

平面波导激光器的研究进展

陈思露^{1,2}, 刘琪^{1,2}, 孟俊清¹, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 平面波导激光器是板条激光器与光纤激光器的良好结合体,其结合了两者的优点且避免了各自的缺点,极高的宽高比率使流经工作区的一维梯度热流控制了热透镜效应,同时对横向光束质量具有良好的控制;通过增加工作区的宽和长可以增大输出功率,大发散角的抽运光可以被约束在大数值孔径的波导结构中,激光亮度极高。介绍了平面波导激光器的制备与材料以及发展,综述了已报道的平面波导激光器相关研究,并展望了其未来的发展。

关键词 激光器; 全固态激光器; 平面波导激光器; 进展

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.050004

Research Progress in Planar Waveguide Lasers

Chen Silu^{1,2}, Liu Qi^{1,2}, Meng Junqing¹, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The planar waveguide lasers are the good combination of slab lasers and fibre lasers, which combine the advantages of both while avoiding their each disadvantages. The high aspect-ratio allowing for efficient one-dimensional heat flow from the active region, leads to controlling the thermal lens effect well and controlling the beam quality excellently. By increasing the width and length of the active-region, the high output power is obtained, and the waveguide structure which has a numerical aperture does a great job in constraining the non-diffraction limited pumping light, leading to the high brightness of the lasers. Introductions about the fabrication, materials and history of planar waveguide lasers are made. The reported studies relating to the planar waveguide lasers are reviewed, and the prospect of the further progress is given.

Key words lasers; solid-state lasers; planar waveguide lasers; progress

OCIS codes 140.3460; 140.3580; 140.3290

1 引言

平面波导激光器作为板条激光器和光纤激光器的良好结合体^[1],既结合了两者的优点又避免了各自的缺点,即其具有紧凑结构、低阈值抽运功率、高散热效率与高质量输出光束的优点^[2]。经典的板条状平面波导常采用大面积冷却,以达到更好的散热效果,平面波导激光器可以通过改变工作区域的长度和宽度来实现对功率的缩放控制^[3],同时热透镜效应可以由流经工作区的一维梯度热流控制。此外,与光纤类似的波导结构具有较大的数值孔径,因此,大发散角的抽运光可以很好地约束在波导内传播,激光亮度非常高。

本文综述了近年来国内外平面波导激光器的相关研究,包括平面波导激光器的制备技术、历史回顾、最新进展以及发展难点,并在理论和实验研究方面进行了展望。

收稿日期: 2016-10-10; **收到修改稿日期:** 2016-12-19

作者简介: 陈思露(1993—),女,硕士研究生,主要从事波长 515 nm 的平面波导激光器方面的研究。

E-mail: chensilusiom@163.com

导师简介: 孟俊清(1975—),男,研究员,硕士生导师,主要从事空间全固态激光器及其应用方面的研究。

E-mail: jqmeng@siom.ac.cn(通信联系人)

2 平面波导激光器的材料与制备

2.1 平面波导激光器的材料

平面波导的制备材料十分多样化:利用钇铝石榴石(YAG)、人造钆镓石榴石(GGG)、氧化铝(Al_2O_3)、钒酸钇(YVO_4)等晶体或氟化物如钇锂氟化物(YLF)和玻璃等作为基底材料^[4],在这些基底材料中掺入稀土元素如钕(Nd)、镱(Yb)、铒(Er)、铥(Tm)、铬(Cr)等,可以实现宽波长范围的输出光谱。

固态基体大部分可以分为结晶固体与各种玻璃两类^[5]。在为激光离子选择基体介质时,首先需要考虑光学性质,以避免光束在传播经过晶体之后,光束质量下降。大部分高平均功率激光器系统还需考虑热效应,因此具有高热传导率的结晶物质将会成为很好的选择。稀土离子因其包含大部分的近红外电磁谱荧光跃迁谱线而被用作固态激光器的增益介质^[6],其中三价离子最常用。半导体激光器的发射波长可以与固态激光器离子的吸收峰值相匹配,如 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} ,具体可根据所需要的激光器波长来确定。

2.2 平面波导激光器的制备

目前,有三类基本的平面波导的制备工艺:

1) 以外延生长技术为基础^[7],此类技术包含液相外延技术^[8]、分子束外延技术和脉冲激光沉积技术^[9]等。这些技术生成的平面波导边界折射率会发生突变,且波导边界的损耗非常低,这是将不同材料的介质组合起来所导致的。这种制备工艺不仅非常复杂,还对材料间的晶格常数具有严格的要求,同时还需要价格高昂的专用设备,一般用于光集成电路中。

2) 制备技术通过改变材料的化学成分实现波导边界的折射率差异,具有低成本的优点,缺点则是器件损耗大,该类技术包含离子交换技术^[10-11]、离子注入技术^[12]以及离子扩散技术^[13]等。这些技术大部分都有制备高数值孔径波导结构的能力,在需要高效率的激光二极管抽运中更常用。

3) Shepherd 科研团队提出^[14],其使用热键合技术制备波导将以上两种工艺的优点集于一身,即将波导的芯层与基底材料的表面进行抛光与特殊处理,使两块材料间能产生分子间作用力而光胶为单片的波导。该技术的优点在于可以利用传统成熟的精抛工艺和较为普通的研磨设备制备出具有折射率突变的平面波导,避免了价格高昂的加工设备以及外延生长技术对晶格匹配的要求。

3 平面波导激光器的历史发展

1960年波导激光器结构第一次出现,当时是将光纤用于降低激光器系统的阈值,然后在1971年,平面波导激光器的运行首次获得报道^[15]。此后,大量技术用于波导结构的制备,许多物质作为潜在的增益介质被研究。大平均功率的激光二极管抽运的平面波导激光器按照抽运方式的不同可以分为平面内抽运和大面抽运两种,其中前者包括端面抽运与侧面抽运两种。

对于平面内抽运的情况,第一个激光二极管侧面抽运的平面波导激光器是1992年由南安普顿大学报道^[16];紧接着,1995年研制了第一个半导体激光器抽运的以Yb:YAG晶体作为波导芯层的平面波导激光器^[17];在1997年,使用热键合技术^[18]制备了大数值孔径、低传输损耗、良好热学性质(大功率激光二极管条抽运需要)的平面波导激光器。为了获得更大的输出功率与近衍射极限光束,接下来的两年涌现了许多成果。在1998年,Bonner等^[19]报道了一种6.2 W输出的平面波导激光器,该激光器是一个由液相外延形成的80 μm 厚的多模Nd:YAG波导;次年,出现了一种由直接键合制备的仅8 μm 厚的Nd:YAG波导,输出功率为3.7 W^[20];利用相同的技术,Griebner等^[21]报道了一种100 μm 厚的10%掺杂浓度的多模Yb:YAG波导,其利用一种像散谐振腔,得到近衍射极限的输出光束(光束质量因子 M^2 为1.5),最大连续输出功率为1.2 W;在直接键合技术的基础上,Bonner等^[22]又报道了邻近耦合法与双包层结构的新进展。

大面抽运的主要优点是激光二极管发射的未经校准或部分校准的光束可以直接用于抽运薄板^[23],从而简化了抽运结构的设计。对增益介质直接注入激光二极管发射的原始光,可以通过注入抽运光进入矩形的高反射率与狭缝的腔室来实现。1997年,郝瑞瓦特大学的Pelaez-Millas等^[24]利用其发明的大面抽运研制了一个平均输出功率为9 W的准连续输出的热键合技术制备的Nd:YAG平面波导激光器。

4 国内外研究进展

英美等国比中国更早开展平面波导激光器的相关研究工作,以南安普顿大学科研人员为主要代表。1997年,他们首次采用热键合技术制成了以Nd:YAG晶体为芯层,YAG晶体为上下包层的平面波导^[25];1999年,制备了以Nd:YAG为芯层,以导热性能极好的白宝石作为波导结构的上下包层的平面波导激光器,数值孔径达到了0.46;2000年,对平面波导激光器的结构作出了新的改变,引入双包层结构,研制了双包层结构的平面波导激光器,大幅提升了抽运光的吸收效率;2002年,双包层结构的平面波导激光器再次取得进展,在平面波导的芯层中热键合一片 Cr^{4+} :YAG晶片,使用被动调Q,成功制备出单片波导器件,在实验中激光器处于连续运转时可以得到最大为8.1 W的输出功率,而当激光器处于被动调Q运转时,将重复频率设置为80 kHz,可以得到脉冲宽度为2.5~3.5 ns、对应峰值功率为30 kW的最大激光输出。

近十年来,国内外平面波导激光器的研究工作也获得了很多成果,因此,对一些在波导结构、抽运方式或制备上具有突破的平面波导激光器进行介绍。

4.1 Raytheon公司生产的Yb:YAG平面波导激光器

Raytheon公司于2008年报道了端面抽运的双包层结构Yb:YAG平面波导激光器,波导增益介质Yb:YAG的厚度为200 μm ,内包层为没有掺杂的YAG晶体^[26]。该激光器使用主振荡功率放大器(MOPA),当进入放大器的信号光功率为200 mW时,经放大器后得到240 W的激光功率,单程增益为1200,而在信号光功率增大至100 W时单程增益会下降为160,此时将获得16.1 kW的连续输出功率,对应的电光转换效率为20%;2012年,该公司又采用单个Yb:YAG平面波导激光器得到了峰值功率为3 MW^[27]的激光输出,该平面波导为一个MOPA结构的高效率平面波导激光器,其中,主振荡器为一个激光二极管抽运的微芯片激光器,预期输出为10 kHz重复频率、800 ps脉冲宽度与100 μJ 脉冲能量的脉冲激光,功率放大器部分则是基于预计输出功率为16 W、波长为1030 nm的激光而设计的,其结构如图1所示^[27],主控振荡器所使用的微芯片Yb:YAG使用可饱和吸收体 Cr^{4+} :YAG进行被动调Q。

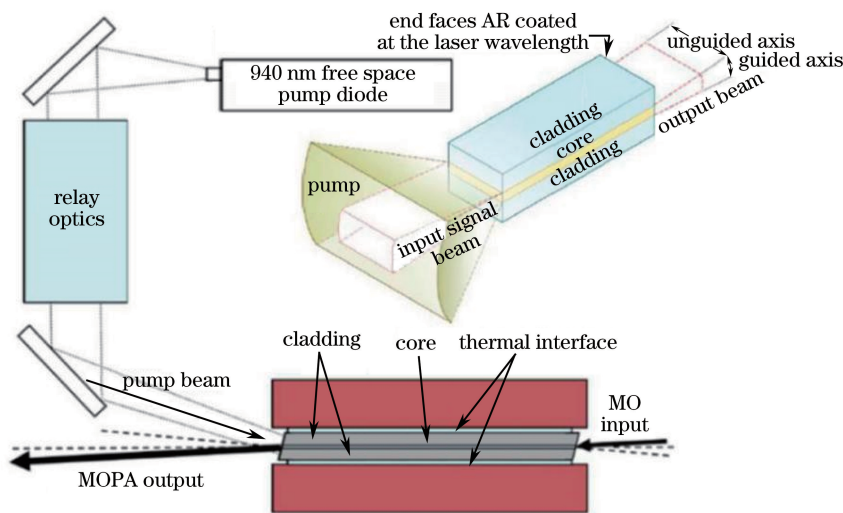


图1 Raytheon公司的平面波导激光器

Fig. 1 Planar waveguide lasers of the Raytheon company

4.2 端面抽运平面波导激光器

2008年,清华大学报道了高效率的端面抽运Nd:YAG平面波导激光器^[28],其几何尺寸为12 mm×5 mm×1 mm,波导芯层为0.4 mm厚的Nd:YAG晶体,增益区掺杂浓度(原子数分数)为1%,上下包层均为厚度0.3 mm的YAG晶体。抽运光源使用的是808 nm输出的激光二极管,可以获得2.90 W的最大输出功率与58%的光对光转换效率。

2013年,Starecki等^[29]报道了掺镨(Pr)的氟化物晶体作为增益介质的平面波导激光器,该激光器通过使用抽运波长为479.2 nm的半导体激光器进行端面抽运,实现了红光和橙光两种可见光的激光输出。输出为红光时,波长为639 nm,输出功率为25 mW;输出为橙光时,波长为604 nm,输出功率为12 mW,两者对

应的斜率分别为 5% 和 6%。装置如图 2 所示^[29], 其中, OPSL 为光抽运激光二极管, MO 为显微镜物镜, OSA 为光谱分析仪, OC 为输出耦合器。

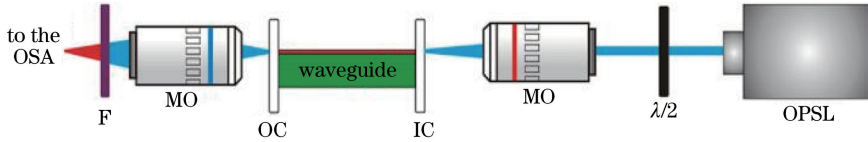


图 2 端面抽运的平面波导激光器示意图

Fig. 2 Schematic of the end-pumped planar waveguide lasers

4.3 侧面抽运平面波导激光器

2008 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所成功制备了非对称包层结构侧面抽运的 Nd:YAG 平面波导激光器^[30], 结构示意图如图 3 所示。

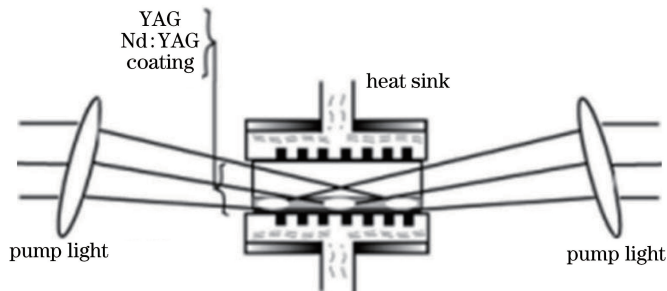


图 3 倾斜抽运非对称平面波导

Fig. 3 Asymmetric oblique edge-pumped of planar waveguide

这种非对称的包层结构有效地减轻了高平均功率平面波导激光器的热效应, 对波导侧面注入小角度(与水平方向成 5° 的倾斜角)的抽运光, 可以获得更均匀和更高效率的抽运吸收。平面波导的长度为 58 mm, 宽为 10 mm, 厚度为 1 mm。在波导的底面上镀有 $3 \mu\text{m}$ 厚的蓝宝石膜层。抽运源在 1 kHz 重复频率 20% 占空比的准连续模式下工作, 在非稳腔中获得 280 W 的激光输出, 斜率效率为 38%。

2010 年, 郝瑞瓦特大学在复合非稳腔结构中使用 Yb:YAG 平面波导获得了 400 W 的连续激光输出^[31], 该激光器使用单包层结构的平面波导, 波导工作区使用 2% 掺杂浓度的 Yb:YAG 晶体, 厚度为 $150 \mu\text{m}$, 衬底和包覆层均为 1 mm 厚的蓝宝石。抽运光从两个侧面进入, 上下两个大面用于冷却, 在长度方向上建立谐振腔, 为避免未被吸收的抽运光进入对面叠阵, 两个叠阵相对于波导成不同的角度。激光器的侧面抽运结构如图 4 所示^[31]。

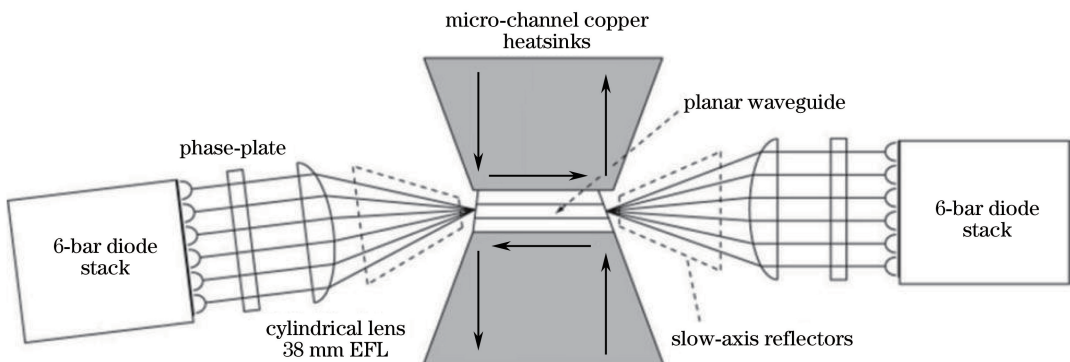


图 4 平面波导激光器侧面抽运示意图

Fig. 4 Schematic of the side-pumped planar waveguide

4.4 流延成型的平面波导激光器

2015 年, 中国科学院光电材料化学与物理研究所和北京光电功能材料与微纳器件重点实验室成功合作研制了流延成型法制备的平面波导 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷激光器^[32]。实验证明陶瓷激光器的性能不

亚于甚至优于传统晶体制备的激光器,综合使用流延成型与真空烧结技术为在多种基底材料上制备多层复合陶瓷波导提供了巨大的潜力,即其允许改变各包层材料的折射率,同时可以将折射率不同的材料进行组合。另外,与其他可饱和吸收体相比,石墨烯氧化物具有更宽的吸收光谱范围、超快的恢复时间与适度的调制深度,调 Q 运行时能起到更好的作用。

首次使用流延成型与真空烧结技术制备的 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷激光器,其体积为 $1.5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 12.5\text{ mm}$,包含两个 0.7 mm 厚的未掺杂 YAG 晶体的外包层,中间有一层 0.1 mm 厚的 Nd:YAG 晶体作为芯层,Nd³⁺ 的掺杂浓度为 2%。激光器示意图如图 5 所示^[32],激光连续输出运行时获得了 840 mW 的最大输出功率与 65% 的斜率效率;被动调 Q 脉冲输出时,使用石墨烯氧化物制成的输出耦合器,获得了脉冲重复频率 930 kHz、单次脉冲能量 221 nJ、对应最短脉宽 179 ns 的激光。

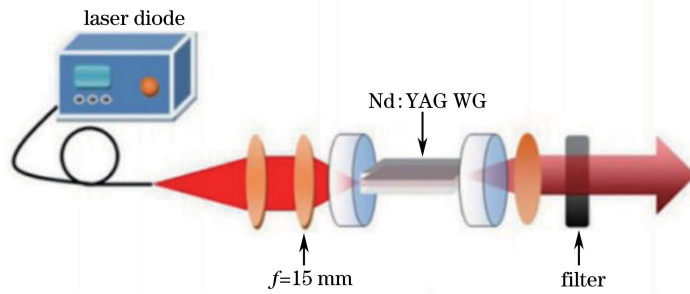


图 5 连续波输出调 Q 运转的激光器装置

Fig. 5 Setup for the continuous wave and Q-switched laser experiments

2016 年,北京光电功能材料与微纳器件重点实验室、西安电子科技大学光电与物理学院以及香港大学物理学院利用流延成型与真空烧结法合作制备了 YAG/Yb:LuAG/YAG 透明陶瓷平面波导^[33],其中 Yb³⁺ 的掺杂浓度为 15%。使用波长为 970 nm 的半导体激光器作为抽运源,吸收效率达到了 85.4%,激光输出光束质量良好,激光波长为 1030.7 nm;抽运光功率为 4.69 W 时,可以获得 5% 的光-光转换效率与 9% 的斜率效率。该陶瓷平面波导激光器装置如图 6 所示^[33]。

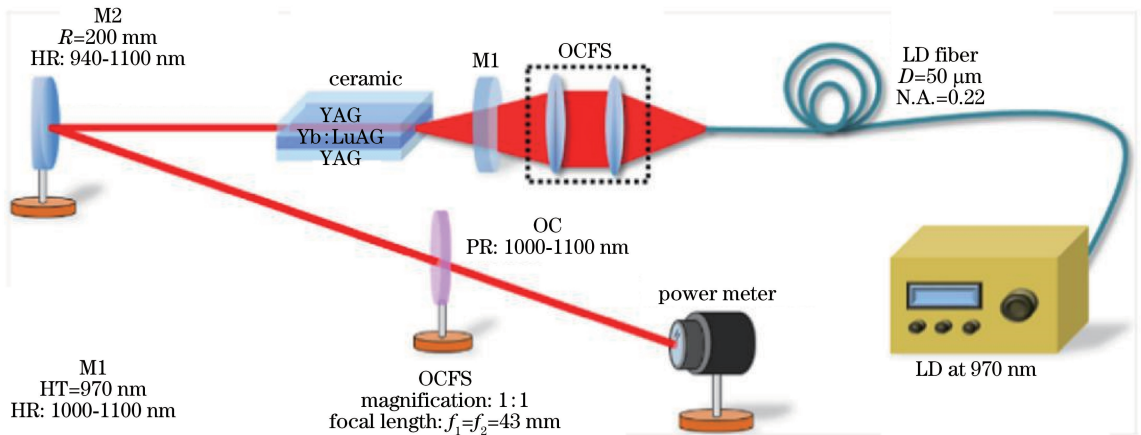


图 6 激光二极管抽运 YAG/Yb:LuAG/YAG 陶瓷平面波导激光器装置

Fig. 6 Setup for the laser-diode pumped YAG/Yb:LuAG/YAG ceramic planar waveguide laser

4.5 脉冲激光沉积制备的平面波导激光器

2014 年,南安普顿大学光电子研究中心利用脉冲激光沉积技术成功制备掺铈氧化钇(Yb:Y₂O₃)为波导芯层的平面波导激光器^[34],输出功率为 1.2 W,抽运功率至 8.5 W 时仍未出现负面热学效应。该实验装置如图 7 所示^[34],BADL 为大面积激光二极管,FAC 为快轴准直器,SAC 为慢轴准直器, $\lambda/2$ 为半波片,PBS 为偏振分束器,C1、C2 均为圆柱形透镜,A1 为非球面透镜,M1 为抽运输入镜,M2 为输出耦合器,WG 为平面波导。

2016 年,Grant-Jacob 等^[9]利用脉冲激光沉积技术制备了掺杂浓度为 1.4% 的 Yb:YAG 平面波导激光

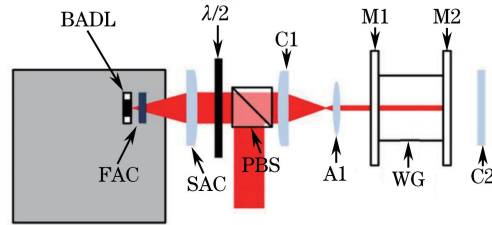


图7 光学设计示意图

Fig. 7 Schematic of the optical design

器。关于未掺杂基底物质,通过增加沉积物质的反射率,使波导具有足够大的数值孔径来允许棒状激光二极管进行抽运。这也是第一次使用脉冲沉积技术制备的平面波导激光器获得超过 10 W 的输出功率,利用半导体激光器进行端面抽运可以得到斜率效率为 48%、输出功率为 11.5 W 的准单片 Yb:YAG 平面波导激光器。

为了直观地观察平面波导激光器近年来的发展,表 1 总结了部分平面波导激光器近年来取得的进展。

表 1 平面波导激光器近十年取得的突破

Table 1 Breakthrough of the planar waveguide lasers in recent 10 years

Time	Research institution /Researcher	Innovation point
2008	Raytheon Company	Yb:YAG planar waveguide laser with end-pumped double-clad structure
2010	Heriot-Watt University	Yb:YAG planar waveguide laser with compound unstable resonator and continuous laser output of 400 W
2012	Raytheon Company	Yb:YAG planar waveguide laser with laser output of 3 MW peak power
2013	Bolanos W	Planar waveguide laser with Pr doped (PR) fluoride crystals as gain medium
2014	Optoelectronics Research Centre, the University of Southampton	The planar waveguide laser with Yb:Y ₂ O ₃ crystal as waveguide core, fabricated by pulsed laser deposition, get output power 1.2 W
2015	Beijing Key Laboratory of Opto-electronic functional Materials & Micro-nano Devices, Department of Physics	The YAG/Nd:YAG/YAG ceramic planar waveguide laser was fabricated by tape casting and vacuum sintering for the first time
2016	Beijing Key Laboratory of Opto-electronic functional Materials & Micro-nano Devices, Department of Physics	The YAG/Yb:LuAG/YAG transparent ceramic planar waveguide laser was fabricated by tape casting and vacuum sintering
2016	Optoelectronics Research Centre, University of Southampton	Yb:YAG planar waveguide laser, fabricated by pulsed laser deposition, get output power for more than 10 W for the first time

5 结束语

近年来,关于平面波导激光器的研究在多方面取得了重大进展。虽然波导激光器的概念提出较早,但相比近年碟片激光器与光纤激光器在输出功率与光束质量上取得的进展相比,平面波导激光器的进展仍然较缓慢。究其原因,可以从几个方面进行分析:

1) 波导激光器输出光束的纵横比较大,其中沿波导方向的光束质量较好,因为宽度较大,沿宽度方向的光束质量难以维持;波导激光产生的激光光斑也为不对称的条形,难以直接应用,在使用前需要经过整形,增加了激光器结构的复杂性。

2) 高功率平面波导激光器中存在自发辐射,需要对其进行抑制。寄生振荡对固态激光器是一个常见的问题,尤其是增益介质为平板状的激光器。自发辐射由于全内反射被约束在波导芯层之中,会与激光模式进

行增益竞争,大幅限制了可以获得的激光输出功率。如 4.3 节提到的郝瑞瓦特大学研制的平面波导激光器为了抑制寄生振荡,在波导左右两个侧面与大面进行切割,得到 83° 与 70° 的夹角。

3) 平面波导材料制备技术仍有待提高。无论是平面波导的制备还是增益介质材料的发展,自平面波导激光器面世以来便一直在飞速发展。平面波导增益介质材料众多,又各有其优缺点。对于平面波导的制备,需要考虑制备手法的性价比与难易程度,同时需要对特定增益介质的适应性、制造结构的光学质量、几何结构的可达成性以及波导设计的灵活性等诸多方面进行综合考虑。同时,常见的制备方法各有优劣,往往需要根据要达成的参数、几何形状等来选择对应的制备方法,而未有可以满足所有各项需求的制备技艺。

尽管存在以上各种问题,但总体上,平面波导激光器的发展仍然很有前景。随着科学研究的深入与工业技术的不断进步,对多种技术指标的平面波导激光器的需求将不断增加,并将使这种激光器向着窄线宽、高稳定性、高效率、高光束质量、高功率能量的方向快速、持续地发展,并在更多领域实现应用价值。

参 考 文 献

- [1] Thomson I J, Monjardin F J F, Baker H J, *et al.* Efficient operation of a 400 W diode side-pumped Yb:YAG planar waveguide laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(10): 1336-1345.
- [2] Liu Jiao, Wang Juntao, Zhou Tangjian, *et al.* Analysis and developments of high-power planar waveguide lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 79-85.
刘 娇, 王君涛, 周唐建, 等. 高功率平面波导激光器研究进展及分析[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(6): 79-85.
- [3] Beecher S J, Parsonage T L, Mackenzie J I, *et al.* Diode-end-pumped 1.2 W Yb:Y₂O₃ planar waveguide laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 22056-22061.
- [4] Xie Y. Research on Yb:YAG planar waveguide amplifier[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 20-21.
- [5] Wang J. High-average-power planar waveguide lasers[D]. London: University of Southampton, 2007: 44-45.
- [6] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Berlin: Springer Press, 2010: 68-74.
- [7] Starecki F, Bolanos W, Brasse G, *et al.* Rare earth doped LiYF₄ single crystalline films grown by liquid phase epitaxy for the fabrication of planar waveguide lasers[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 401(9): 537-541.
- [8] Field S J, Chartier I, Ferrand B, *et al.* Growth and low-threshold laser oscillation of an epitaxially grown Nd:YAG waveguide[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(11): 810-812.
- [9] Grant-Jacob J A, Beecher S J, Parsonage T L, *et al.* An 11.5 W Yb:YAG planar waveguide laser fabricated via pulsed laser deposition[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(1): 91-96.
- [10] d'Alessandro A, Donisi D, De Sio L, *et al.* Tunable integrated optical filter made of a glass ion-exchanged waveguide and an electro-optic composite holographic grating[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9254-9260.
- [11] Choudhary A, Dhingra S, D'Urso B, *et al.* Graphene Q-switched mode-locked and Q-switched ion-exchanged waveguide lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(6): 649.
- [12] Flores-Romero E, Rangel-Rojo R, Márquez H, *et al.* Self-pulsing behavior in a Nd:YAG ion-implanted waveguide laser[J]. *Laser Physics*, 2008, 18(5): 637-640.
- [13] Schmidt R V, Kaminow I P. Metal-diffused optical waveguides in LiNbO₃ [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 25(8): 458-460.
- [14] Hu Zhiyong, Sun Weicheng, Wang Zhaoying, *et al.* Latest developments of thermally bonded planar waveguide lasers with a double-clad fabric[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(2): 21-23.
胡智勇, 孙伟成, 王肇颖, 等. 热键合双包层平板波导激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(2): 21-23.
- [15] Zeidler G. Optical waveguide technique with organic dye lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(1): 884-885.
- [16] Hanna D C, Large A C, Shepherd D P, *et al.* A side-pumped Nd:YAG epitaxial waveguide laser [J]. *Optics Communications*, 1992, 91(3-4): 229-235.
- [17] Pelenc D, Chambaz B, Chartier I, *et al.* High slope efficiency and low threshold in a diode-pumped epitaxially grown Yb:YAG waveguide laser[J]. *Optics Communications*, 1995, 115(5-6): 491-497.
- [18] Brown C T A, Bonner C L, Warburton T J, *et al.* Thermally bonded planar waveguide lasers[J]. *Applied Physics*

- Letters, 1997, 71(9): 1139-1141.
- [19] Bonner C L, Brown C T A, Shepherd D P, *et al.* Diode-bar end-pumped high-power Nd:Y₃Al₅O₁₂ planar waveguide laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(12): 942-944.
- [20] Shepherd D P, Bonner C L, Brown C T A, *et al.* High-numerical-aperture, contact-bonded, planar waveguides for diode-bar-pumped lasers[J]. Optics Communications, 1999, 160(1-3): 47-50.
- [21] Griebner U, Grunwald R, Schönagel H. Thermally bonded Yb:YAG planar waveguide laser [J]. Optics Communications, 1999, 164(4-6): 185-190.
- [22] Bonner C L, Bhutta T, Shepherd D P, *et al.* Double-clad structures and proximity coupling for diode-bar-pumped planar waveguide lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 236-242.
- [23] Faulstich A, Baker H J, Hall D R. Face pumping of thin, solid-state slab lasers with laser diodes[J]. Optics Letters, 1996, 21(8): 594-596.
- [24] Pelaez-Millas D, Faulstich A, Baker H J, *et al.* A planar waveguide Nd:YAG laser, face pumped by laser diode bars [C]. SPIE, 1997, 3092: 25-28.
- [25] Brown C T A, Bonner C L, Warburton T J, *et al.* Thermally bonded planar waveguide lasers[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(9): 1139-1141.
- [26] Filgas D, Rockwell D, Spariosu K. Next-generation lasers for advanced active EO systems[J]. Raytheon Technology Today, 2008, 1(1): 9-13.
- [27] Yu A W, Betin A, Krainak M A, *et al.* Highly efficient Yb:YAG master oscillator power amplifier laser transmitter for future space flight missions[C]. Advanced Solid-State Photonics Optical Society of America, 2012: AW4A. 26.
- [28] Kang H X, Zhang H, Yan P, *et al.* An end-pumped Nd:YAG planar waveguide laser with an optical to optical conversion efficiency of 58% [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(12): 879-880.
- [29] Starecki F, Bolanno W, Braud A, *et al.* Red and orange Pr³⁺:LiYF₄ planar waveguide laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 455-457.
- [30] Xiao L, Cheng X, Xu J. High-power Nd:YAG planar waveguide laser with YAG and Al₂O₃ claddings[J]. Optics Communications, 2008, 281(14): 3781-3785.
- [31] Thomson I J, Monjardin F J F, Baker H J, *et al.* Efficient operation of a 400 W diode side-pumped Yb:YAG planar waveguide laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(10): 1336-1345.
- [32] Lin H F, Tang F, Chen W D, *et al.* Diode-pumped tape casting planar waveguide YAG/Nd:YAG/YAG ceramic laser [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 8104-8112.
- [33] Ma C Y, Zhu J F, Liu K, *et al.* Longitudinally diode-pumped planar waveguide YAG/Yb:LuAG/YAG ceramic laser at 1030.7 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3317-3319.
- [34] Beecher S J, Parsonage T L, Mackenzie J I, *et al.* Diode-end-pumped 1.2 W Yb:Y₂O₃ planar waveguide laser[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 22056-22061.