD theory, the important parameters of cavity-modes are obtained, and then the cavity design rules have been pointed out. In addition, using the plan-plan cavity, the thermal lens focus lengths of the Nd:YAG crystal with different pump power are measured, which has some value in cavity design.

4. Based on the cavity analysis, we finally use the plan-concave cavity in our experiments. Using LD-end-pumped Nd:YAG, LBO intracavity frequency-doubling and air-cooling, we demonstrate an output power of 1.6 W at 473nm and optical-to-optical conversion efficiency 7.8% blue laser. To the best of our knowledge, this is the highest output power obtained in linear-cavity blue laser at present. Moreover, we also analyses the obtained experimental results and give out the drawbacks in our experiments.
5. Designing a V-type folded cavity and optimizing the cavity parameters, we obtain the output power of 421mW/473nm blue lasing. The potential reasons that the output power is not ideal have been discussed and the improvements have been also given.

**Key Words:** Nd:YAG; LBO; Blue Laser

---

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 LD 泵浦全固体激光器 (DPSSL) .....	1
1.1.1 DPSSL 的发展历史 .....	1
1.1.2 DPSSL 的发展方向及应用 .....	2
1.2 全固体蓝光激光器 .....	3
1.3 LD 泵浦 Nd:YAG 腔内倍频蓝光激光器 .....	6
1.4 本论文工作内容 .....	7
<b>第二章 激光材料分析与选择</b> .....	<b>9</b>
2.1 激光材料 .....	9
2.2 能级系统理论 .....	12
2.2.1 三能级系统 .....	12
2.2.2 四能级系统 .....	13
2.3 Nd:YAG 的激光特性 .....	14
2.4 本章小结 .....	18
<b>第三章 倍频原理与倍频晶体</b> .....	<b>19</b>
3.1 倍频技术 .....	19
3.1.1 二次谐波的产生 .....	19
3.1.2 倍频效率 .....	20
3.2 相位匹配 .....	25
3.2.1 角度相位匹配——临界相位匹配 .....	25
3.2.2 温度相位匹配——非临界相位匹配 .....	28
3.3 倍频晶体 .....	29
3.3.1 倍频晶体的选择 .....	29
3.3.2 LBO 晶体倍频特性 .....	31
3.4 本章小结 .....	32

---

<b>第四章 谐振腔的设计与热透镜效应</b> .....	<b>33</b>
4.1 谐振腔的设计.....	33
4.1.1 谐振腔的类型.....	33
4.1.2 谐振腔参数计算.....	34
4.2 热透镜效应.....	35
4.3 热焦距的测量.....	36
4.3.1 热焦距测量原理.....	36
4.3.2 实验装置及结果.....	37
4.4 本章小结.....	38
<b>第五章 线性腔全固体蓝光激光器</b> .....	<b>39</b>
5.1 线性腔的设计与分析.....	39
5.2 实验装置及结果.....	41
5.3 实验结果分析.....	42
5.4 本章小结.....	44
<b>第六章 折叠腔全固体蓝光激光器</b> .....	<b>45</b>
6.1 折叠腔的设计与分析.....	45
6.2 实验装置及结果.....	49
6.3 实验结果分析.....	50
6.4 本章小结.....	51
<b>参考文献</b> .....	<b>52</b>
<b>致谢</b> .....	<b>57</b>

---

## Content

<b>Chapter 1 General Review.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 LD pumped all-solid-state laser(DPSSL) .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 history of DPSSL development. ....	1
1.1.2 development and applications of DPSSL .....	2
<b>1.2 all-solid-state blue laser.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 LD pumped all-solid-state blue laser .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 work of the thesis .....</b>	<b>7</b>
<b>Chapter 2 Analysis and Choice of Laser Material .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 laser material .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 energy-level system.....</b>	<b>12</b>
2.2.1 three-level system .....	12
2.2.2 four-level system.....	13
<b>2.3 laser properties of Nd:YAG .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 summary.....</b>	<b>18</b>
<b>Chapter 3 SHG Principle and SHG Crystal.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 SHG technique .....</b>	<b>19</b>
3.1.1 second harmonic generation (SHG) .....	19
3.1.2 efficiency of SHG .....	20
<b>3.2 phase-match .....</b>	<b>25</b>
3.2.1 angle phase-match.....	25
3.2.2 temperature phase-match.....	28
<b>3.3 SHG crystal .....</b>	<b>29</b>
3.3.1 choice of SHG crystal .....	29
3.3.2 SHG properties of LBO crystal.....	31
<b>3.4 summary.....</b>	<b>32</b>

---

<b>Chapter 4</b>	<b>Cavity Design and Thermo-Lens Effect</b>	<b>33</b>
4.1	resonant cavity design	33
4.1.1	resonant cavity style	33
4.1.2	parameters of resonance cavity	34
4.2	thermo-lens effect	35
4.3	measurement of thermal focus length	36
4.3.1	measurement principle of thermal focus length	36
4.3.2	experimental setup and result	37
4.4	summary	38
<b>Chapter 5</b>	<b>Linear-Cavity All-Solid-State Blue Laser</b>	<b>39</b>
5.1	linear-cavity design and analysis	39
5.2	experimental setup and result	41
5.3	analysis of experimental result	42
5.4	summary	44
<b>Chapter 6</b>	<b>Folded-Cavity All-Solid-State Blue Laser</b>	<b>45</b>
6.1	folded-cavity design and analysis	45
6.2	experimental setup and result	49
6.3	analysis of experimental result	50
6.4	summary	51
<b>References</b>		<b>52</b>
<b>Acknowledge</b>		<b>57</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

回顾 20 世纪对人类社会产生重大影响的科技发明，激光器的诞生无疑是一个极为耀眼的亮点，激光正继微电子技术之后以其无与伦比的技术优势，推动人类科学技术进入新的发展阶段。发达国家为了在全球竞争环境中占据世界信息技术的制高点，赢得主动权，纷纷加紧实施激光产业发展计划，如美国的“激光核聚变计划”，德国的“激光 2001 行动计划”，英国实施“阿维尔计划”，日本启动“激光研究五年计划”，等等。这些项目的实施，有效推动了全球激光产业进入高速发展阶段。

当前，世界激光产业发展的主要趋势是激光器研究向固态化方向发展，半导体激光器和半导体激光二极管泵浦固体激光器(简称 DPSSL)成为激光加工设备的主导方向<sup>[1]</sup>。这是由于半导体激光器和半导体泵浦固体激光器具有高的转换效率、更小的体积、可靠性高、寿命长以及良好的光束质量，而成为目前发展最为理想、迅速的激光器。半导体激光器以及半导体泵浦固体激光器的最高功率已达到了千瓦量级，并逐步实现设备的小型化和实用化。由于以上的这些优势，半导体泵浦固体激光器和半导体激光器在工业激光加工、激光医疗、军事等多个应用领域成为主流激光器，并将取代一些气体、灯泵浦等传统激光器的应用。

### 1.1 LD 泵浦全固体激光器 (DPSSL)<sup>[2-3]</sup>

#### 1.1.1 DPSSL 的发展历史

自从第一台红宝石固体激光器于 1960 年问世以来，激光技术正以科学史上罕见的高速度向前发展着。进入二十世纪八十年代末期，由于大功率激光二极管和阵列型激光二极管成为极理想的泵浦源，推动了各种固体增益材料的发展，其中以 Nd:YAG 激光器的发展最为迅速，这些都为激光二极管泵浦的全固体激光器的迅猛发展奠定了基础<sup>[4]</sup>。

90 年代至今，DPSSL 迅速发展，并不断开拓重要领域，在应用研究领域取得令人瞩目的成果。美国利佛莫尔实验室 (LLNL) 是开发 DPSSL 的重要

机构，其研究工作得到美国国防部的支持。在"防御者"计划里，LLNL 负责发展攻击助推段导弹的机载大功率 DPSSL。1992 年其研制成功的二极管(LD)泵浦 Nd:YAG 激光器，获得过 1050W 千瓦级高功率，其体积仅葡萄柚般大小，它还被广泛应用到光通信和光信息存储、处理等方面。1994 年美国能源部宣布批准实施“国家点火设施”(National Ignition Facility, 简称为 NIF)计划，并在劳伦兹—利弗莫尔国家实验室建成的单束元装置上全面考核了 NIF 将使用的关键技术和元器件性能。

2000 年，日本 Fanuc 公司用大功率侧面泵浦板条激光器，当输入泵浦平均功率为 9.5kW 时，平均输出功率为 3.3kW<sup>[5]</sup>。LLNL 实验室用 LD 列阵端面泵浦 Yb:YAG，采用可进行热致双折射补偿的双棒泵浦腔结构，获得了 1080W 的基频输出<sup>[6]</sup>。

目前，DPSSL 的斜率效应可达 50%以上，电光转换效率在 20-40%之间。在中、小功率范围内，DPSSL 已在逐步取代灯泵固体激光器、可见和紫外的氩离子(Ar<sup>+</sup>)激光器、氦镉(He-Cd)激光器；在大功率范围内，KW 级的 DPSSL 正在逐步拓展应用领域，向大功率的灯泵固体激光器和横流/轴流 CO<sub>2</sub> 激光器提出挑战。

### 1.1.2 DPSSL 的发展方向及应用

当前，激光二极管泵浦全固体激光器的发展方向主要有三个方面：(1)、高功率输出；(2)、可见光波段输出；(3)、紫外波段输出。激光二极管泵浦固体激光器由于其发射波长的谱线线宽窄(<2nm)，因此易于与固体激光介质吸收峰值匹配，电光转换效率高，在相同的输出功率水平上，大大减弱了热效应，易于实现稳定可控的单横模、单纵模输出。同时，激光二极管泵浦全固体激光器结构紧凑、体积小、光束质量好、输出功率稳定、寿命长。因此它广泛应用于核聚变、光谱、新材料开发等科学研究，材料加工，医疗卫生，军事国防，光学信息处理，光通信，彩色显示，激光测距等各个领域，从而成为国际上竞相研究开发的一个热点。

## 1.2 全固体蓝光激光器

蓝光激光器已经在印刷、光信息存储、彩色激光显示技术以及生物化学等领域发挥出重要的作用，其市场前景十分看好。海水透射窗口落在蓝光激光器波段内，波长合适的蓝光激光将成为海底探测和通信的有效手段；目前激光唱盘和数字影碟光盘阅读机普遍采用红光激光器，如果可以在室温下采用蓝光激光器作为光盘机的光源，由于蓝光波长比红光短得多，因此光盘上记录数据的凹槽尺寸可以做得更小，从而可以大大提高光介质存储设备的存储量，阅读速度可提高 4 倍。正是基于多种原因，国外许多著名大公司及研究机构致力于蓝光激光器的研究工作，至今已经有二十多年的历史。

目前实现全固体蓝光激光光源的主要途径有三种<sup>[7-8]</sup>：(1)、直接发射蓝光的激光二极管；(2)、LD 直接倍频的蓝光激光器；(3)、LD 泵浦通过非线性光学手段获得的蓝光激光器。

### 1、蓝光激光二极管

直接发射蓝光的半导体激光器，具有结构简单、使用方便、电-光转换效率高等优点，因此一直受到人们的关注。

1999 年 Nichia 公司生产出第一台蓝光半导体激光器<sup>[9]</sup>，目前该公司已经有几款输出功率达到 30mW，线宽小于 1nm，输出波长为 400-415nm 的商品化器件。

但由于半导体材料本身的缺陷难于克服，使得蓝光激光二极管的发展相对缓慢。当前市场上蓝光激光二极管供应吃紧，全球专业电子技术媒体 E E Times 杂志报道了<sup>[10]</sup>：Sony 公司在 2006 年底推出的新款游戏机 Play Station 3 在日本与美国的销售状况都十分热烈，但其却面临“巧妇难为无米之炊”的处境，原因只有一个——PS3 光驱用的蓝光激光二极管 (BLD, Blue-Laser Diodes) 的生产量难以跟上需求。

在氮化镓 (GaN) 型 LED 和激光器量产技术开发领域的著名学者，美国加州大学 Santa Barbara 分校的材料工程教授 Shuji Nakamura 表示：“要在 GaN 产品的生产上获得高产量确实是很大的挑战。过去根本没有人成功量产 GaN 激光组件。”

Nakamura 表示, 蓝光激光二极管最大的问题在于缺少让 GaN 晶体生长的块状培养基 (Bulk Substrate)。现在的蓝光激光二极管生产都是使用一种独立的 GaN 培养基, 它在一个蓝宝石 (Sapphire) 培养基上外延生成 (Epitaxially Grown), 而一旦 GaN 层形成一定的厚度, 这个蓝宝石培养基就会被移除。但是透过这种方法制作的培养基有很多缺陷。

## 2、LD 直接倍频蓝光激光器

它是通过二次谐波(SHG)将 LD 输出的红外光直接倍频而得到蓝光激光, 能够实现高的光-光转换效率。1989 年, L. Goldkey 和 M. K. Chun 用 KN 晶体倍频 842nm 的 LD 输出, 得到 24mW 的连续蓝光激光<sup>[11]</sup>。目前, 采用倍频二极管方法获得蓝光的最高报道是: 德国的 D. Woll, B. Beier 等人用 4 W 的 930nm 的 LD, 采用外腔加强办法, 利用 LBO 晶体倍频, 获得了 1 W 输出的 465nm 蓝光输出<sup>[12]</sup>。

但这种方法要求 LD 不仅能够输出较高的激光功率, 而且还必须实现单管、单频运转。因此, 必须采用电学边带压缩或光学反馈压缩等技术, 通过外腔加强的办法, 改善 LD 光束质量、压缩其发射线宽, 并且将 LD 输出锁定在非线性晶体无源谐振腔的共振频率上。其结构复杂, 不易实现和产业化。

## 3、LD 泵浦非线性转换蓝光激光器

利用 LD 发射谱线能够很好地与  $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  等激活离子的吸收带相匹配, 并通过倍频、和频、可调谐激光倍频等方法来得到高转换效率的蓝光激光输出。

### (1) 用和频方法获得蓝光激光器

运用 GaAlAs 激光二极管输出的 809nm 激光与  $\text{Nd}^{3+}$  离子 1064nm 的激光, 通过和频来得到 459nm 的蓝光输出。P. N. Kean 和 R. W. Stanley 在 1993 年采用折叠腔结构, 利用 100mW 的单管 LD 得到了 20mW 的 459nm 蓝光激光输出, 单管 LD—蓝光的转换效率高达 68%, 在改变和频晶体的匹配角度时, 实现 12nm 的调谐宽度<sup>[13]</sup>, 但是这种技术的不足之处在于对 809nm 的 LD 要求较高, 不易实现。

### (2) 腔内倍频的可调谐掺铬( $\text{Cr}^{3+}$ )蓝光激光器

对近红外可调谐激光的倍频是实现蓝光输出的一个新的方法。法国的

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库