

新型非稳腔 Yb:YAG 400 W 平面波导激光器

摘要: 研究了一种平面波导激光器, 它包含一个 13 mm×12 mm×150 μm Yb:YAG 棒芯, 外面包覆 1 mm 厚的蓝宝石, 通过两个 450 W 二极管叠阵进行边缘泵浦, 叠阵加入了定制的像差修正相位片。激光器的平-凹谐振腔与其他圆盘薄片激光器相比, 可以产生 400 W 的平均功率, 激光束为低阶横模和多阶纵模, 斜率效率 75%, 横向光束质量通过采用新型模式选择的环形激光切割谐振腔反射镜来提高, 同时侧向光束质量通过采用非稳腔来提高。光束在谐振腔内每个往返可以得到 3~4 个均匀放大增益, 这就为功率增大提供了手段。

1 引言

平面波导激光器是大体积固态激光器和光纤激光器之间的过渡形式。热透镜效应可以通过流经工作区的一维热流来控制, 同时, 通过增加工作区的宽度和长度可以增大输出功率。我们在上一篇文章中说明了工作在连续和 Q 调制模式、平均功率超过 100 W 的高功率 Nd:YAG 平面波导激光器。

Yb:YAG 激光器引起人们兴趣的原因是它具有较高的转换效率。但由于 Yb:YAG 较高的透明阈值, 及它的三能级特性限制了可用的泵浦方式。采用临近耦合的二极管靶条不可能达到透明阈值, 例如, 以前用在 Nd:YAG 上的面泵浦方式。为了得到必要的泵浦强度, 需要采用定制的成像系统与单程多靶条二极管, 增加入射泵浦强度至接近 Yb:YAG 透明阈值的 10 倍。

对于低损耗的平面波导激光谐振腔, 必须要有有效的波导耦合。Degnan 和 Hall 引入了 3 种低损耗的波导谐振腔条件: 第一种, 使平面反射镜非常接

近于波导平面, 从而能够得到有效的多模耦合。第二种, 凹面反射镜放置在波导平面同心的远场位置, 从而能够得到有效的多模波导耦合。第三种, 一个反射镜的曲率是瑞利距离的两倍, 并放置在波导平面的瑞利距离处。这个位置可以得到有效的波导耦合, 并具有模式选择性, 可以从多模波导中得到基模光束。目前, 复合非稳腔是从平面波导高功率激光器中得到近衍射极限光束质量的最有效方法。

在固态激光器中, 寄生振荡是普遍问题, 特别是薄片形增益介质。波导棒芯的随机自发辐射由整个内部反射所俘获。俘获光然后进行激光模式增益竞争, 极大地限制了提取的输出功率。采用 Zemax 光线追迹软件对平面波导进行建模, 并进行了模拟受激辐射。每条光线均进行追迹直到它们从棒芯耦合进入包覆层。测量不同边面角的每条光纤的光程, 发现边面角为 7°和 20°时光程最小。因此, 本研究中平面波导具有这些边面角, 在激光输出时受捕获光线的影响最小。

2 边泵浦的 Yb:YAG 激光设置

本工作中的平面波导包含 $150\ \mu\text{m}$ 厚的 Yb:YAG 2% 掺杂的棒芯, 被两个 1 mm 厚的蓝宝石夹持, 通过 Onyx Optics 公司进行键合。整个板条波导的尺寸为宽 12 mm, 长 13 mm, 高 2.15 mm。两个端面进行光学抛光, 并为激光谐振腔耦合镀有 $1\ 030\ \text{nm}$ 的增透膜。两个侧面进行刻槽和抛光, 并为二极管侧面泵浦镀有 $940\ \text{nm}$ 的增透膜。平面波导安装在两个铜质的水冷热沉上, 通过波导结构的两个最大面散热。

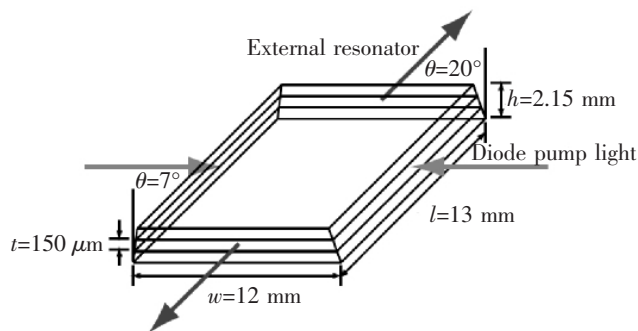


图 1 Yb:YAG 平面波导包含 $150\ \mu\text{m}$ 厚的 Yb:YAG 2% 掺杂的棒芯, 被两个 1 mm 厚的蓝宝石夹持。通过顶面和底面接触制冷进行散热。

Yb:YAG 平面波导采用两个六靶条二极管激光叠阵侧面泵浦。每个叠阵发射约 $940\ \text{nm}$ 的激光, 对 Yb:YAG 为峰值吸收, 输出功率为 $400\ \text{W}$ 。每个叠阵采用定制的像差修正激光切割相位片, 修正二极管指向误差和快轴准直误差。另外, 这种相位修正片可以改变光束以修正圆柱会聚透镜的像差。如图 2 所示, 相位片附加在二极管叠阵上。相位片和圆柱会聚透镜形成的线聚焦高度 $<150\ \mu\text{m}$, 水平接近 $5\ \mu\text{m}\ \text{rms}$ 。慢轴修正采用两片镀金侧面反射镜, 通过折叠二极管光在快轴焦点上产生 13 mm 宽的条带。每个侧面超过 90% 的入射二极管光线耦合进入了波导棒芯, 导致在入射强度超过 $20\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 时, 单程吸收接近 75%。

两个二极管叠阵相对于平面波导的角度需要进行选择, 从而保证没有被吸收的泵浦光穿过工作物

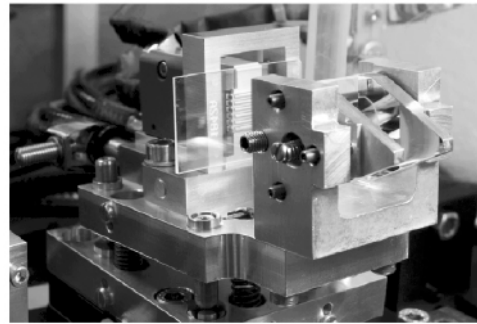


图 2 完整的二极管激光叠阵, 包括像差修正相位片、圆柱会聚透镜和镀金慢轴反射镜。

质时, 不会入射进对面的二极管叠阵。图 3 给出了二极管叠阵和平面波导的对准关系照片。二极管叠阵排列的优化可以通过荧光成像技术来实现。采用 Spiricon 公司光束分析软件的 CCD 相机对平面波导的激光面之一进行成像。 $1\ 030\ \text{nm}$ 的滤光片 (FWHM 为 $10\ \text{nm}$) 放置在相机之前, 以保证只有波导的荧光可以成像, 其中不包含二极管泵浦光信号。二极管叠阵的角度和位置即可通过显示的荧光进行调整, 荧光强度最大代表最优化的排列。

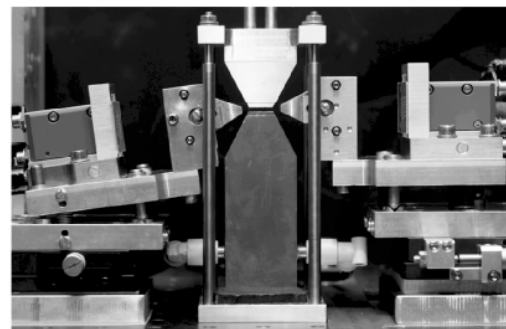


图 3 封装在铜热沉中的 Yb:YAG 平面波导, 两个二极管激光泵浦叠阵进行了排列。

在 Yb:YAG 激光器中, 由于其准三能级结构, 均匀泵浦至关重要。任何低于泵浦强度和低光强度区可能都在透明阈值之下, 会给激光谐振腔引入很高的损耗。利用前面提到的荧光成像技术, 即可测量穿过波导面的荧光强度分布。这样就给出了侧向泵浦均匀度的近似, 并且泵浦均匀度为通过每侧有两个峰值的波导宽度的近似均值。这是由于光束分

布是通过相反方向上传输的两个比尔定律指数累加产生的。

3 有效的激光工作

为了保证有效的激光工作，采用两个谐振腔配置。第一，复合稳定波导为第一种，设计用于最小化损耗和提高最大功率。第二，复合非稳腔设计用于在侧面方向优化光束质量。

图4显示了平凹谐振腔配置用于提取最大的输出功率。80%反射率的平面输出耦合镜放在一个波导面的0.5 mm处，可以在横向上产生多模第一种波导耦合。后反射镜包含1 m曲率半径镀高反膜的反射镜，放在后波导面的0.5 mm处。当在侧面方向上形成一个稳定平-凹谐振腔时，即可产生第一种横向耦合。

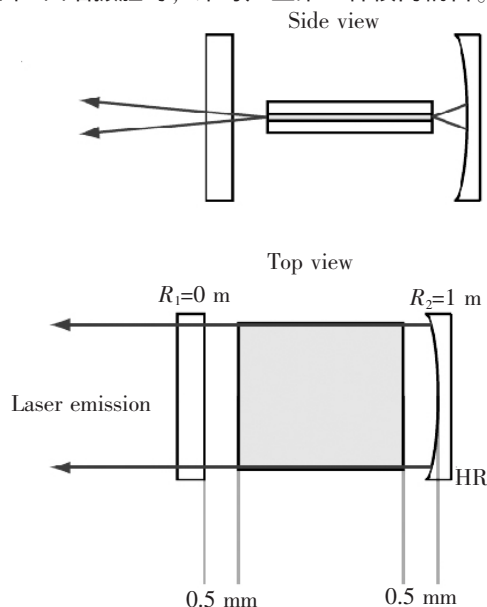


图4 横向平-凹谐振腔产生多模波导耦合，在侧向上为多模稳定自由空间谐振腔。

图5给出了复合非稳腔波导谐振腔的示意图。这个谐振腔包含一个共焦非稳腔，在侧向方向放大率1.1，给出等价输出耦合率为10%。在横向，输出耦合器放在同心位置，产生第二类的波导耦合。后反射镜放在后波导面1 mm处，产生多模第一类波导耦合。

图6给出了两个谐振腔中得到的功率传输曲线。

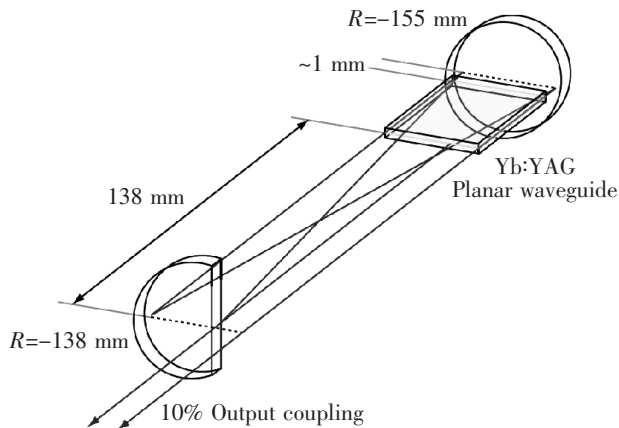


图5 复合非稳波导谐振腔的示意图

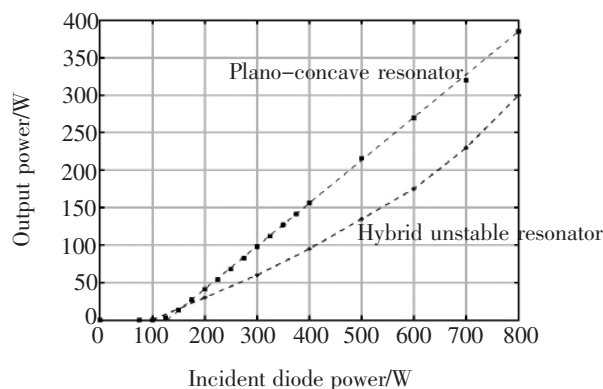


图6 多模复合平-凹谐振腔和复合非稳腔不同入射二极管泵浦功率下的激光输出功率

利用平-凹谐振腔 800 W 泵浦入射到波导上，将产生约 400 W 的功率输出。假设在单程中 75% 的泵浦光被吸收，也就是斜率效率约为 75%。复合非稳腔不能从波导中提取出这么高的功率，但也能达到输出功率 300 W，斜率效率约 60%。

图7给出了每个谐振腔激光光束的光强分布。平-凹谐振腔在侧向为高阶多模，而在横向为近单模。拟合波导模式为横向光束分布，显示激光输出为 TE_1 和 TE_3 波导模式的混合。由于波导高阶多模的特性，这种现象并不经常出现，通常可以支持数十个模式。这种高阶模式自压缩主要是由于横向泵浦均匀度造成的。模拟横向泵浦分布显示它为近高斯分布。这将导致高阶模比低阶模具有更低的增益，

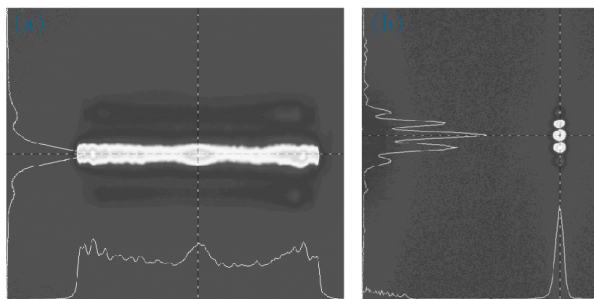


图7 (a) 平-凹谐振腔光束分布, 显示横向为低阶、侧向为高阶多模输出; (b) 复合非稳腔的光束分布, 显示在侧向为近衍射极限, 由于包覆层模式干涉, 横向为干涉条纹的包络。

也就是从波导中心最强泵浦的地方提取功率。如图7(b)所示, 复合非稳腔极大地提高了侧向光束分布, 产生了一个近衍射极限的光束。然而, 在横向上, 光束分布变成了干涉条纹的包络分布, 整个发散角和波导基模相似。这是由于在非稳腔蠕变过程中, 光束逐渐耦合进入了包覆层所致, 在输出光束中产生了干涉条纹。包覆层耦合可以通过采用腔内狭缝来降低。

4 激光切割定制的环形反射镜

提高横向光束质量的方法是采用第三类波导耦合。这可以仅将基模波导形式有效地耦合进波导。对于 Yb:YAG 平面波导激光器, 第三类的条件可以通过把曲率半径为 17 mm 的反射镜放在波导面 8 mm 处来实现。为了获得第三类波导耦合, 同时仍然利用非稳腔, 需要采用侧向曲率 200 mm 和横向曲率 17 mm 的环形镜。目前, 用于产生环形表面的机械抛光技术非常耗时而且昂贵, 因此, 我们采用 CO₂ 激光加工技术来制造指定的环形镜。

我们采用了两种技术来制造这些反射镜, 第一种由 Power Photonic 公司实现, 第二种由本课题组实现。第一种技术是采用 CO₂ 激光来切割指定形状的表面, 然后用长脉宽、低功率激光脉冲来抛光已加工的表面, 第二种技术采用 CW 模式的 CO₂ 激光, 激光功率略高于熔石英衬底的烧熔阈值, 这就在表

面产生了沟槽, 采用重叠沟槽的光栅扫描技术不断重复这一过程, 即可产生任意指定曲率的沟槽。

利用该技术加工了两块反射镜, 第一块如图8(a)所示, 为激光切割成 230 mm 曲率的圆柱形的熔石英衬底, 并具有环形表面。中心区域曲率半径为 17 mm, 具有从激光器表面 8 mm 处与波导基模尺寸匹配的宽度。这个中心弯曲区域的每一边为两条未抛光的激光切割深沟槽, 设计用于散射更高阶的波导模。第二块如图8(b)所示, 它是在一块平面熔石英样片上采用激光烧蚀技术加工而成。这样就产生了曲率半径为 16 mm、宽度同样匹配的波导基模。两个样片都镀有 1 030 nm 的高反膜, 产生第三类谐振腔反射镜。

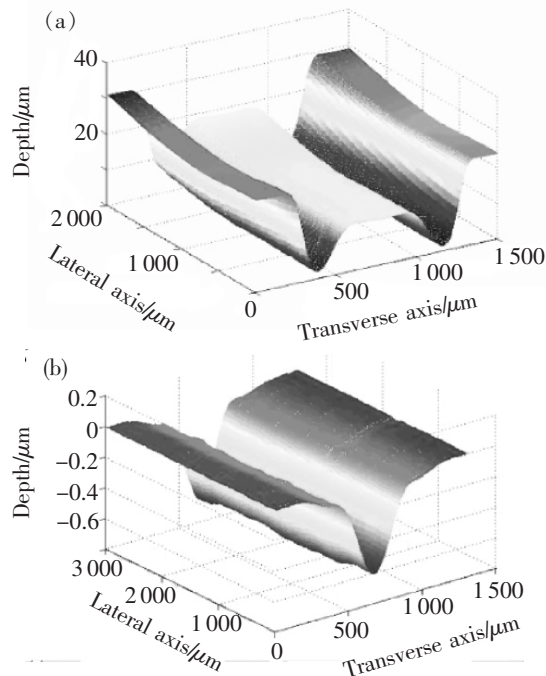


图8 (a) 在圆柱形熔石英衬底上激光切割反射镜的表面形貌; (b) 在平面熔石英衬底上激光烧蚀反射镜的表面形貌。

为了测试反射镜, 每个反射镜都依次轮流对准后波导面。一个平面 80% 反射率的输出耦合镜以 0.5 mm 对准相对的波导面。输出功率和光束分布都进行记录并与镀有高反膜的 15.5 mm 曲率的商用圆柱形反射镜进行对比。采用商用反射镜能够得到多模平-凹

谐振腔输出功率的 95%，激光切割反射镜能得到多模功率的 60%。功率减少主要是由于圆柱形衬底最初质量引起的低频表面粗糙度造成的。激光烧蚀反射镜达到了多模输出功率的 90%。

图 9 给出了每个反射镜的光束分布与理论基模的对比，表明每个反射镜都给出了近单模工作。然而，每个光束分布都在标准高斯光束边缘具有一定的功率输出，这主要是由于少量光耦合进入了波导包覆层，可以通过腔内狭缝来剔除。

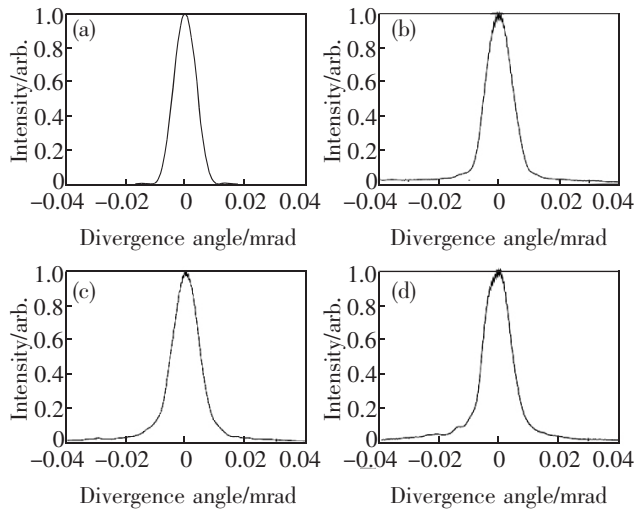


图 9 不同谐振腔后反射镜的横向光束分布：(a)理论上的 TE₁ 波导基模；(b)商用圆柱形反射镜；(c)激光切割和抛光谐振腔反射镜；(d)激光烧蚀谐振腔反射镜。

5 Yb:YAG 平面波导的增益

脉冲激光器对于许多工业应用都非常重要，特别是激光器具有亚纳秒的脉宽。在此脉宽范围，激光和材料相互作用时间非常短，因此产生了非常小的加热影响区域，可以进行精细加工。遗憾的是，储存在 Yb:YAG 平面波导激光器中的能量不能进行调 Q 操作。一个饱和的调 Q 脉冲足以损伤 YAG 材料本身。作为一种替代，主振功率放大器 (MOPA) 可以在这里应用，从而使 Yb:YAG 平面波导增益区放大，产生低功率的亚纳秒激光振荡器。这里介绍的工作研究了 Yb:YAG 平面波导中的增益，从而进一步

研究放大器工作的可能性。

利用 15 mW、1 030 nm 光纤耦合二极管激光器测量了 Yb:YAG 波导激光器的增益。产生的激光进行了准直，然后模式匹配到波导端面上。通过测量经过波导的二极管探测光束功率即可确定增益。图 10 (a) 给出了不同二极管泵浦电流的平面波导中心的增益。在二极管电流高于 60 A 时 (500 W 入射功率)，发生泵浦饱和，限制了可用增益为 1 cm⁻¹。图 10 (b) 给出了 3 个不同二极管泵浦电流的侧向分辨增益 (低于泵浦二极管激光器阈值 10 A)。结果显示，在全泵浦电流下，穿过平面波导的侧向增益较为均匀，为 1 cm⁻¹。图中显示的侧向增益起伏主要是由于二极管探测光束横向空间分布和非均匀横向二极管泵浦分布之间的不匹配造成的。

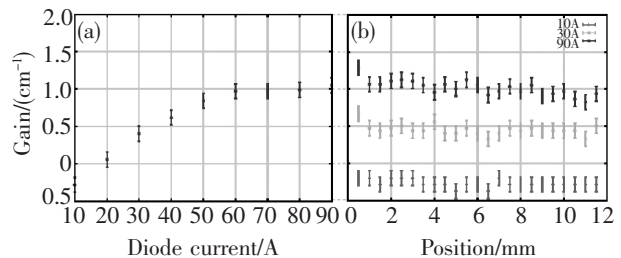


图 10 (a)不同泵浦二极管电流平面波导中心的增益，饱和出现在 60 A 以上 (500 W 的入射功率)；(b)不同二极管泵浦电流的侧向分辨增益。

增益主要受 ASE 和绿色荧光两者的限制。ASE 可以通过刻槽边缘面部分压缩，仅仅限制小部分增益。1 cm⁻¹ 增益表示每经过谐振腔一次放大 3~4 倍。因此，利用这种增益区，经过 6~7 次单程反射放大，可以得到 1 000 倍的放大率。对于将短脉冲激光器放大到适合工业应用的功率级别，这种方法相当理想，工业应用通常需要激光器具有高功率和高重频。

6 结 论

本文给出了一个高效率的 Yb:YAG 平面波导激光器。该激光器为多模光束，斜率效率 75%，可以得到 400 W 的功率输出。激光器采用复合非稳腔工

作时可以达到较高的侧向光束质量。对激光切割定制的环形谐振腔反射镜进行初步尝试,结果表明,可以产生横向和侧向近衍射极限输出的复合第三类非稳腔。在双面泵浦情况下会产生泵浦饱和,同时

得到单程 3~4 倍放大率的均匀增益。这就使 Yb:YAG 平面波导有机会工作在亚纳秒脉宽的 MOPA 配置中。

郭汝海 译

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4开本; 刊号: ISSN 1674-2915/CN22-1400/O4; 国内外公开发行, 邮发代号: 国内12-140, 国外BM6782。

- ★中国科技核心期刊
- ★中国光学学会光电技术专业委员会会刊
- ★中国学术期刊(光盘版)源期刊

报道内容: 基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿, 洽谈合作。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn, gxyygx2007@126.com

联系电话: (0431) 86176852; (0431) 84627061 传 真: (0431) 84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路3888号 (130033)

《中国光学》编辑部