

Research Progress of High Power Laser-Diode Pumped Solid-State Laser

Lina Zeng, Yichong Qian, Lin Li*, Zaijin Li, Zhibin Zhao, Zhongliang Qiao, Yi Qu, Hongyan Peng

College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Email: licust@126.com

Received: Nov. 14th, 2019; accepted: Nov. 27th, 2019; published: Dec. 4th, 2019

Abstract

Laser diode pumped solid-state lasers have many advantages such as high efficiency, compact structure, stable performance, long working life, etc. Therefore, laser diode pumped solid-state lasers have been widely used in laser surgery, laser projection, laser communication, laser ignition fusion, etc. We briefly introduce the development history of high power laser diode pump solid laser technology and the research progress of domestic and foreign from the following three aspects, laser solid materials, pumping mode, and thermal performance.

Keywords

Diode-Pumped Laser, Solid Material, Pumping Mode, Thermal Performance

大功率激光二极管泵浦固体激光研究进展

曾丽娜, 钱一冲, 李林*, 李再金, 赵志斌, 乔忠良, 曲轶, 彭鸿雁

海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南 海口

Email: licust@126.com

收稿日期: 2019年11月14日; 录用日期: 2019年11月27日; 发布日期: 2019年12月4日

摘要

激光二极管泵浦固体激光器具效率高、结构紧凑、性能稳定、工作寿命长等优点, 在激光手术、激光投影、激光通信、激光点火核聚变等方面被广泛应用。主要从激光二极管固体材料、泵浦方式、泵浦的散热特性三个方面, 介绍大功率激光二极管泵浦固体激光技术的发展历史以及国内外研究进展。

*通讯作者。

文章引用: 曾丽娜, 钱一冲, 李林, 李再金, 赵志斌, 乔忠良, 曲轶, 彭鸿雁. 大功率激光二极管泵浦固体激光研究进展[J]. 光电子, 2019, 9(4): 178-184. DOI: [10.12677/oe.2019.94025](https://doi.org/10.12677/oe.2019.94025)

关键词

二极管泵浦激光, 固体材料, 泵浦方式, 散热性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

近年来, 二极管激光技术的日益完善和二极管激光器件性能的大幅提升, 高功率激光二极管泵浦固体激光技术获得了快速发展[1], 克服了传统灯泵浦的激光器整体转换效率低、不灵活、温度高等缺点。激光二极管泵浦固体激光器集半导体激光器效率高、寿命长的优点以及泵浦固体激光器光束质量好的优点, 人们对研制新型激光二极管泵浦固体激光器的兴趣不断增加。相比于传统的灯泵浦固体激光器, 激光二极管泵浦固体激光器具体优势在于, 泵浦波长易于介质吸收峰很好对应, 具有高量子效率, 电-光转换效率可达 25%~45%, 连续工作时长可达 15,000 小时。激光二极管泵浦的固体激光材料, 如 Pr:YAG 及其系列, 可使整体能量转换效率提高, 体积变小, 提高输出功率稳定性, 寿命增加。由于整体转换效率的提高, 在相同的输出功率下, 大大降低了激光二极管泵浦固体激光器的热效应, 容易实现稳定和操控的单横模、单纵模的输出。本文主要从激光二极管固体材料、泵浦方式、泵浦的散热特性三个方面, 介绍大功率激光二极管泵浦固体激光技术的发展历史以及国内外研究进展。

2. 新的固体激光材料

材料是激光二极管泵浦的基本, 随着材料性能的提高, 激光二极管泵浦的性能会得到相应提升。最初的激光器介质采用红宝石晶体, 由于红宝石的激发效率较低, 不适合连续工作, 而且红宝石的晶体性能容易受外界温度的影响, 不适合在室温下做持续的多激光重频组件。继红宝石晶体后, 适合作为激光器材料有蓝宝石、钇铝石榴石等晶体。在随后十几年的科研人员试验研究中, 发现了比红宝石材料性能更好的玻璃材料, 相比于红宝石等晶体材料, 玻璃材料容易制造, 具有良好的光学质量, 而且还可以做成很大的体积, 产生高输出能量。但是, 玻璃材料导热性差, 热膨胀系数大, 不适合连续或高重复频率的工作, 制约了玻璃材料更大的发展[2]。

近年来, 随着透明陶瓷的研制成功, 最近出现的性能优异的多晶陶瓷激光材料有钇铝石榴石(YAG)和氟化镱锂晶体(LiLuF₄)。钇铝石榴石的化学式为 Y₃Al₅O₁₂, 是由 Y₂O₃ 和 Al₂O₃ 反应生成的一种复合氧化物, 属立方晶系, 具有石榴石结构, 其物理和化学特性决定了它具有很好的导热性。氟化镱锂晶体具有光束能量高、宽波段光学透过性高、物化稳定性好等特点。在掺有钇铝石榴石的激光介质中, 如 Pr:YAG (掺镨钇铝石榴石晶体), Ho³⁺, Pr³⁺:LiLuF₄ (掺钕镱氟化镱锂晶体)等, 对激光二极管泵浦固体激光器会产生更好的性能。和玻璃材料相比, 陶瓷的导热率通常要大的多, 和红宝石等晶体相比, 陶瓷制造周期短, 造价低, 而且陶瓷中可以均匀掺进高浓度的激活粒子, 可以制造出大尺寸的陶瓷激光介质样品。

在二极管激光器材料的选择中, 能级寿命是一个很重要的参数, 能级寿命越大, 该激光器的性能越好。在掺杂了 Ho³⁺ (正三价钬离子)的激光晶体中, 激光两个比较强的输出范围分别是在 1.1 μm 和 1.9 μm 附近, 在只掺 Ho³⁺ 离子的 LiLuF₄ 晶体中, ⁵I₇ 相比 ⁵I₆ 能级寿命大的很多, 激光在 3 μm 波段只能脉冲输出, 不能连续输出, 掺 Ho³⁺, Pr³⁺ 的 LiLuF₄ 晶体能级示意图如图 1 所示。2016 年上海第二工业大学王胜利等

人在实验中采取在 $\text{Ho}:\text{LiLuF}_4$ 晶体中掺杂 Pr^{3+} 离子, 借助 Pr^{3+} 离子和 Ho^{3+} 离子中的能量传递, 以减少 Ho^{3+} 离子的 $^5\text{I}_7$ 能级寿命[3]。晶体的能量传递满足 $3\ \mu\text{m}$ ($^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$) 波段激光连续输出的要求, 利用 $1.1\ \mu\text{m}$ 的激光二极管泵浦 Ho^{3+} , $\text{Pr}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ 晶体, 产生 $3\ \mu\text{m}$ 激光。王胜利等人实验所用 Ho^{3+} , $\text{Pr}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ 晶体中掺杂 Ho^{3+} 离子和 Pr^{3+} 离子百分含量分别为 3% 和 0.5%, 晶体大小为 $3 \times 3 \times 30\ \text{mm}^3$ 。泵浦源激光波长在 $1.140\sim 1.150\ \mu\text{m}$ 之间, 激光器的输出方式为光纤耦合。实验所得最大激光输出功率为 50 mW, 连续在激光波长为 2934 nm 输出下, 得出斜率效率恒定在 22.6% 左右。在该实验最大功率时下, 激光束质量因子 M^2 (越小越好) 因子约为 4。

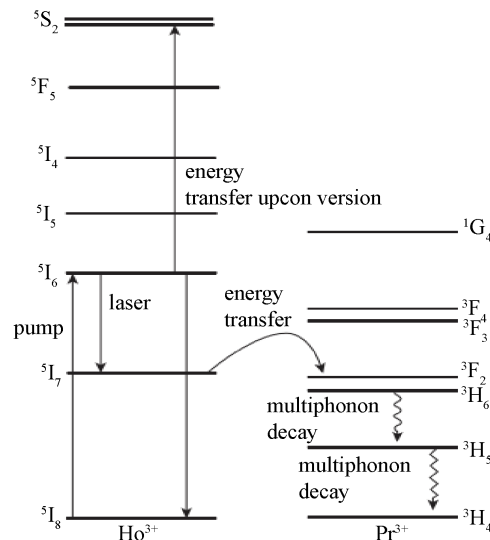


Figure 1. Schematic of energy levels of Ho^{3+} , Pr^{3+} doped LiLuF_4 crystal

图 1. 掺 Ho^{3+} , Pr^{3+} 的 LiLuF_4 晶体能级示意图

Pr (镨)元素是稀土元素, 稀土元素掺杂进增益介质中可以拓展激光的波长, 激光波长越长, 激光器的制作和成本也就越低。 Pr^{3+} 离子最外层电子数为 2, 次外层失去一个电子和最外层电子全部失去后变成 Pr^{3+} 离子。在激光二极管激光器中, 人们对寻找可见激光二极管泵浦的新型固体增益介质的脚步从未停歇, 在众多适合激光二极管泵浦的介质中, 特别是众多的三价稀土离子, 如 Eu^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Tm^{3+} 等掺杂进固体增益介质中, 会对激光二极管泵浦效果产生不同的有益影响。而三价稀土离子 Pr^{3+} 由于其原子核能级结构和在各个原子层总中容易发生跃迁关系, 可以促进其在许多自然光波段的能级跃迁, 如蓝、绿、橙、红和深红光, 可以直接实现可见光波段的激光输出, 特别适用于蓝色激光二极管泵浦的激光增益介质[4]。采用激光二极管泵浦 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 激光晶体均获得高功率连续激光输出[5] [6]。2015 年报道了激光二极管泵浦的 108 W 高光束质量激光输出[7], 表明蓝光激光二极管直接泵浦激光氟化物晶体获得的最高输出功率, 具有十分良好的研究前景。

2017 年山东大学张怀金等人总结了近几年国内外掺 Pr^{3+} 激光增益介质的研究进展和趋势, 以蓝光激光二极管为泵浦源, 掺 Pr^{3+} 离子的 GdLiF_4 (氟化钪锂晶体) 为增益介质, 采用二维可饱和吸收材料 MoS_2 (二硫化钼), 分别研究了掺 Pr^{3+} 氟化物增益介质在全固态调 Q 脉冲激光和全固态锁模脉冲激光, Pr^{3+} 离子的 GdLiF_4 增益介质在脉冲可见激光输出上将会有更大的应用潜能。根据 Kerr 透镜锁模原理, 通过调整谐振腔和晶体, 实现了 522, 607, 639 和 720 nm 四种自锁模式稳定的超快脉冲激光输出。和以半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 为光调制器件的红光锁模脉冲结果相比, 实验结果平均输出功率远高于 SESAM 的输出

功率且其脉冲宽度相差不大[8]。和 SESAM 相比, Pr^{3+} 离子的 GdLiF_4 增益介质具有制备简单、使用波长宽和层数可控的优点。

3. 泵浦方式

根据激光二极管封装和输出光束的特点, 激光二极管泵浦固体激光器的泵浦方式一般情况下可以分为端面泵浦和侧面泵浦, 两种激光泵浦方式各自具有其独特的优势, 同时又具有不同的缺点。探索端面泵浦和侧面泵浦的输出特性对激光器的设计和改进都具有重要意义[9]。

激光二极管直接端面泵浦, 激光进行纵向泵浦, 激光二极管阵列产生泵浦光, 通过会聚光学系统(包含自聚焦透镜和组合透镜等)耦合输入激光, 然后激光从轴向方向进入激光晶体, 最后通过输出镜输出。泵浦光传播方向与振荡光方向一致, 实现了泵浦光与振荡光的空间耦合。端面泵浦可以通过泵浦光的空分布控制激光晶体内的增益及热效应的空分布, 控制振荡光模式, 有效提高激光二极管泵浦固体激光的整体光-光转换效率, 控制输出激光模式。一般情况下, 单管或光纤耦合输出的激光二极管常采用端面泵浦的方式。激光增益介质在泵浦源的一端涂覆有 808 nm 宽带增透膜和 1064 nm 高反射率膜, 使激光二极管固体激光器振荡放大输出[10]。通过耦合系统和激光腔结构的合理设计, 泵浦光束与谐振腔模可以较好匹配, 增益介质能够充分的吸收泵浦光, 因而阈值低, 斜效率高, 容易实现 TEM_{00} 模激光输出(激光束横截面上的强度分布), 例如激光二极管泵浦 $\text{Pr}:\text{YVO}_4$ 晶体斜效率可达 72%。目前, 随着聚光系统的不断改进, 大功率激光二维阵列也可实现端面泵浦方式。

端面泵浦也有局限性, 由于泵光过分聚焦在很小的区域内, 因此会在激光增益介质中产生严重的热效应, 致使激光输出功率严重下降、激光品质下降。过高的工作功率往往会造成激光增益介质的损坏, 所以端面泵浦的功率不能太大, 对不同的增益介质来说, 可以实现的最大泵浦功率不相同, 一般为百瓦量级泵浦功率输出。目前国内开展激光二极管固体端面泵浦研究的单位有, 中国科学院物理所光物理实验室、国科学院长春光机所、中国科技大学、中国工程物理研究院电子学研究所、西安电子科技大学等。国外的研究单位是德国夫朗和费研究所、日本三菱公司、美国 HRL (休斯研究实验室)、德国 Rofin 激光公司等。

侧面泵浦即横向泵浦, 是指将来自增益介质侧面的泵浦光射进到增益介质中, 并且激光器的模式是沿着增益介质的长度进行振荡。侧面泵浦二极管固体激光器的工作方式是, 在板条介质的一端用激光二极管阵列, 另一端是反射板, 使激光大量聚合到增益介质中, 如图 2 所示。通常, 为了获得均匀的激光泵浦分布, 侧面泵浦通常采用三向、五向对称泵浦结构。在五向对称泵浦结构中, 二维阵列封装在内部有冷却通道的热沉上, 由冷却剂精确控温使二维阵列发射波长在激光晶体的吸收峰附近。冷却剂同时对激光晶体进行冷却, 激光晶体和二维阵列用石英玻璃管隔开。围绕着激光晶体棒还设置了反光块, 用来防止二维阵列的泵浦激光逸出, 同时对激光模块的机械部件进行定位。采取三向、五向对称泵浦结构的侧面泵浦方式通常能获得超大功率输出, 侧面泵浦方式被普遍应用于切割太阳能电池板方面的激光划片、(超)精细雕刻方面的激光打标等需要大功率输出[10]。

侧面泵浦的优点在于, 可以利用更多的二维阵列, 使其沿增益介质轴向摆放, 通过增益介质圆柱体或长方体的表面相对于光轴方向进行横向泵浦, 对散热和激光耦合都提供了比较大的外部面积。通过合理选择激光模块结构参数, 可以提高泵浦面积的均匀性, 从而改善输出激光的光束品质。但是, 由于侧面泵浦的活跃区在增益介质边沿, 中央处 TEM_{00} 的模表面积对输入激光的吸收相对较少, 所以经常是多模输出; 不过输出功率非常大, 可以达到千瓦量级。侧面泵浦方式缺点也很明显, 在侧面泵浦结构中, 增益介质中的面积排列不易和沿轴线纵向方向形成的驻波场进行匹配; 并且因为增益介质内部温度比外部温度高出很多, 从而在侧面泵浦的激光器中产生严重的热效应, 激光的输出效率大幅减少。同时, 侧

面泵浦工作时会产生大量的热，因此在工作时必须添加冷却液以保证激光器的正常运行。而冷却液吸收激光，在冷却液附近时会有相当一部分激光被冷却液带走，这些冷却液严重影响了侧面泵浦的工作效率。目前主要采用侧面泵浦方式研究激光二极管泵浦的单位有，中国科学院福建物构所、华北光电研究所、华中科技大学、南京理工大学、中国科学院半导体研究所等。国外有美国雷神公司太空与空用系统部、美国格鲁曼公司、美国利弗莫尔国家实验室、日本东芝公司等。

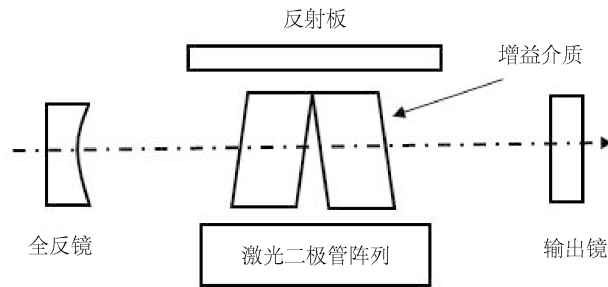


Figure 2. Schematic of side pumped diode solid state laser
图 2. 侧面泵浦二极管固体激光器图

4. 散热性能研究

激光二极管泵浦的固体激光器的热效应主要是，激光二极管工作时使增益介质表面发生热形变的产生的热透镜效应。长时间连续工作的激光二极管泵浦固体激光器，实际能量转换效率只有 15% 左右，在工作过程中有大量的能量以热的方式损耗了。产生热的原因有三点：一是量子在各个能级发生的跃迁不稳定，在泵浦带和激光增益介质中产生大量的热；二是低激光能级和量子基本状态的能量差异；三是激光高能级和泵浦带之间的能量差异[11]。综上所述，激光二极管泵浦的固体激光器热管理可以归纳为三个方面：其一，提高激光器的总体转换效率以降低增益介质上的总耗热量；其二，实施有效的冷却，及时导出增益介质上热量；其三，降低因冷却产生的热效应。

激光二极管泵浦的固体激光器的热效应问题严重影响了了激光器的正常工作效率，降低了激光质量。在实际应用中，必须应用有效的方法来降低或者减少热效应问题[12]。常用的减少二极管激光泵浦固体激光器热效应的方法包括：用冷却液冷却激光器、过滤不需要的激光光波方法、使用特殊结构的工作结构，用物理方法来降低增益介质中和聚透镜中聚集的热量。一般的冷却方法是加入冷却液进行冷却，最常见的冷却液是蒸馏水或去离子水，它的优点是比热容大，导热性能高，膨胀指数小，粘合度低。除了用冷却液来降低二极管激光泵浦固体激光器热效应，还可以通过过滤不需要的激光光波的方法。激光增益介质中的活性离子只吸收激光束宽带辐射谱中一小部分，非常多的一部分被转换成热量而损耗。主要的过滤激光光波方法有两种即使用滤光液和滤光玻璃。在冷却液(如水，乙二醇，碳氟化合物)中加入一定比例的具有高度滤光功能和吸收近红外线光域的滤光材料，就能配制成同时具有冷却和滤光功能的滤光液。在增益介质附近采用滤光玻璃放在激光器件附近，也可实现滤光功能。

国内西安电子科技大学宋小鹿和李兵斌团队相继在 2007 年和 2009 年，改进了激光二极管固体激光器端面泵浦方式时，在激光射进增益介质附近产生大量热的问题，分别在增益介质的前面和后面使用热导率为 $1900 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ 的金刚石作为冷却材料导出激光器产生的热量。由于金刚石极高的导热率，因此激光器工作时，在增益介质附近短时间内产生的大量热量可以快速传导到金刚石材料中，最后通过热沉导出热量[13]。微通道冷却是指输水断面的过流面积与水体接触的输水管道边长之比在 $10\sim 1000 \mu\text{m}$ 范围之间的通道。由于同样体积的冷却液和半径小、内部面积大的微通道中的接触面积很大，同时微尺度效应使

微通道对流换热系数增大, 所以微通道的效率实际远远超过常规通道的效率。微通道冷却方法的理论是通过增加接触面积和冷却液的对流换热系数来提高激光器散热能力[14]。喷雾冷却是将少量液体混合到加压气体中组合成雾状的汽液混合流体, 通过喷雾将其喷射到热交换表面上, 并以雾化后的微小液滴形式带走热量以实现制冷[15]。

固体冷却相比于微通道冷却和喷雾冷却方式实现难度较低, 容易利用现有材料进行实验研究。在现有可以大规模制作的导热材料中, 石墨烯是否代替金刚石作为导热材料成为一个值得研究的方向。因为金刚石和石墨烯是同种元素组成的不同物质, 而且石墨烯的导热性也是很好。人们对微通道冷却和喷雾冷却的热传导和流动性的探索还处在起步期, 无法大规模应用到激光二极管固体激光器的冷却中。因此, 我们需要继续研究激光二极管固体激光冷却物理特性, 研究冷却过程中的流动特性和热传导特点, 开发新的冷却材料, 提升冷却效率, 使激光器能够平稳运行。

5. 应用与展望

2009年中科院半导体研究所研制的激光二极管泵浦固体激光器已取得 10 kW 高功率激光输出, 其中工业级 5 kW 全固态激光器的累计工作时间大于 600 小时。2012年9月, 欧洲导弹防御局(MBDA)采用几何拼接技术实现 40 KW 高功率激光输出, 成功地完成了对炮弹和钢板的打靶演示试验。2013年11月, 莱茵金属公司利用两台钕玻璃激光器联合作战模式发展了总功率 50 KW 的“天空卫士”(SkyGuard)系统, 并进行了针对无人机的初步打靶实验[16]。2016年, 功率达到 120 KW 的工业级钕玻璃激光器由天津东方锐镭公司联合国防科学技术大学高能激光技术团队研制成功, 其各方面指标排在世界前列[17]。

大功率二极管泵浦固体激光器主要应用在工业加工和军事领域。工业加工领域主要有激光切割、打磨、焊接和精确组装等。国内的大功率激光在工业加工应用方面也发展很快, 例如在国产航空母舰、护卫舰、潜水艇等船舶的建造过程中, 使用大功率激光技术对复杂形状的厚钢板进行切割焊接等。军事领域主要应用在激光武器上, 如激光导弹、激光扫雷战车、大功率激光炮等。除工业加工和军事领域外, 大功率二极管泵浦固体激光器还可以广泛应用于科学研究、医疗手术、居家娱乐、生物化学、太空探索、信息处理等领域, 具有极高的实用价值[18]。

激光技术是世界上公认的、应用最广泛的高新技术之一, 已经成为新一代性能卓越的绿色、节能光源, 成为激光发展中最具前景的方向之一。为了全面提高我国在激光方向上的研究和应用水平, 需要加强在激光二极管泵浦固体激光器及应用系统产业化的研究和创新, 推动激光技术规模化的应用, 尽快创造出能走向世界的中国激光产品, 发展高效先进的二极管泵浦固体激光器及应用。

基金项目

海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618MS055, 618QN241)资助。

参考文献

- [1] 刘喜斌, 于卫平. 激光二极管泵浦全固体激光器(DPLSS)的发展与应用[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2015, 18(3): 49-58.
- [2] 耿爱丛. 固体激光器及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 29-30.
- [3] 王胜利, 滕琴, 桂林, 等. 二极管泵浦的 Ho^{3+} , $\text{Pr}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ 3 μm 激光[J]. 上海第二工业大学学报, 2016, 33(4): 326-329.
- [4] Pabœuf, D., Mhibik, O., Bretenaker, F., et al. (2011) Diode-Pumped $\text{Pr}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ Continuous-Wave Orange Laser. *Optics Letters*, **36**, 280-282. <https://doi.org/10.1364/OL.36.000280>
- [5] Metz, P.W., Reichert, F., Moglia, F., et al. (2014) High-Power Red Orange, and Green $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ Lasers. *Optics Letters*, **39**, 3193-3196. <https://doi.org/10.1364/OL.39.003193>

-
- [6] Hashimoto, K. and Kannari, F. (2007) High-Power GaN Diode-Pumped Continuous Wave Pr^{3+} Doped LiYF_4 Laser. *Optics Letters*, **32**, 2493. <https://doi.org/10.1364/OL.32.002493>
- [7] Shen, Y.J., Yao, B.Q., Qian, C.P., *et al.* (2015) 108-W Diode-End-Pumped Slab $\text{Tm}:\text{YLF}$ Laser with High Beam Quality. *Applied Physics B*, **118**, 555-559. <https://doi.org/10.1007/s00340-015-6034-z>
- [8] 张怀金, 张玉霞, 于浩海, 等. 掺镨激光晶体及其全固态脉冲可见激光研究[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(10): 1392-1401.
- [9] 杨爱粉. 激光二极管端面组合泵浦固体激光器技术研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [10] 戴梦楠. 半导体二极管泵浦在固体激光器中的应用[J]. 科技信息, 2009(18): 197-198.
- [11] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2012: 108-110.
- [12] 林林. 二极管泵浦固体激光器中泵浦效果的分析与评价[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [13] 李兵斌, 过振, 宋小鹿, 等. 端面抽运固体激光器中抽运端面的直接散热[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 59-65.
- [14] 田长青, 徐洪波, 曹宏章, 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1686-1692.
- [15] 周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [16] 侯晓艳, 郑利. 德国研制的激光武器[J]. 信息在线, 2014(8): 1-5.
- [17] 王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017(9): 51-64.
- [18] 郑权, 赵岭, 钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2001(1): 6-9.