

有序混合光束和迷宫式多次 反射光学系统

陈守华 徐毓光 戎忠华 余勤跃 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

H. A. Schuessler

(Department of Physics, Texas Agricultural and Mechanical
University College Station, Tx 77843)

提 要

本文给出有序混合光束结构和多程光学系统的具体考虑,并指出它们在多波长高激发态激光光谱学研究和其它领域中的意义。

关键词: 多波长激光光谱学技术,有序混合光束,多程反射系统。

一、引 言

原子系统的光致电离和高激发能级的激光光谱研究是激光光谱学的前沿领域之一。目前,正在发展各种不同的研究方法,主要着眼于选择不同的原子系统^[1~3]。实际上,除了考虑原子系统,还必须注意多波长激光束的结构和多程光学系统的研究。特别是高激发态效应相当微弱或者希望得到有工程意义的宏观量效应时,这种光束结构及光学反射系统研究的重要性将更为突出。

合适的光束结构应能使不同波长的子光束相互充分混合,组合成一个混合光束,该混合光束能在一定长度内(工作区间长度)保持恒定的口径。这样,激光束功率密度在此区间内可基本保持恒定。假定希望在工作区间内的原子都达到均衡的激发,这个条件是必需的。

理想的多程光学系统能使上述结构的光束在系统内多次反射,反射后的光束结构能自动重演,并复盖全部工作区域。此外,希望光束反射次数尽量多,而机构尽可能简单。

显然,上述的光学系统和与之匹配的光束结构,使整个原子系统沉浸在功率密度基本上恒定及均匀的多波长激光束的辐照场中,每一个光子都有尽可能多的几率与原子相互作用,微弱的高激发能态的物理效应,将在空间和时间上积累,最后得到所期望的足够大的宏观量。从光谱测量角度看,这种系统使测量衬度大大增加,从而使测量具有高的灵敏度和精度。

二、有序混合光束

适合上述要求的光束是有序混合光束。作者曾经提出过类似的光束结构并用于改善玻璃激光器的性能^[4]和激光等离子体靶面辐照的均匀性^[5]。图 1 表示产生有序混合光束的方法。其中 P 是由七个相同透镜组成的列阵, 将会聚于 O 点的球面波裂解成七个子光束。在平面 A , 这七个子光束形成七个子焦斑; 在平面 B , 七个子光束以 O 点为中心叠合为一个光斑。我们称平面 A 、 B 为有序混合光束的两个特征平面。

容易证明, 有序混合光束具有以下性质:

1. 有序混合光束经过任何线性光学系统传输之后, 仍是有序混合光束。而且 $W = S_A \cdot S_B / L$ 是不变量。其中, S_A 和 S_B 为在特征平面 A 、 B 上的光束口径, L 是两个特征平面间的距离。

2. 对于一个给定的有序混合光束, 总可以找到一个光学系统, 使转换以后的光束在两特征平面上的光束口径相等, 即 $S_A = S_B$ 。这时, 在两个特征平面之间, 有序混合光束的口径保持恒定, 称为等口径有序混合光束。

3. 等口径有序混合光束经过共焦望远镜后, 仍是等口径有序混合光束。光束口径随望远镜的倍率放大或缩小。

对于多波长激光束的情况, 同样可以采用有序混合光束的结构。这时, 首先要考虑不同波长的几束光的组合方式。通常, 用色散元件使不同波长的若干激光束完全重叠为一束。然而当激光束较多(三束以上)时, 特别是当几束激光的波长相当靠近时, 用色散元件并不容易实现。于是采用组合镜合束, 即用几块小反射镜使不同波长激光束的焦斑尽量接近地拼合在一起, 并在传输到某个位置时几束激光的光斑完全叠合。图 2 是三种波长的激光束由四面体反射镜合束情形。其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别表示三种波长。三个焦斑在四面体反射面上达到紧密拼合, 并在相距 L 处三个光斑完全叠合。 S_1 为焦斑拼合平面, S_2 为光斑叠合平面。显然, 组合镜合成不能使光束在一定区间内保持光束口径不变, 也不能使不同波长的激光束充分混合。必然用上述透镜列阵作进一步处理, 使其成为复合有序混合光束。在复合有序

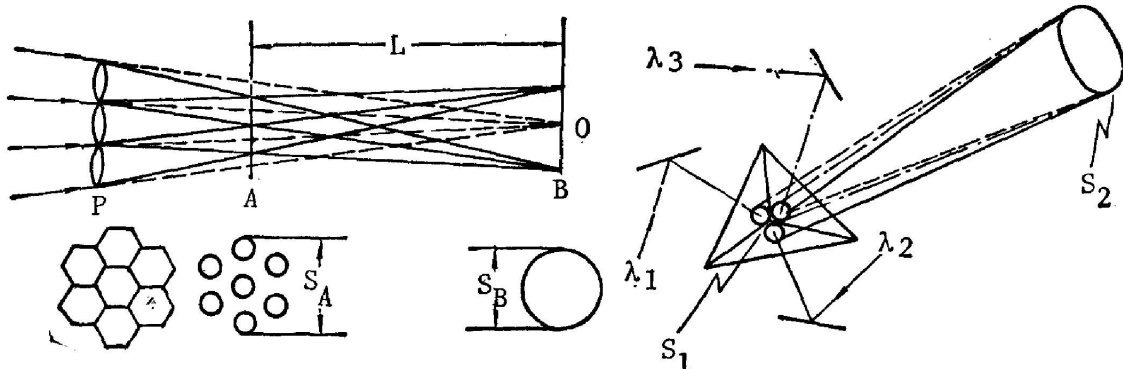


Fig. 1 The fundamental structure of a sequencing beam

Fig. 2 Using a corner-cube prism to combine three laser beams with different wavelength. S_1 : focal spot plane. S_2 : coinciding plane

混合光束中, 每种波长的激光束转换为一个有序混合光束, 它们有完全相同的结构, 但不同波长的有序混合光束之间, 有一个小角度错开。

图 3 以三波长激光束为例给出产生等口径($S_A=S_B$)复合有序混合光束的光学系统。图中 S_0 是单光束口径, L 是二特征平面的间距, D 是七单元透镜列阵中单个透镜的口径, u 是从透镜列阵到特征平面 A 的距离。容易得到 $D=S_0$, $u=L$, 这就是用图 3 装置产生单光束口径为 S_0 , 特征平面间距为 L 的等口径复合有序混合光束的必要条件。每种波长的有序混合光束, 具有完全相同的结构, 但光束轴线以透镜列阵中心 O 为支点, 有一个小角度错开。错开角 $\alpha=c/2L$, 其中 c 是入射合成光束在平面 B 处的焦斑尺寸。在特征平面 A, 复合光束裂解成 21 个子焦斑, 分属三种波长; 在特征平面 B, 每种波长的七个子光束叠合成一个光斑, 三种波长的光斑之间错开距离 c 。

下面以三波长激光束复合有序混合光束为例, 讨论一些有实用意义的性质。

(1) 为实现等口径复合有序混合光束, 原始激光束的方向性应满足一定的要求。图 4 所示是极限情形, 即在焦斑特征平面上, 21 个子焦斑恰好布满整个口径。设复合光束口径是 S , 则子焦斑的极限尺寸是 $d_{\max}=S/(3+2\sqrt{3})$ 。一般取光束口径和发散角的乘积作为光束方向性的定义, 则子光束的极限方向性

$$\xi_{\max} = d_{\max} \cdot S/L = S^2/(3+2\sqrt{3})L。 \quad (1)$$

原始光束经过七单元透镜列阵后, 其口径等价扩大大约三倍, 所以原始光束极限方向性是

$$\eta_{\max} \doteq 3\xi_{\max} = 3S^2/(3+2\sqrt{3})L。 \quad (2)$$

例如, 令 $S=1\text{ cm}$, $L=1\text{ m}$, 则 $\eta_{\max}=4.5\text{ mrad}\cdot\text{cm}$ 。

(2) 为了高效率利用激光束, 不同波长的激光束应充分混合。按等口径复合有序混合光束的结构, 三种波长的激光束只是在七单元透镜列阵面上完全重合, 在其它位置, 有以 O

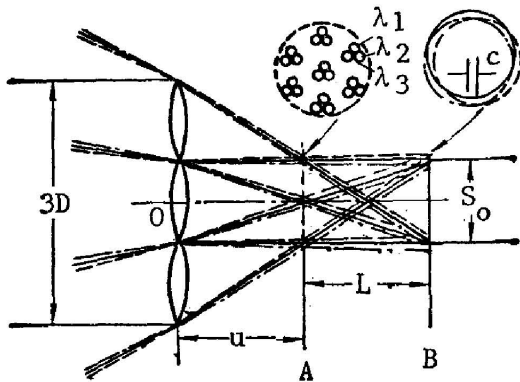


Fig. 3 Using a lens array to produce a sequencing combined beam. At plane A, it will be splitted into 21 focal spots. At plane B, the 21 subbeams will be coincided as three complete spots with just a little shift each to other

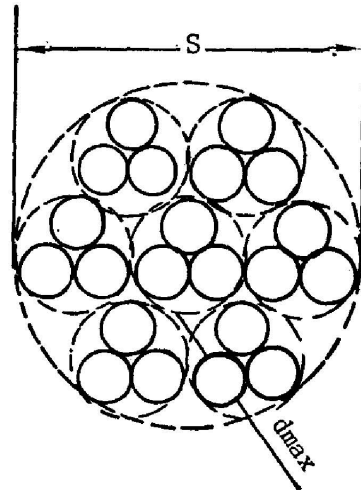


Fig. 4 The limitable distribution of focal spots for a multi-sequencing beam with three different wavelengths

点为中心的小角度 α 错开。 C 愈大, 则不同波长激光束错开愈大, 导致激光利用率下降。设 C 的极限值 C_{\max} , 则 $\alpha_{\max} = C_{\max}/2L_0$ 。注意原始光束在列阵透镜处口径约有 $3S_0$, 原始光束极限方向性:

$$\eta'_{\max} = 3S_0 \cdot C_{\max}/2L_0 \quad (3)$$

若令 $C_{\max} = S_0/10$, 则 $\eta'_{\max} = 0.15S_0^2/L_0$ 。该值比(4)式小, 表明不同波长的激光束的充分叠合对方向性有更严格要求。当 $C_{\max} = S_0/10$, $S_0 = 1\text{cm}$, $L = 1\text{m}$, $\eta'_{\max} = 1.5\text{mrad}\cdot\text{cm}$ 。这个要求不算苛刻。

(3) 等口径复合有序混合光束的结构, 可保证光束口径在两特征平面之间基本上保持恒定, 但不同波长的激光束只是在某一区间充分混合。考察单一波长的有序混合光束, 然后把相同结构的几个光斑按位移量错开, 便是多波长复合有序混合光束的情形。图 5 是单波长光束的示意图。各子光束从平面 M 之后, 开始重叠在一起。从特征平面 A 到平面 M 的距离

$$Q = L(S_0 - 3d)/(3S_0 - 3d) \quad (4)$$

式中 S_0 是光束口径, d 是子焦斑直径, L 是两特征平面的间距。据前面的讨论 $0 < d < d_{\max} = S_0/(3+2\sqrt{3})$, 由此 $L/5 < Q < L/3$ 。设子光束在传输中按反平方律相似地改变光强分布, 则在特征平面 A 后面相距 Z ($L \geq Z \geq 0$) 断面上的单波长光束的总光强分布是:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=0}^6 \frac{d^2}{E^2} \phi\left[\left(\frac{d}{E}x - x_i\right), \left(\frac{d}{E}y - y_i\right)\right] \quad (5)$$

式中, x, y 是 Z 断面上的平面坐标, x_i, y_i 是各子光束在特征平面 A 上的中心坐标:

$$\begin{cases} x_0 = 0, y_0 = 0, \\ x_i = (S_0 - d)/2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot i\right), \\ y_i = (S_0 - d)/2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot i\right). \end{cases} \quad (6)$$

$\phi(x, y)$ 是单个子焦斑的光强函数, E 是在 Z 截面上单个子光束的光斑直径:

$$E = d + (S - d) \cdot Z/L \quad (7)$$

设 $S_0 = 1\text{cm}$, $L = 1\text{m}$, $d = d_{\max} = S_0/(3+2\sqrt{3})$ 而且子焦斑的光强分布是截断的高斯函数:

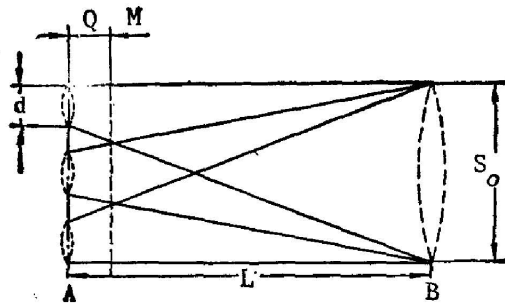


Fig. 5 The sketch of a constant-diameter monochromatic sequencing combined beam

$$\phi(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{当 } (x^2 + y^2) > (d_{\max}/2)^2 \\ \exp[-(x^2 + y^2)/(d_{\max}/2)^2] & \text{当 } (x^2 + y^2) \leq (d_{\max}/2)^2 \end{cases} \quad (8)$$

用计算机计算(5)式,得到单波长有序混合光束在各断面处的光强分布如图6所示。主要特点是:在两特征平面之间,光束口径保持 $S=1\text{cm}$ 不变;从 Z 大于 200mm 的位置起,七个子光束开始相互交重,直至 $Z=1\text{m}$ 处,变为一个匀称的光斑。

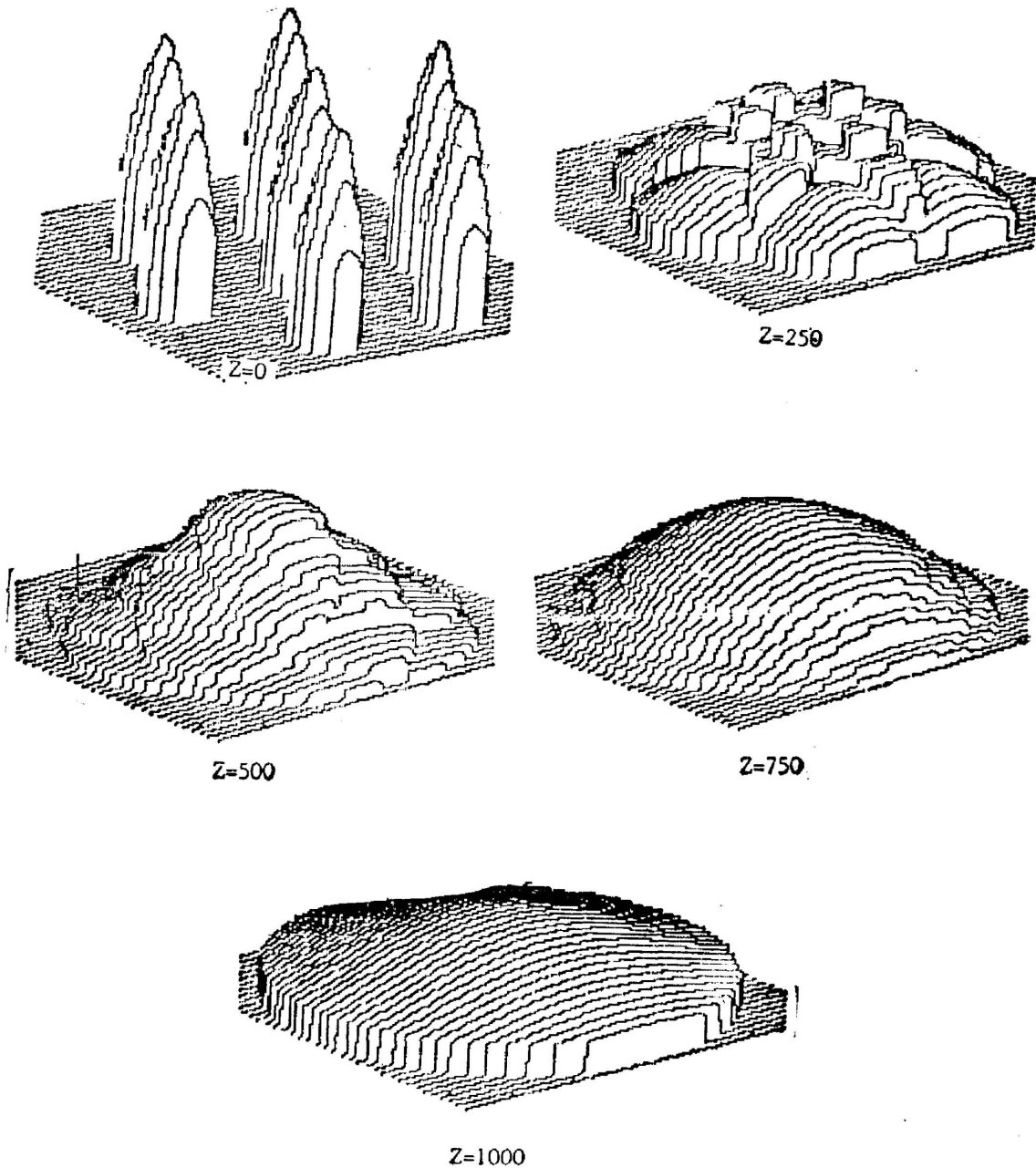


Fig. 6 The intensity distribution of a monochromatic sequencing beam at cross section Z

三、迷宫式多次反射光学系统

一束复合有序混合光束只能复盖有限空间,为使多波长激光束覆盖大尺寸的原子系统空间,必须采用多次反射光学系统。此外,多次反射光学系统可以大大增长激光束在原子系统中的光程,当原子系统对激光束的吸收系数甚低时(对于高激发态的吸收正是如此),通过增长光程以增加吸收更是十分有效。

实际上,复合有序光束两个特征面上的分布给定之后,整个光束的结构就完全确定。为了使光束结构在反射时自动重演,球面反射镜系统调在共焦位置,入射光束的两个特征平面分别与共焦反射系统的两个球面反射镜面重合。

迷宫式共焦多次反射系统由两个反射器组成,每个反射器包含两个或四个相同曲率半径的反射镜单元,两个反射器的间距等于反射镜单元的曲率半径。两个单元镜的反射器可实现层状空间扫描,四个单元镜的反射器可实现块状空间扫描。

1. 层状多次反射光学系统。图7是示意图。 M_A 、 M_B 、 M_C 、 M_D 是具有相同曲率半径 L 的球面反射镜, M_A 和 M_B 组成一个单元, M_C 和 M_D 组成另一个单元,其间距等于 L 。 O_A 、 O_B 、 O_C 、 O_D 分别是 M_A 、 M_B 、 M_C 、 M_D 的球心。复合有序光束从孔 T 入射,经多次反射后仍从孔 T 射出,孔 T 的口径与光束口径一致。为避免光束与孔 T 的边缘以及单元反射镜间的接缝相交造成损耗, O_B 和 O_C 应座落在反射镜间的接合缝上,同时 O_C 与 O_D 的间距 d_1 以及入射光轴的高度 H_1 必须满足下式:

$$d_1 = S/2, (H_1 - S/2)/2d_1 = N - 1. \quad (9)$$

式中 S 是光束口径, N 是正整数,表示光束在每个镜面上的座点数。满足以上关系的多次反射光束在 M_A 和 M_B 镜面上各形成 N 个相切的圆斑,反射镜间的接缝恰是圆斑间的公切线。此外,为使相继反射的光束间有部分重叠,以适当补偿复合有序混合光束的边缘效应,并使圆光束之间的拼接更理想, O_A 与 O_B 的间距 d_2 应小于 $S/2$,入射光束中心在 M_C 镜上的

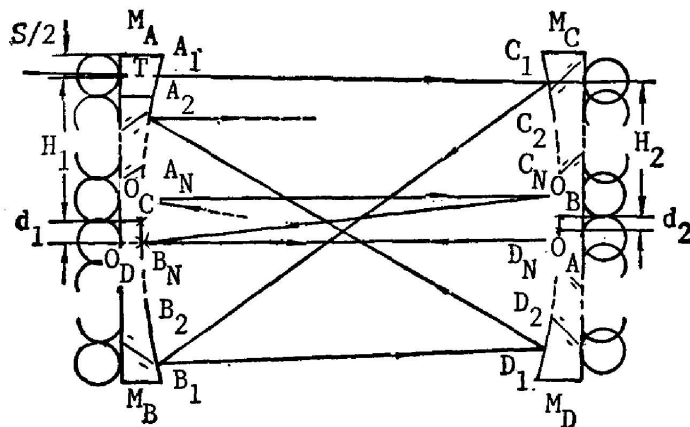


Fig. 7 Layer-type mazy multipass reflector. The combined beam enters the reflector through aperture T and emerges again from T along the same path after multireflections

高度 H_2 应满足:

$$(H_2 - S/2) / 2d_2 = N - 1. \tag{10}$$

于是, 在 M_C 和 M_D 镜面上, 多次反射的光束各形成 N 个叠交的圆斑。图 7 中的 A_n, B_n, C_n, D_n 分别表示在 M_A, M_B, M_C, M_D 镜面上一系列光斑中心位置。

总的来说, 复合有序混合光束循 A_1C_1 线从孔 T 射入后, 将自动按以下路径反射: $A_1 \rightarrow C_1 \rightarrow B_1 \rightarrow D_1 \rightarrow A_2 \rightarrow C_2 \rightarrow B_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_N \rightarrow C_N \rightarrow B_N \rightarrow D_N$ 。因为 B_N 与 M_D 的球心 O_D 相重合, 于是光线达到 D_N 后将自动沿原路径折回, 直至从孔 T 射出。总的反射次数是 $8N - 3$ 。此外, 每次反射之后, 复合有序混合光束的结构不变, 相互间并有一定叠交, 充分地覆盖反射系统内的层状空间。覆盖层的厚度等于光束口径 S , 长度视光束的方向性在 $4L/5$ 和 $2L/3$ 之间(对于三波长情形), 高度是 $2H_1$ (在 M_A, M_B 位置)和 $2H_2$ (在 M_C, M_D 位置)。

2. 块状多次反射光学系统。将 8 块曲率半径为 L 的反射镜分成两个单元, 相距 L 放置, 形成共焦系统, 便可实现光束在块状空间的扫描与覆盖。我们用计算机对反射镜的球心位置、入射孔位置以及入射光束的方位进行择优确定。择优原则是: (1) 光束不能与反射镜的边缘以及入射孔的边缘相交; (2) 光束在系统内有最多反射次数; (3) 各反射光束在反射系统内充分覆盖一块状空间。图 8 是一个实例, 反射镜的尺寸是 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$, 光束口径 $S = 10\text{mm}$, 8 块反射镜($M_A \rightarrow M_H$)的球心位置($O_A \rightarrow O_H$)及入射孔 T_1 的位置均已标在图上, 光束水平入射。从 T_1 射入后, 将接连反射 162 次后, 仍循孔 T_1 射出。图 9 是光束轴线径

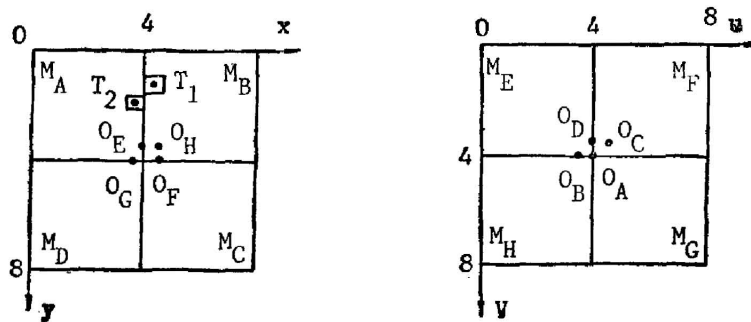


Fig. 8 An cube reflector example where mirror dimension is $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ and beam diameter is 10mm . A laser beam incidenting through T_1 will be multi-reflected for 162 folds before emerging out through T_1 again along the same path.

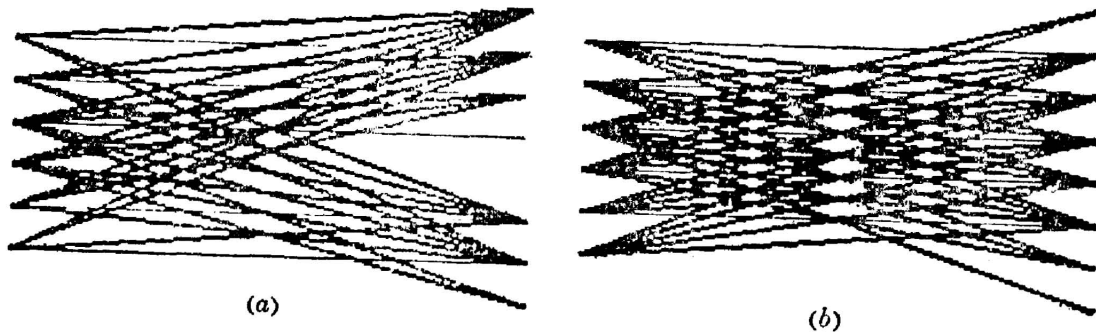


Fig. 9 The beam axis track from (a) x - and (b) y -view inside the cube reflector

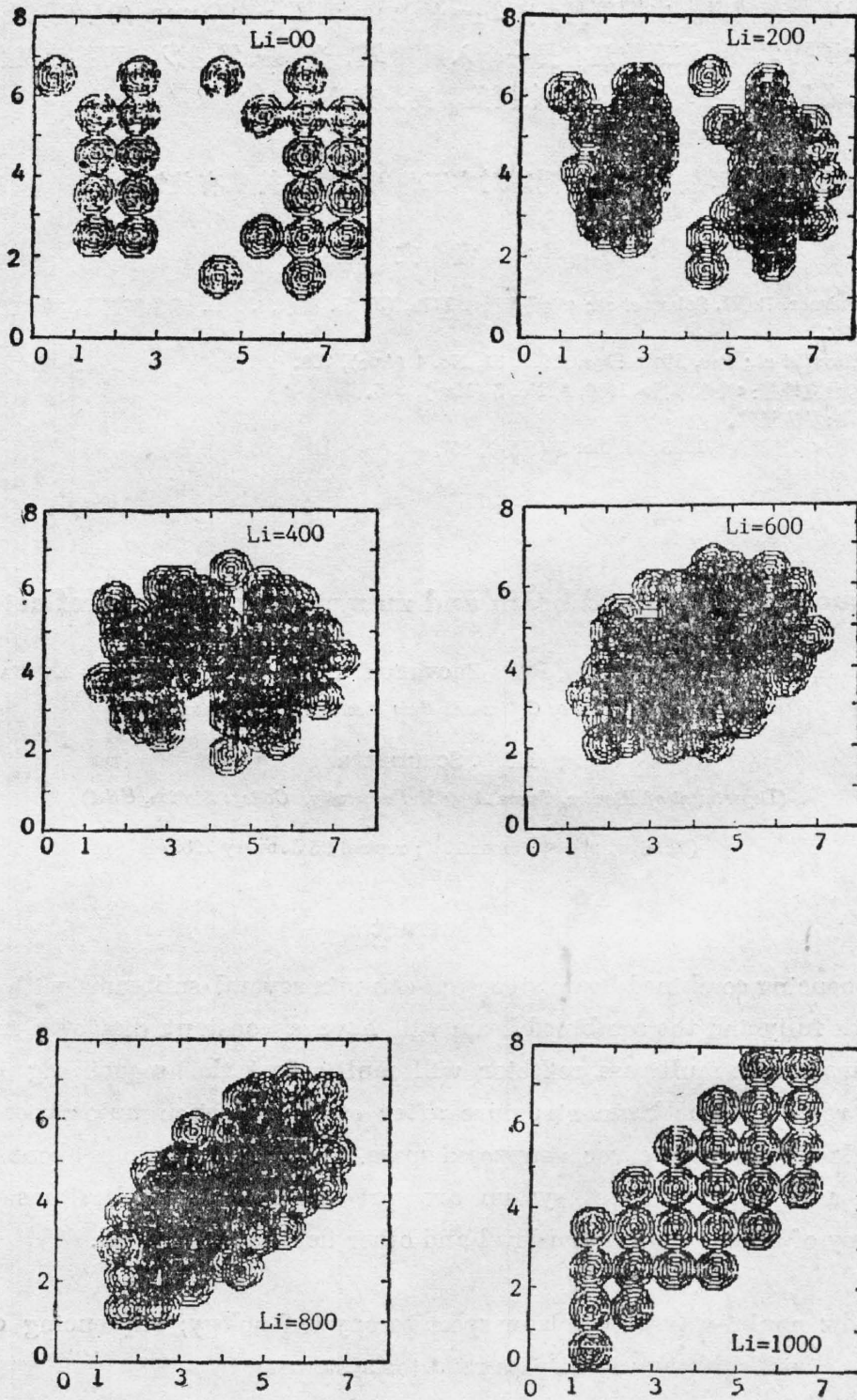


Fig. 10 The beam distribution at a series of cross section L_i , where L is supposed to be 1000 mm

迹的 x 和 y 方向视图(z 是反射系统的轴线)。图 10 表示当 $L=1000$ mm 时, 在 z 方向各截面位置的光束覆盖情况。由图可见, 自 $L_1=400$ mm 到 $L_1=1000$ mm 的区间, 光束覆盖相当充分。除了孔 T_1 外, 该系统还有另一个入射孔 T_2 , 光束从 T_2 射入, 可接连反射 96 次后循 T_2 射出, 若同时使用 T_1 和 T_2 , 光束覆盖将更为充分。

感谢诸旭辉、俞沛增、徐品方等同志对本工作的热情支持和有益讨论。

参 考 文 献

- [1] J. A. Paisner, R. W. Solarz *et al.*; 《激光光谱学 III》, (J. L. 霍尔, J. L. 卡尔斯登编, 科学出版社, 北京, 1985), 202.
- [2] G. S. Hurst *et al.*; *Rev. Mod. Phys.*, 1979, **51**, No. 4 (Apr), 769.
- [3] 胡企铨, 殷立峰等; 《光学学报》, 1986, **6**, No. 5 (May), 385.
- [4] 陈守华等; 私人通信。
- [5] 邓锡铭等; 《中国激光》, 1985, **12**, No. 5 (May), 257.

Sequencing combined beam and mazy type multipass reflector

CHEN SHOUHUA, XU YUGUANG, RONG ZHONGHUA, YU QINGYUE AND WANG ZHIJIANG
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

H. . SCHEUSSLER

(Department of Physics, Texas A & M University, College Station, USA)

(Received 23 September 1987; revised 25 January 1988)

Abstract

A sequencing combined beam structure can mix several subbeams with different wavelength fully and the combined beam will have a constant diameter in certain range. A mazy type multipass reflector will multireflect the sequencing combined beam and reproduce the beam structure after every reflection automatically. The multipass laser beam can cover a supposed space. The main principles about the beam structure and the multipass system are presented. The applications in laser spectroscopy of high-excited atom level and other fields are discussed.

Key words: multi-wavelength laser spectroscopy technology; sequencing combined optical beam; multipass reflector system