

# 大气湍流对激光传输的影响\*

郭振华 许德胜 王世鹏 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉)

**摘要:** 本文讨论了在高楼顶与校园后山头间1500m距离上, 大气湍流对激光束传输的影响。给出了测得的 $C_n$ 值范围, 激光束传输曲率和激光束聚焦光斑直径等, 它们与理论结果基本一致。

## Effect of atmospheric turbulence on laser beam propagation

Guo Zhenhua, Xu Desheng, Wang Shipeng, Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

**Abstract:** In this paper, the effect of atmospheric turbulence on laser beam propagation between tops of the high-building and the hill behind our university campus at the distance of 1500m is discussed. The typical range of measurable  $C_n$  values, curvature of the laser beam propagation and the focal spots diameter of the laser beam are given, which are agreement with the theory analysis.

### 引 言

激光通讯、测距、制导、定位、导航、侦察以及激光武器的应用等等都与激光在大气中的传输有关。它必然要涉及大气的各种干扰, 特别是大气湍流的影响。关于大气湍流对激光束传输的影响已有一些研究报道<sup>[1,2]</sup>, 提出了诸如Kolmogorov的经典理论——惯性子域模型; 现代理论——图解法, Markov近似; LMSP法; 基于谐振思想的饱和区诱导论等。

由于激光束的高亮度等特性, 它对大气湍流的微结构就比较敏感, 要把大气湍流的微观结构和它的统计性质联结起来, 在整个湍流团内可以用一个结构张量 $D_{ij}(\vec{r})$ 来描述它的统计性质。湍流气团内两个不同点运动速度差的平方平均值为

$$D_{ij}(\vec{r}) = \langle [v_i(\vec{r}_1 + \vec{r}) - v_i(\vec{r}_1)][v_j(\vec{r}_1 + \vec{r}) - v_j(\vec{r}_1)] \rangle \quad (1)$$

式中,  $v_i, v_j$ 是不同的速度分量; 尖括号表示总体平均;  $\vec{r}$ 是两点连线矢量。在局部均匀, 各项同性的大气湍流中可以简化(1)式为

$$D_{ij}(\vec{r}) = [D_{rr}(r) - D_{ii}(r)]n_i n_j + D_{ii}(r)\delta_{ij} \quad (2)$$

\* 华中理工大学光学系激光专业毕业生蒋红兵、张轶仙、彭文焱、常小成等同学参加了部分实验工作。

式中,  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \text{ 时} \\ 0 & i \neq j \text{ 时} \end{cases}$   $\vec{n}$  是  $\vec{r}$  方向单位矢量;

$D_{rr}$  是平行于  $\vec{r}$  方向风速分量结构常数;  $D_{\perp r}$  是垂直于  $\vec{r}$  方向风速分量结构常数, 对于自由边界的非压缩湍流有  $D_{\perp r} = \frac{1}{2r} \frac{d}{dr} (r^2 D_{rr})$ 。所以湍流统计性质就可以用单个结构常数  $D_{rr}$  描述, 即

$$D_{rr} = \langle [v_r(\vec{r}_1 + \vec{r}) - v_r(\vec{r}_1)]^2 \rangle \quad (3)$$

且遵从Kolmogorov的2/3方定律:

$$D_{rr} = C_v^2 r^{-2/3} \quad (4)$$

式中,  $C_v$  是速度结构函数。大气湍流运动速度  $v$  的起伏与温度  $T$  的起伏关系密切并导致折射率  $n$  的随机变化。忽略大约 0.5%~1.0% 的湿度影响后, 在海平面高度附近折射率的一般表达式为

$$n = 1 + 77.6 (1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) (P/T) 10^{-6} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  是光波波长,  $P$  是大气压力, 由此可推得折射率结构函数  $D_n(r)$  也服从 2/3 次方定律:

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3} \quad (6)$$

对于  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  的可见光, 近似有

$$C_n = [79 \times 10^{-6} P/T^2] C_T \quad (7)$$

大气温度  $T$  取绝对温度值,  $P$  取毫巴值,  $C_n$ ,  $C_T$  分别表示折射率结构常数和温度结构常数, 因而用温度脉动仪测量  $C_T$ , 就能给出湍流的统计性质,  $C_n$  值的单位是  $\text{m}^{-1/3}$ , 其大小表示湍流的强弱, 一般在  $8 \times 10^{-9} \text{m}^{-1/3} \sim 5 \times 10^{-7} \text{m}^{-1/3}$  范围内<sup>[3]</sup>。

在大气层中, 由于气压和温度随高度变化, 因而光折射率  $n$  在垂直地面方向存在梯度分布, 这就引起激光束水平传输时光路弯曲, 距离  $L$  远处, 光斑在接收屏上偏离原位的大小  $h$  应为

$$h = \frac{1}{2} CL^2 \quad (8)$$

式中,  $C$  为光路的曲率, 在海平面附近和  $T = 293\text{K}$  时, 可以得到曲率的近似表达式为

$$C = 32.6 + 0.93 \frac{dT}{dh} \quad (9)$$

式中,  $C$  以  $\mu\text{rad/km}$  为单位。

在远方接收屏上, 我们观察到的光强随机起伏, 主要是大气湍流引起的闪烁现象, 其统计性质用光强  $I$  的对数差平方平均值表示。对于强度均匀的湍流, 在远场区域则有

$$\sigma^2 = \langle (\ln I - \ln I_0)^2 \rangle = B(2\pi/\lambda)^{7/6} L^{11/6} C_n^2 \quad (10)$$

对应平面波  $B = 1.23$ , 对应球面波  $B = 0.49$ 。

湍流引起  $n$  的随机变化, 直接导致光束漂移, 使得接收屏上光斑绕中心位置快速跳动。光束漂移角一般表示为均方值:

$$\sigma_a^2 = 1.75 C_n^2 L \omega_0^{-1/3} \quad (11)$$

式中,  $\omega_0$  是光束准直系统发射口径。

大气湍流还使得光束本身散开, 它到目标时形成的扩展角  $\theta$  对于实际应用十分重要, 特

别是靶面上要求高功率密度时, 扩展角将使光斑尺寸变大。通常由下式计算 $\theta$ 值

$$\theta = 4.03 C_n^{0.75} \lambda^{-1.75} L^{3.75} \quad (12)$$

### 实验观测研究

实验观测是在1988年4月~6月与1989年5月~7月分三种方式在三个地段多次重复进行的。使用仪器主要有HN4-1型150mm He-Ne激光器, TEM<sub>00</sub>模输出4mW, 发散角1.4mrad; 150A型He-Ne激光器, TEM<sub>00</sub>模输出功率60mW可调, 发散角0.7mrad; MK IV型激光束轮廓仪; GJZ-1型可调焦平行光管及2.5m长光具座(焦距 $f = 52.25\text{mm}$ ,  $f_2 = 995.19\text{mm}$ , 入光口径 $D_1 = 18\text{mm}$ , 出光口径 $D_2 = 110\text{mm}$ ); 温度计( $0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ ), 接收屏( $x-y$ 坐标精确到0.5cm, 面积约 $1.0\text{m}^2$ ); W16A型对讲机; 扩音机、话筒、扬声器等, 观测设备安置图示于图1。虚线代表1989年观测时把激光器放在地面, 用多个反射镜传至楼顶后再准直发射, 其目的是为了同时测楼基震动的影响。

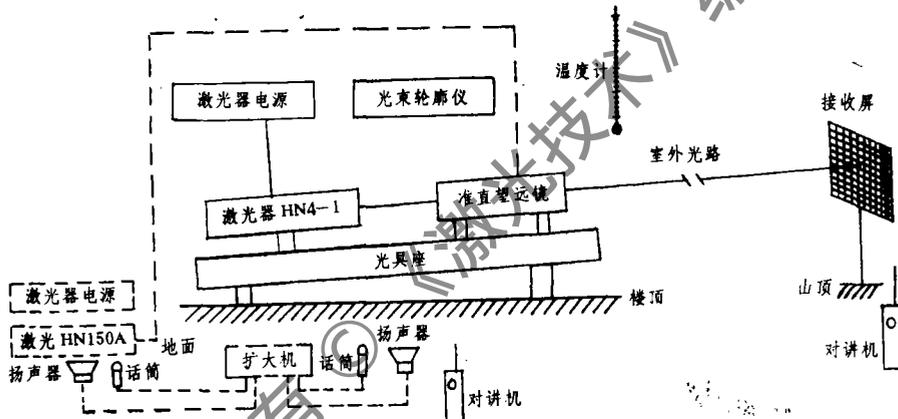


图1 观测设备的安排示意图

He-Ne激光器光束质量, 用激光束轮廓仪测出是很好的高斯分布(TEM<sub>00</sub>模)(图2), 经望远镜发射至1500m远处山顶。光路稍向上倾, 夜晚摄得漂亮彩照(略)。

1988年6月4日天晴, 我们全天连续观测了当天湍流对0.633nm激光束的实际影响, 通过设置在山顶垂直壁上的接收屏, 详细记录了到达屏面上光斑位置的实时变化。附表给出了现场记录的原始数据, 可见当天光斑位置水平方向变化甚小。图3绘出了光斑中心位置在垂直地面方向随时间的变化, 竖线长度代表观察到的光斑瞬时偏离稳定位置的最大幅度, 显然它包含有多种因素引起的干扰。不过偶然引起的干扰, 一般在0.2s左右即恢复到平衡位置。由整个曲线可以看出, 早晨和夜晚光斑位置最低, 若以上午7:30位置为坐标原点(0, 0)则日出后光斑平衡位置沿y轴上升, 中午12:30时达最高位置(0, 11), 然后基本保持不变, 直至

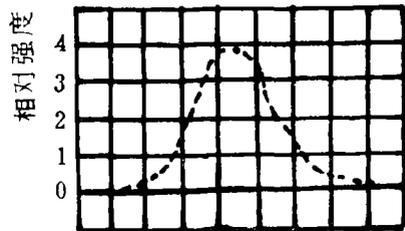


图2 光束截面上强度分布

下午19:15以后,光斑缓慢下降,至22:30光斑才差不多回到原点附近(0, 3)。y方向3cm的剩余量,正好说明了武汉地区夏日气温的特点,午夜以前地面温度下降甚慢。由整体上看,从上午10:00到下午18:00光斑漂移比较大,而夜晚直至日出前就比较小。曲线上7:30到8:15时间内的较大漂移则是由光源震动等多种因素引起的,因为这正好是一天开始的上班时间,大楼免不了产生各种偶然性震动。研究这种震动的影响也是我们的任务之一,将另文报道。

附表 1988年6月4日山腰接收屏上光斑位置坐标

时间(h:min)	7:30	7:50	8:15	8:25	8:30	8:35	8:45	9:00	9:15	9:30	9:45		
坐标(x, y)(cm)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(0,6)	(0,6.5)	(0,7)	(0,8)	(0,8.5)		
漂移最大值(cm)	3.0	3.0	2.0	1.5	1.3	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0		
时间(h:min)	9:52	10:00	10:35	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00			
坐标(x, y)(cm)	(0,9)	(0,9)	(0,9)	(0,9)	(0,9.5)	(-1,10)	(0,11)	(0,10)	(0,9.5)	(0,9)			
漂移最大值(cm)	3.0	2.0	1.2	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	1.5	2.0			
时间(h:min)	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:25		
坐标(x, y)(cm)	(0,10)	(-1,10)	(-1.5,10)	(-1.5,9.5)	(-1.5,9)	(-1,9)	(-0.5,9)	(-0.5,10)	(0,11)	(0,11)	(0,11)		
漂移最大值(cm)	2.0	2.0	1.5	2.0	1.5	1.2	3.0	2.0	0.4	0.4	0.4		
时间(h:min)	20:00	20:30	20:45	21:00	21:15	21:30	21:37	21:45	21:55	22:00	22:15	22:20	22:30
坐标(x, y)(cm)	(0,10)	(0,9)	(0,8)	(2,7)	(0,7)	(0,5)	(0,4.5)	(0,4.5)	(0,3.5)	(0,3)	(-0.5,3)	(-0.5,3)	(0,3)
漂移最大值(cm)	0.7	0.6	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5

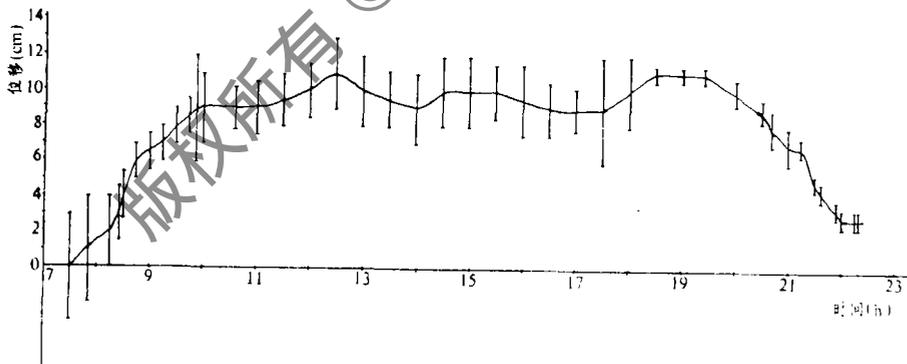


图3 1988年6月4日接收屏上光斑位置的变化

实际观测多次表明,光斑漂移也是周日变化着,夜晚小白日大,太阳落山前和太阳升起后约一个钟头内最小,中午12点以后的几个钟头里最大。若用对应图3的光斑漂移量(附表)计算出折射率结构常数 $C_n$ 随时间的变化,则可得到与美国学者类似的曲线(图4)<sup>[4]</sup>。不过他们的曲线是用脉动温度计在科罗拉多州包德附近山腰上记录的,温度计放置在岩石山地平台上固定位置,地面不平整度0.3m,由脉动温度计测得的 $C_T$ 值,利用(7)式算出 $C_n$ 。显

然，这是局部的湍流导致的折射率结构常数变化。而由我们观测光斑漂移量计算出的  $C_n$  变化，则是整个光路上湍流的整体影响。

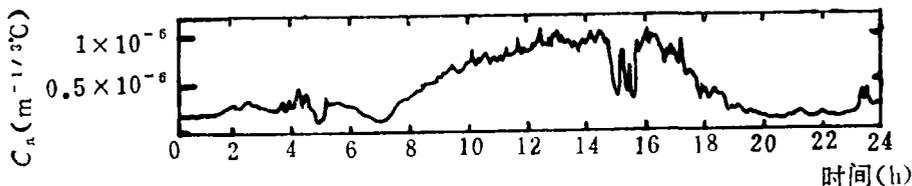


图4 美国科罗拉多州山地测得的折射率结构常数变化

现在我们由 (8) 式计算光路上弯曲的曲率。把附表中对应12:30时光斑偏离的最大值  $h = 11\text{cm}$  代入，因  $L = 1.5\text{km}$ ，所以

$$C = \frac{-2h}{L^2} = \frac{-11 \times 10^{-5} \times 2}{1.5^2} = -98 \text{ } (\mu\text{rad}/\text{km}), \text{ 负号表示向上弯曲。}$$

同时可由 (9) 式计算出温度梯度的近似值为

$$\frac{dT}{dh} = (-98 - 32.6) / 0.93 = -140 \text{ } (\text{K}/\text{km})$$

实测温度梯度约为  $-100\text{K}/\text{km}$ ，两者在数量级上是一致的。考虑到光斑偏离量  $11\text{cm}$  是取的最大值，所以理论和实测还是符合得较好。

图5是苏联学者测量的折射系数  $k$  随时间变化曲线<sup>[6]</sup>，其中5月份白天中午的折射率系数  $k = 0.5 \sim 0.65$ ，根据他们给出的  $K$  定义是地球半径与光束曲率半径之比，可求得光束传输路径曲率为

$$C = \frac{K}{R_{地}} = \frac{0.5 \sim 0.65}{6.37 \times 10^6 \text{ m}} = (78.2 \sim 102) \text{ } (\mu\text{rad}/\text{km})$$

这就正好包含了我们测得的  $98\mu\text{rad}/\text{km}$ 。因此我们用最简单的办法观测到的结果，不但在周日变化趋势上与美国学者一致，而且在绝对数值上又和苏联学者一致。

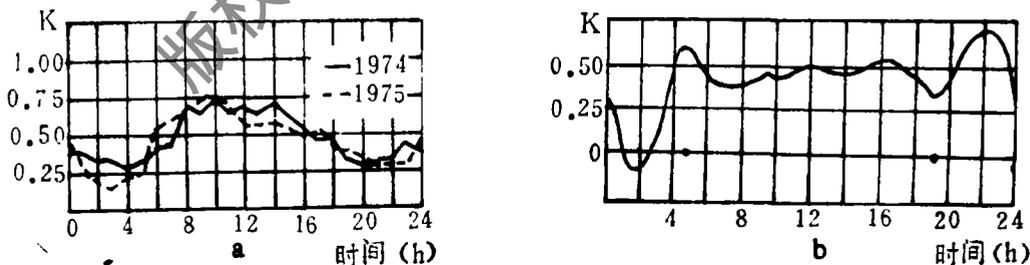


图5 苏联学者测得的大气湍流引起折射系数变化

a—同一地点同月份不同年份间的变化 b—确定地点5月份平均值变化

1988年6月4日全天，光斑在山腰接收屏上变化的情况示于图6，光斑中心在水平轴(东西方向)上几乎稳定不变，说明当天是个无风晴天。图7则示出了1989年6月6日在山腰接收屏上光斑中心漂移情况，虚线代表光斑边沿在数小时内的最大变化范围。图8给出了测量时在山腰摄得的光斑彩色照片，中心坐标  $(-1.5, -2.3)$ ，尺寸约  $5.5\text{cm}$ 。

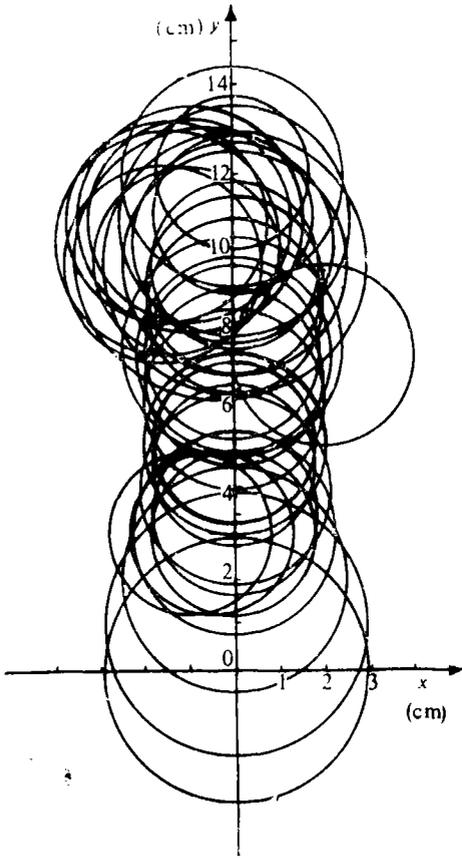


图6 1988年6月4日光斑偏离与漂移情况  
圆圈表示光斑在某一时刻的活动范围

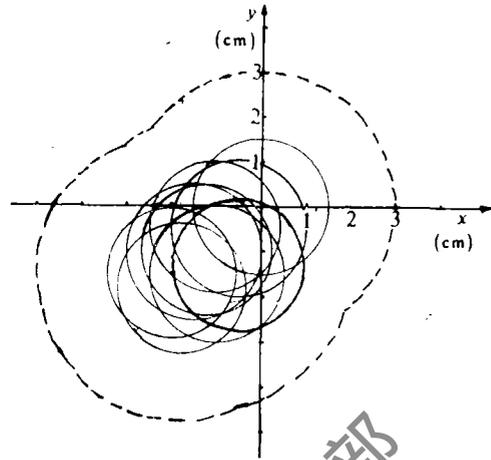


图7 1989年6月6日在山腰观测到的光斑中心漂移情况  
虚线为光斑边沿的活动范围

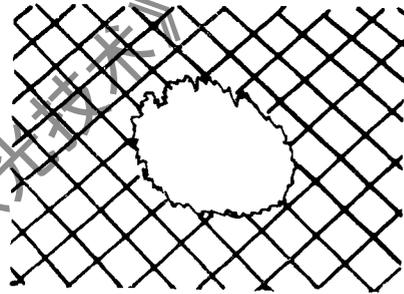


图8 从观察屏上实拍的光斑照片  
中心坐标  $(-1.5, -2.3)$ ,  $\phi 5.5\text{cm}$

1988年5月13日20:30前后, 观测到光斑漂移量仅0.5cm; 1988年4月到6月长时间观测, 1989年5月到7月再长时间观测, 光斑漂移的最大概率值为  $2\delta_d = 1.0\text{cm}$ , 短时间内有接近2.0cm。由此推得光束漂移角范围是

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\delta_d}{L} = \frac{1}{2} (0.5 \sim 2.0) \times 10^{-5} / 1.5 = (1.7 \sim 6.7) (\mu\text{rad})$$

若取中间值  $4.0\mu\text{rad}$ , 考虑到发射光束实际孔径尺寸  $\omega_0 = 3.2\text{cm}$ , 代入(11)式, 得到

$$C_n^2 = \frac{\sigma_a^2 \omega_0^{1/3}}{1.75L} = \frac{4^2 \times 10^{-12} \times (3.2 \times 10^{-2})^{1/3}}{1.75 \times 1.5 \times 10^3} = 19.4 \times 10^{-16} (\text{m}^{-2/3})$$

属于中等湍流范围内, 这和光路下边的校园里多为树木花草有关。

湍流形成的光束扩散角可由(12)式给出

$$\theta = 4.03 (4.4 \times 10^{-8})^{6/5} \times (0.633 \times 10^{-6})^{-1/5} \times (1.5 \times 10^3)^{3/5} = 8.4 (\mu\text{rad})$$

由此推得接收屏上光斑尺寸为

$$\theta \cdot L = 8.4 \times 10^{-6} \times 1.5 \times 10^3 = 12.6 (\text{cm})$$

这比实际测到的值大一倍。如果在计算出的漂移角 $\sigma_0$ 范围(1.7~6.7) $\mu\text{rad}$ 中取偏小的值2.0  $\mu\text{rad}$ , 它对应于大多数光斑漂移量1.0cm, 则计算出 $C_n = 2.2 \times 10^{-8} \text{m}^{-1/3}$  仍在中等湍流范围内, 不过偏小值一边, 此时可算得光斑尺寸为5.5cm, 正好和实测一致(图8)。然而, 在1989年6月份一个有3级~4级风的晚上, 我们摄得的屏上光斑照片, 其尺寸为12.6cm左右(图9), 它对应中等湍流强度偏大值一边,  $C_n = 4.4 \times 10^{-8} (\text{m}^{-1/3})$ 。

关于光斑闪烁情况的观察结果, 可以由(10)式估算, 大多数天气下并不严重。对于会聚光束

$$\sigma_I^2 = 0.31(2\pi/0.633)^{7/6} \times 10^7 \times (1.5 \times 10^8)^{11/6} \times (2.2 \times 10^{-8})^2 = 0.014$$

由对数强度方差 $\sigma_I^2$ , 可以估计出 $I_0/I$ 的值多为1.13, 若以 $C_n = 4.4 \times 10^{-8} \text{m}^{-1/3}$  代入上式, 则光强起伏为1.25, 仍是比较弱的闪烁, 这如山腰上多数夜晚观察一致。但是1988年4月22日晚, 我们在距水泥平直路面0.85m高的光路上观察, 情况大为不同。由于传输距离167m, 光束发散角1.4mrad, 光斑在接收屏上没有明显界限, 其尺寸约为24cm。从晚上20:00到22:00连续观测, 没有察觉到光斑的偏移和漂移, 但是闪烁非常剧烈, 光斑中包含有很多个湍流旋涡的影响, 这些旋涡对通过它的激光既独立的散射和衍射, 又在屏上形成随机的干涉变化。当日白天气温较高(290K), 前几天又下过雨, 所以吸足了水分的水泥路, 白天温度升上去之后, 到傍晚很难降下来, 人在上边走过都能感到有热气上升。这种强烈的湍流现象, 因为无风也就不可能很快减弱, 所以导致大尺寸光斑区域内强度起伏很大, 可以看到对比明显的暗区和亮区在随机变化(图10)。若以 $I_0/I = 2$ 代入(10)式, 则估算出折射率结构常数为

$$C_n = \frac{\ln 2}{\sqrt{0.49}} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{-\frac{7}{12}} L^{-\frac{11}{12}} = 0.99 \left( \frac{2\pi}{0.623 \times 10^6} \right)^{-\frac{7}{12}} (167)^{-\frac{11}{12}} = 7.5 \times 10^{-7} (\text{m}^{-\frac{1}{3}})$$

是属于十分强烈的湍流范围。

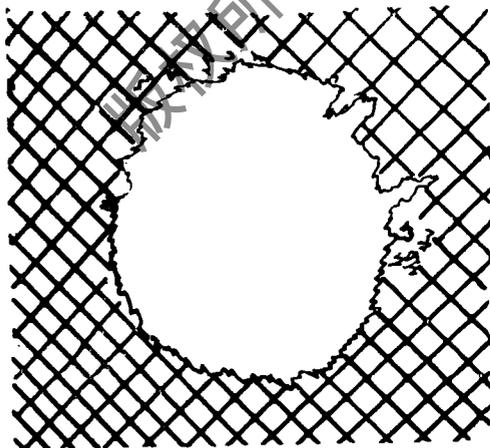


图9 中等湍流使光斑散开( $\phi 12.6\text{cm}$ )



图10 强湍流对 $\text{TEM}_{00}$ 模光束的影响

### 初步结论

激光束从高楼顶端发射, 由南向北穿越华中理工大学校园上方50多米高空, 射向东湖边喻家山山顶或山腰, 大气湍流的影响比激光束近地面传播时小得多, 即使在夏季7月份, 一般气象条件下, 这条光路上的湍流都属于弱湍流到中等湍流范围。究其原因, 是和这条光路下方多为树木花草的自然环境有关。这些常青的

## 二极管象散光束端面泵浦Nd:YAG激光器

巩马理 卢 希 富 真 顾颜华 王明秋

(西南技术物理研究所, 成都)

**摘要:** 研究了用象散二极管激光光束端面泵浦的 $TEM_{0m}$ ,  $TEM_{n0}$ 多模Nd:YAG激光器。文中报导了不同泵浦功率下的激光模式情况和稳定性情况, 最大CW输出功率320mW, 斜效率28%, 最高稳定CW输出功率232mW, 斜效率20%, 为进一步研究二极管泵浦的列阵器件奠定了基础。

### Astigmatic diode beam end-pumped Nd:YAG laser

Gong Mali, Lu Xi, Fu Zheng, Gu Yianhua, Wang Minqiu

(Southwest Institute of Technical Physics)

**Abstract:** The Nd:YAG laser end-pumped by astigmatic diode beam is reported, for the purpose of studying diode pumped solid-state laser array. With astigmatic beam pumping,  $TEM_{n0}$  mode and  $TEM_{0m}$  oscillations have been achieved, respectively, by meridional focal plane pumping and sagittal focal plane pumping. The  $TEM_{n0}$  mode laser has the minium threshold of 385mW, CW output power of 320mW with 28% slope efficiency, and stable 232mW CW output power with 20% slope efficiency. The CW output stability is also described.

绿色植物调节光路上的温度梯度不至于强烈地随机变化, 因此是研究激光束, 特别是强激光传输过程中与大气相互作用的理想场所, 这无论对民用和军用都有实际重要价值。它为激光技术重点实验室对外开放, 研究激光大气传输提供了一个良好基地。

### 参 考 文 献

- [1] Strohbehn J W (ed). Laser beam propagation in the atmosphere. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1978
- [2] 张逸新, 宋正方, 光学学报, 1986; 6 (12):1111
- [3] 蓝信巨主编, 激光技术, 长沙: 湖南科技出版社, 1979 (第八章)
- [4] Clifford S F, Ochs G R, Lawrence R S. J O S A, 1974; 64:148
- [5] Zuev V E. Laser beams in the atmosphere. New York: Plenum Press, 1982

收稿日期: 1991年10月28日。