

文章编号: 1001-3806(2011)06-0745-03

角锥棱镜阵列谐振腔输出模式研究

刘文兵, 钟 鸣, 夏惠军, 温 阳
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了研究角锥棱镜阵列谐振腔的输出特性, 利用角锥棱镜阵列作为后腔镜, 与平面镜构成角锥棱镜阵列谐振腔, 模拟计算了角锥棱镜阵列谐振腔输出模式的近场及远场分布, 理论分析了谐振腔的相干输出, 实验获得了采用该腔型的钕玻璃激光器的输出模式的近场及远场分布。结果表明, 模拟计算与实验得到的模式分布相吻合, 近场光斑外形为六边形, 与角锥棱镜阵列形状相似; 远场聚焦光斑中心为一强峰, 周围分布着多圈强度小得多的次峰, 各圈的脉冲峰数量及分布同角锥棱镜阵列中对应圈的角锥棱镜的数量及分布一致。理论与实验证实了利用角锥棱镜阵列谐振腔实现激光器相干输出的可行性。

关键词: 激光技术; 角锥棱镜阵列; 模式分布; 相干输出

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.006

Study on output modes of a corner cube array resonator

LIU Wen-bing, ZHONG Ming, XIA Hui-jun, WEN Yang
(Southwest Institute of the Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to study the output characteristics of a corner cube array resonator, the resonator was constructed with a corner cube array (CCA) and a planar mirror as rear mirror and output mirror respectively. Its near-field and far-field mode distribution was demonstrated through numerical simulation. The coherent output of the resonator was theoretically analyzed. Furthermore, the mode distribution of a Nd:glass laser with this type of resonator was obtained in experiments. The results show that the simulated mode distribution agrees with the experimental results. The profile of the near-field mode distribution is hexagonal and similar to the geometry of the CCA. There is a high pulse in the middle of the far-field beam spot with many low pulses around it. The quantity and layout of the pulses in each circle are the same as those of the corresponding corner cubes in the CCA. The results also show that it's feasible to achieve coherent laser output with a corner cube array resonator.

Key words: laser technique; corner cube array; mode distribution; coherent output

引 言

角锥棱镜具有逆向反射特性, 人们常利用它作为激光器谐振腔的后腔镜构成“免调试激光谐振腔”^[1], 其具有稳定性高、抗失调能力强的特点^[2], 已在运动和强震动等工作环境中得到了很好的运用^[3]。除此之外, 由于振荡光线在不同部位两次通过激光介质, 因此, 能部分克服因工作物质内部折射率、密度、应力、光抽运等不均匀所造成的增益分布不均匀, 也就是人们所说的准相位共轭作用。人们对角锥棱镜激光谐振腔进行了充分的研究^[4-12], 对角锥棱镜阵列谐振腔的研究相对较少。参考文献[13]中提出了利用角锥棱镜阵列实现激光器相干输出的想法。作者对角锥棱镜阵

列谐振腔钕玻璃激光器进行了实验研究^[14], 进一步证实了利用角锥棱镜阵列实现激光器相干输出的可能性。YUAN 等人^[15]分析了角锥棱镜阵列谐振腔产生多模输出的原因, 提出采用腔内滤波的方法来实现激光器单模输出, 实验获得了近5倍衍射极限的输出。

本文中模拟计算了角锥棱镜阵列谐振腔输出光场的近场及远场分布, 理论分析了角锥棱镜阵列谐振腔相干输出的特性, 实验获得了采用此种腔型的钕玻璃激光器输出光场的分布, 并对结果进行了分析与讨论。

1 输出模式模拟

角锥棱镜阵列底面类似于蜂窝, 其每个小角锥棱镜底面为正六边形, 整个阵列外形亦为正六边形, 如图1所示。以角锥棱镜阵列中心为第1圈, 则第 n 圈(虚线正六边形所示, $n > 1$)包含 $6(n-1)$ 个小角锥棱镜, 包含 m 圈的角锥棱镜阵列共有 $(3m^2 - 3m + 1)$ 个小角锥棱镜。

作者简介: 刘文兵(1979-), 男, 工程师, 主要从事强激光技术方面的研究。

E-mail: novemberlwb@hotmail.com

收稿日期: 2010-11-29; 收到修改稿日期: 2010-12-06

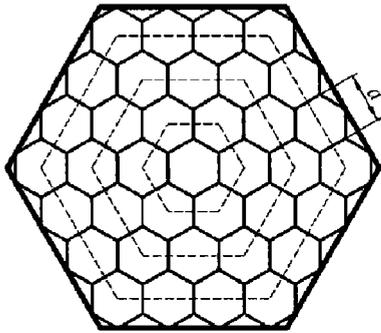


Fig. 1 Sketch-map of CCA bottom

由角锥棱镜阵列 (corner cube array, CCA) 和平面镜 M 构成的激光器谐振腔如图 2 所示, 其中平面镜为输出镜。设激光器腔长为 L , 单个角锥棱镜的内切圆直径为 a , 平面镜和角锥棱镜阵列的有效光阑半径为 b , z 轴为激光器的光轴, 坐标系原点位于光轴上, M 镜处和 CCA 处分别为 $x-y$ 平面和 $x'-y'$ 平面。初始光场取在 M 镜处, 向左传播, 被角锥棱镜阵列反射后, 再向右传播, 被平面镜反射, 完成一个往返。初始场分布经过多次迭代后形成的稳定场分布, 即是谐振腔的本征模式。

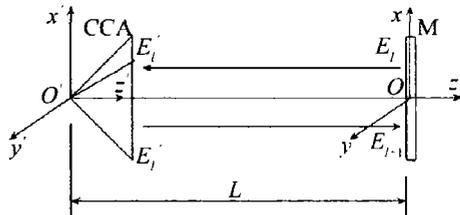


Fig. 2 Sketch-map of CCA resonator

取第 l 次往返过程中, 镜面 M 处的光场分布为 $E_l(x, y)$, 则向左传输 L 后到达角锥棱镜阵列处的光场 $E_l'(x', y')$ 可用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程表示为:

$$E_l'(x', y') = \frac{\exp\{ikL\}}{i\lambda L} \iint_{\Sigma} E_l(x, y) \exp\{ik[(x' - x)^2 + (y' - y)^2]/(2L)\} dx dy = \frac{\exp\{ikL\}}{i\lambda L} \times \exp\left\{\frac{ik}{2L}(x'^2 + y'^2)\right\} \mathcal{F}\{E_l(x, y) \times \exp\left[\frac{ik}{2L}(x^2 + y^2)\right]\} \quad (1)$$

式中, λ 为光波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, Σ 为孔径积分域, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。

到达角锥棱镜阵列处的光场被角锥棱镜阵列分成 $(3m^2 - 3m + 1)$ 部分, 每一部分经由相应的角锥棱镜传输变换后再反射回去。阵列中每个角锥棱镜的 3 条棱以及角锥棱镜间的拼接缝对光线没有反射作用, 其反射光取为 0。阵列中每个角锥棱镜的反射具有位相变换和坐标变换两种作用, 分别表示为:

$$E_{10}'(x', y') = E_l'(x', y') \exp\{iks(x', y')\} \quad (2)$$

$$E_l''(x', y') = E_{10}'(-x', -y') \quad (3)$$

式中, $s(x', y')$ 为角锥棱镜各区域出射光线的光程差分布, 对于理想角锥棱镜阵列中所有角锥棱镜均有 $s(x', y') = 0$, $E_{10}'(x', y')$ 为附加角锥棱镜的位相变换后的光场分布, $E_l''(x', y')$ 为经角锥棱镜阵列传输变换后的光场分布。

当光场从左边再次向右传输到平面镜处, 仍然可利用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程得到场分布。对本征模 $E_0(x, y)$ 的复振幅叠加一个透镜的相位因子, $\exp\{-ik(x^2 + y^2)/(2f)\}$, 其中, f 为透镜焦距, 并利用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程传输到焦点处, 可得模场的远场分布。

因此, 角锥棱镜阵列谐振腔输出模式分布可采用傅里叶变换方法和 Fox-Li 数值迭代算法^[16] 进行计算。采用上述方法, 模拟计算了理想角锥棱镜阵列谐振腔输出光场的分布, 计算中角锥棱镜阵列由 4 圈共 37 个角锥棱镜构成, 角锥棱镜内切圆直径 7mm, 棱线宽度及角锥棱镜间拼接缝宽均取 0.1mm, 腔长 900mm。计算得到的近场、远场分布如图 3、图 4 所示。从图中可以看出, 角锥棱镜阵列谐振腔输出模式较均匀, 其外形与角锥棱镜阵列类似, 为正六边形; 同时, 由于角锥棱镜间拼接缝隙及角锥棱镜 3 个棱边的衍射作用, 近场模式被分成 37 个部分, 这与阵列中角锥棱镜的数目及布局一致; 经透镜聚焦后的远场分布中心为一强度极大光斑, 在其周围规则分布着多圈强度小得多的光斑, 这说明角锥棱镜阵列谐振腔实现了相干输出。各圈脉冲峰的数量及布局同角锥棱镜阵列中对应圈的角锥棱镜的数量及布局相同。

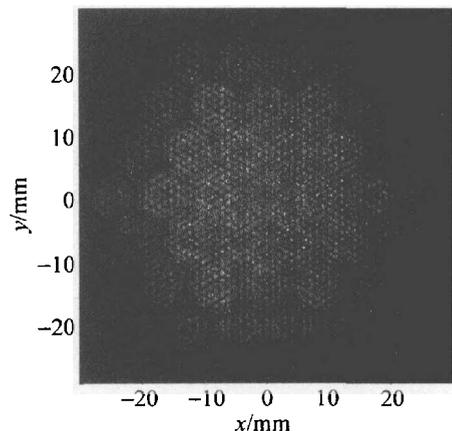


Fig. 3 Near-field mode distribution of CCA resonator

角锥棱镜阵列由 37 个小角锥棱镜组成, 这可看作是将腔内波面分割成 37 个子波面, 相当于 37 个子谐振腔, 这 37 个子谐振腔相互关联, 当其中的一个子谐振腔起振以后, 引起临近的子谐振腔同步振荡, 这样所有谐振腔的输出满足同相位条件, 从而实现谐振腔的相干输出。所有子谐振腔输出对中央主峰都有贡献, 因此次峰比主峰低很多。

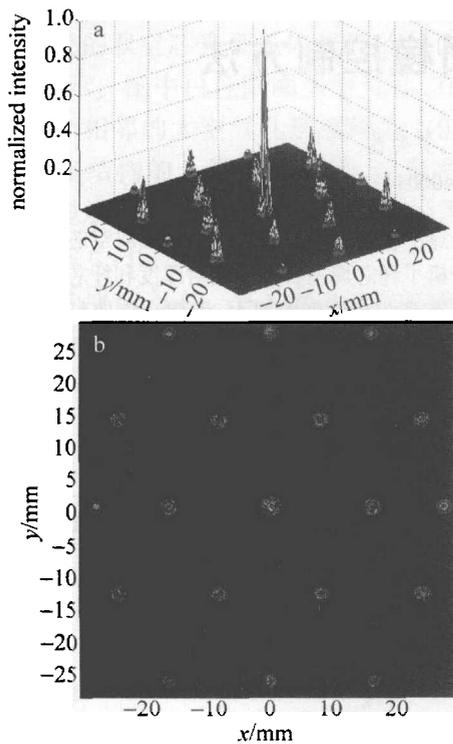


Fig. 4 Far-field mode distribution of CCA resonator

2 实验

2.1 实验装置

采用角锥棱镜阵列谐振腔的钕玻璃激光器实验装置如图5所示。角锥棱镜阵列作为谐振腔的后腔镜，其有效区域由37个小角锥棱镜组合而成，每个小角锥棱镜的底面做成正六边形，其内切圆直径为7mm，角锥棱镜阵列呈正六边形，如图6所示。

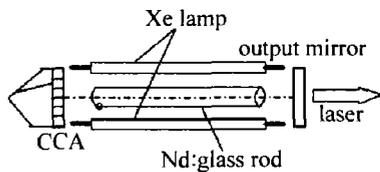


Fig. 5 Experimental setup

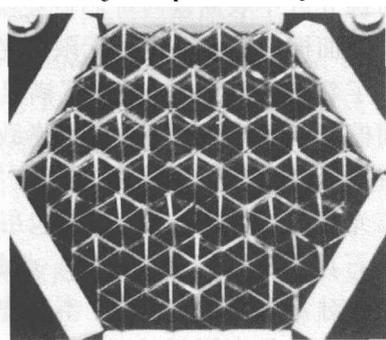


Fig. 6 Photo of CCA

2.2 实验结果

实验中采集了角锥棱镜阵列谐振腔钕玻璃激光器输出光斑的近场分布、远场分布。激光器输出光斑的

近场分布直接用相纸采集，远场分布在聚焦透镜的焦面处用相纸采集，同时用光束质量分析仪采集光斑得到远场光斑的3维分布。

实验采集到的输出光斑的近场分布如图7所示，远场分布如图8所示。从图中可以看出，实验得到的结果与模拟计算的结果相吻合，近场光斑的形状与角锥棱镜阵列的外形相似，呈六边形，但是由于输出光斑的能量密度较大，光斑烧蚀相纸并向四周扩散，使得接收到的光斑变成“一大片”而不能分辨出各个角锥棱镜的间隙；远场光斑包含多圈脉冲峰，各圈脉冲峰的数量与分布同角锥棱镜阵列中对应圈的角锥棱镜的数量与分布一致，光斑中间为一强度极大峰，周围分布着的多圈次峰的强度要小得多。这说明角锥棱镜阵列谐振腔钕玻璃激光器实现了相干输出，输出光束不是一系列强度相等的光斑，而是中间出现了一个巨峰，在其周围分布着一系列强度小得多的次峰。

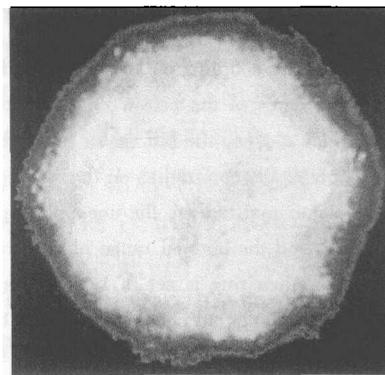


Fig. 7 Near-field mode distribution of Nd: glass laser with CCA resonator

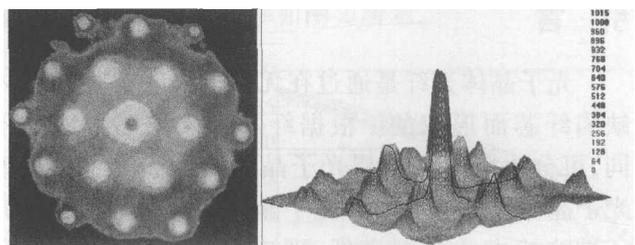


Fig. 8 Far-field mode distribution of Nd: glass laser with CCA resonator

3 结论

角锥棱镜阵列谐振腔本征输出模式的近场分布与角锥棱镜阵列的外形相同，为正六边形，同时，由于角锥棱镜棱边及角锥棱镜间拼接缝隙的衍射作用，光场被分成多个部分；经透镜聚焦后的远场分布中心为一强度极大峰，周围分布着多圈强度小得多的次峰，各圈的数量与分布同阵列中对应圈的角锥棱镜的数量及分布一致。将角锥棱镜阵列谐振腔用于钕玻璃激光器得到的光场分布与模拟计算结果一致。理论分析与实验结果表明，利用角锥棱镜阵列谐振腔实现激光器的相

(下转第751页)

通过适当调节纤芯截切半径的值,可以避免出现表面模。在文中所述光纤结构下,能够抑制表面模的纤芯最佳截切半径为 $r_c = 0.9\lambda \sim 1.0\lambda$ 。这为双空芯光子晶体光纤中表面模的控制提供了理论依据,丰富和完善了空芯光子晶体光纤的理论基础。

参 考 文 献

- [1] HUANG J J, LI G, CHEN M, *et al.* Simulation dispersion properties of photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 432-435 (in Chinese).
- [2] MANGAN B J, KNIGHT J C, BIRKS T A, *et al.* Experimental study of dual-core photonic crystal fibre[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(16): 1358-1359.
- [3] LEE B H, EOM J B, KIM J, *et al.* Photonic crystal fiber coupler[J]. *Optics Letters*, 2002, 10(27): 812-814.
- [4] PAVEL P, KANKA J. Erbium-doped twin-core fibre narrow-band filter for fibre lasers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2001, 33(4-5): 571-581.
- [5] GAUDEN D, MECHIN D, VAUDRY C, *et al.* Variable optical attenuator based on thermally tuned Mach-Zehnder interferometer within a twin core fiber[J]. *Optics Communications*, 2004, 231(1/6): 213-216.
- [6] DAI J. Researches on the photonic-bandgap fibers and the application of photonic-bandgap fibers[R]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009: 16-17 (in Chinese).
- [7] WANG Zh. Study on functional devices of photonic crystal fibers [R]. Tianjin: Nankai University, 2007: 24-26 (in Chinese).
- [8] WEST J A, SMITH C M, BORRELLI N F, *et al.* Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1485-1496.
- [9] KIM H K, SHIN J, FAN S, *et al.* Designing air-core photonic-bandgap fibers free of surface modes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(5): 551-556.
- [10] AMEZCUA-CORREA R, GEROME F, LEON-SAVAL S G, *et al.* Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1142-1149.
- [11] ROBERTS P J, WILLIAMS D P, MANGAN B J, *et al.* Realizing low loss air core photonic crystal fibers by exploiting an antiresonant core surround[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 8277-8285.
- [12] ZHANG H, WANG Q G, YANG B J. Design of core-cladding interface of hollow-core photonic-bandgap fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 28(3): 543-548 (in Chinese).
- [13] YU R J, XIANG Y, CHEN M Y, *et al.* Research on coupling lengths of twin-core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(7): 775-777 (in Chinese).
- [14] COUNY F, BENABID F, ROBERTS P J, *et al.* Identification of bloch-modes in hollow-core photonic crystal fiber cladding[J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 325-338.
- [15] MICHEL J F D, KIM H K, SHIN J, *et al.* Simple geometric criterion to predict the existence of surface modes in air-core photonic-bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 1864-1872.

(上接第 747 页)

干输出是可行的。

参 考 文 献

- [1] CHENG Y, MAO S Q, WANG Z H, *et al.* Avoidance adjust solid state laser[J]. *Laser Technology*, 1999, 23(2): 68-70 (in Chinese).
- [2] CHENG Y, WANG X B, SUN B, *et al.* Study of directional prism cavity character[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, A27(6): 537-541 (in Chinese).
- [3] MAO S Q, CHENG Y, WANG X B, *et al.* A kind of highly stabilized solid-state lasers with directional prism reflector[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3862: 210-214.
- [4] ZHOU G S, ALFREY A J, CASPERSON L W. Modes of a laser resonator with a retroreflecting corner cube mirror[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(9): 1670-1674.
- [5] GAO W Q, YAO G M, XU L X, *et al.* Passively Q-switched Nd³⁺:YAG laser with corner cube[J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(6): 332-335.
- [6] LU C Y, LI L, LIU X, *et al.* Laser diode-pumped passively Q-switched laser with corner-cube resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1228-1231 (in Chinese).
- [7] LU C Y, WANG X B, GUO Y L, *et al.* Study on directional prism improving the output stability of Q-switched by Cr⁴⁺:YAG[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 187-189 (in Chinese).
- [8] LIU X, LU C Y, WANG X B, *et al.* Passively Q-switched intracavity optical parametric oscillator with corner-cube resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(4): 485-490 (in Chinese).
- [9] CHEN B, CHENG Y. Consolidated design of eye-safe OPO laser[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 91-93 (in Chinese).
- [10] SHEN M X, WANG S M, HU L G, *et al.* Mode properties produced by a corner-cube cavity[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(20): 4091-4094.
- [11] CHENG Y, SUN B, WANG X B, *et al.* Military laser maintainability[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 229-230 (in Chinese).
- [12] WANG X B, SUN B, CHENG Y, *et al.* Properties of flattened Gaussian beam in directional prism cavity[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 117-119 (in Chinese).
- [13] CHENG Y. Development and progress of adjust-free solid state laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 297-301 (in Chinese).
- [14] LIU W B, ZHONG M, XIA H J, *et al.* Experimental study on the Nd:glass laser with corner cube array resonator[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2009, 26(2): 168-172 (in Chinese).
- [15] YUAN X D, JIANG X Y, ZHENG J G, *et al.* Output properties of cube corner array resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(6): 813-816 (in Chinese).
- [16] FOX A G, LI T. Resonant modes in a maser interferometer[J]. *Bell System Technology Journal*, 1961, 40(2): 453-488.