

# 粉末随机激光辐射\*

林景全 张杰

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘要** 粉末随机激光辐射是一种刚刚被人们发现的激光过程,这种激光由粉末状介质的多次散射来提供光学反馈,不需要外加谐振腔.随机激光辐射过程除了对激光物理有很大意义之外,还有巨大的应用前景,例如,有可能在平板场发射显示器中得到广泛应用.文章介绍了粉末随机激光的原理及其实现过程.

**关键词** 随机激光,多次散射

## RANDOM LASER ACTION IN POWDER

LIN Jing-Quan ZHANG Jie

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Random laser action in powder is a recently discovered phenomenon. Recurrent light scattering provides resonant feedback and no external cavity is needed for this kind of laser. Unlike conventional lasers, laser emission from the powder can be observed in all random directions. Random lasers could have many potential applications, such as flat-panel field emission displays. This paper describes the principle and realization of random laser emission.

**Key words** random laser, multiple scattering

### 1 引言

自从本世纪60年代初第一台激光器发明以来,激光科学已得到长足的发展.在此期间,研究人员一直都在不懈地努力寻找具有新的机理及特性的激光过程,以期拓展激光的应用范围.粉末薄层介质中随机激光过程就是刚刚发现的,并有独特优点和广阔应用前景的激光辐射.

粉末薄层随机激光与常规激光有着明显的差别.常规激光通常有由反射镜构成的谐振腔,光子在谐振腔中来回传播.当光子与腔内增益介质中处于激发态的原子相互作用时,受激原子由高能态跃迁到低能态,并辐射出与初始种子光子波长及传播方向都相同的光子.当激光腔内有足够多的原子受到激发时,就可实现受激辐射放大.一般来说,常规激光的输出具有较好的方向性.粉末薄层随机激光与上面介绍的常规激光有许多不同点.文献[1]报道了这种新型的激光,通常利用电泳方法把半导体粉末沉积到玻璃衬底上,制成粉末薄层,它的厚度一般在几到十几微米之间,这种粉末薄层可俘获(trap)或“定域”(localized)光子,用它作为激光的增益介质.

组成激光增益介质的粉末材料具有较大的折射率,它们对光波有较强的散射作用,光子在里面的来回传播就象弹球机中的球一样.当粉末薄层中颗粒间的距离足够近,即粉末介质的散射平均自由程小于散射光波长时,光子在粉末薄层中所走的路径就可以是封闭的.此时,光子无论沿哪个方向传播,它们都将被散射.粉末薄层中有许多这样的闭环路径,在每一个闭环中的光子都将多次经过同一散射体,这就像常规激光器中光多次经过由反射镜组成的谐振腔一样.如果粉末薄层中组成散射体的原子已被激发到高能态,那么散射光经过它时就可实现放大.粉末薄层中存在着多个这样的环形谐振腔且具有随机性,这就决定着该种激光有不同的输出方向.这种利用散射效应提供反馈来实现光放大,且在多个方向上都有输出的激光器称为粉末随机激光器.

### 2 粉末随机激光的工作原理

对于常规的激光而言,在工作过程中应尽可能

\* 国家杰出青年基金和国家高技术410专题基金资助项目  
1999-12-08收到初稿,2000-01-06修回

地避免出现光散射.与之截然不同,粉末随机激光在工作过程中,却不仅需要光的强散射,而且还要利用它的多次散射.它的工作原理是基于光子的安德森定域<sup>[2]</sup>(Anderson Localization).

光的多次散射是日常生活中的普遍现象,光在白色颜料、云雾等物质中传播时都会发生多次散射.总的说来,光在这些物质中的传播可由一般的漫射过程来描述,即透射系数随传播深度的增加而线性地减小<sup>[3,4]</sup>.光子的安德森定域则完全不同于经典的漫射规律.光在粉末薄层中传播,当散射超过某一临界值时,散射光可沿封闭的环路传播,这时,光的透射系数随穿入深度按指数规律下降,而不是通常的线性规律<sup>[3,4]</sup>.介质中实现光子的安德森定域的必要条件是介质要对其有足够强的散射.表征介质对光散射程度的物理量为光在介质中的平均自由程  $l$  与波矢  $k$  的乘积.若想利用安德森定域来约束光,则必须满足 Ioffe - Regel 准则,即  $kl < 1$ .从本质上讲,粉末薄层中光子的安德森定域来源于光的多次弹性散射间的干涉.粉末薄层中的一个激发原子 A (图 1 中用星花表示,图中其他小球表示散射体),由 A 发出的光可沿相反的方向经散射随机地返回,沿相反方向传播的这两列波在返回 A 点时具有相同的位相,它们在 A 点干涉加强,这就使得 A 点发出的光有很大的几率返回,而不是跑掉.若减小光在粉末薄层中的散射平均自由程,则形成这样闭环光路的概率更大.这样一来,粉末薄层对光的作用由一般的传播状态转变为约束状态,结果导致光透射系数随样品的厚度按指数规律衰减.因此,粉末薄层中环形谐振腔内光的正反馈就是靠光子的安德森定域来实现的.

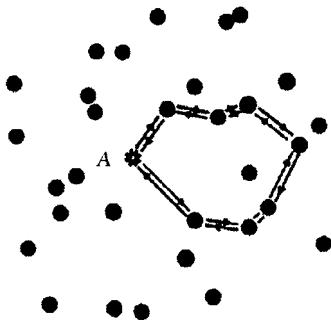


图 1 无序介质中光波的安德森定域示意图

粉末随机激光在介质内要同时实现多次散射和放大,这是实现粉末随机激光的主要困难所在.描述介质对光放大过程的物理量为增益长度  $l_g$ .就光的放大而言,作为激光增益介质,人们很关心其上能级的粒子布居情况.假定由粉末薄层组成的随机激光

介质为标准的四能级系统,其上能级的粒子布居可由速率方程来描述<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial N_1(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \sigma_{\text{abs}} \eta [N_t - N_1(\mathbf{r}, t)] W_G(\mathbf{r}, t) - \sigma_{\text{em}} \eta N_1(\mathbf{r}, t) \cdot [W_R(\mathbf{r}, t) + W_A(\mathbf{r}, t)] - \frac{1}{\tau_c} N_1(\mathbf{r}, t),$$

其中,  $W_G(\mathbf{r}, t)$ ,  $W_R(\mathbf{r}, t)$ ,  $W_A(\mathbf{r}, t)$  分别为抽运、探测及自发辐射光的能量密度,  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{em}}$  分别为吸收截面和发射截面,  $\tau_c$  为激发态寿命,  $N_1(\mathbf{r}, t)$  为总的激光粒子浓度.

粉末薄层激光介质的增益系数可表达为

$$K_g = 1/l_g = \sigma_{\text{em}} N_1(\mathbf{r}, t).$$

为了获得光放大,首先要以一定的方式激发粉末薄层,最简单的方式为光激发.在常规激光中,抽运光直接被激光工作物质所吸收;但在随机激光情况下会遇到常规激光所碰不到的问题,即在粉末薄层中,抽运光要遇到材料对其的强散射,实际情况往往是散射高于吸收,这就使得粉末随机激光器的抽运效率较低.

低的抽运效率决定着要在粉末薄层中实现激光辐射,外界必须提供高的抽运光强,这就对抽运光源提出了一定的要求.假如使用连续激光抽运,由于目前现有的连续激光器输出功率有限,需要把激光聚焦到几十微米以内才能满足工作要求,这显然无法满足在某些应用场合下对较大发光面积的要求;若要得到大发射面积的光源,就要求抽运光为短脉冲工作的激光.另一方面,单侧、双侧等抽运方式对粉末薄层增益系数的空间分布有较大影响,在单侧抽运情况下,增益系数随厚度的增加而线性下降;在双侧抽运条件下,增益系数的空间分布几乎是均匀的.

### 3 粉末随机激光的实现<sup>[6]</sup>

荧光实验可以证明这种粉末薄层中是否实现了随机激光辐射.粉末薄层由三倍频的 Nd:YAG 激光照射,激发光正入射,聚焦成圆斑或条状.图 2 给出当激发光强改变时,粉末薄层辐射光谱的变化情况.在低激发强度时,辐射光呈现出一个较宽的自发辐射谱;当激发强度增加时,靠近最大增益的频率优先放大,光谱峰值变窄;当激发强度超过一定数值(阈值)时,发射谱中出现尖峰,其线宽小于 0.3 nm,该宽度为激发光强在阈值以下时粉末薄层所产生的自发辐射峰值的 1/30;当继续增加激发光强度时,有更

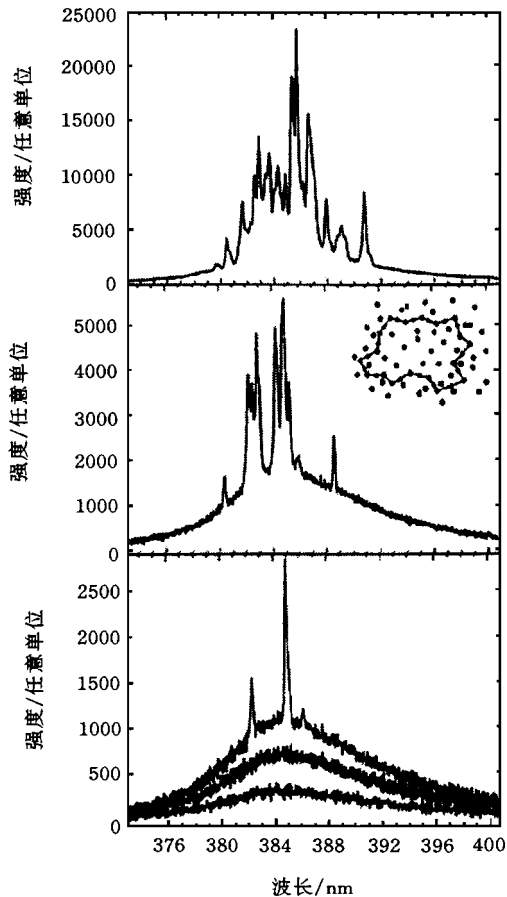


图2 ZnO粉末的辐射光谱图

(激发强度从下至上分别为 400, 562, 763, 875 及 1387  $\text{kW/cm}^2$ , ZnO 粉末层厚度为  $6\mu\text{m}$ , 激发面积为  $1600\mu\text{m}^2$ )

窄的尖峰出现.粉末随机激光的阈值特性通过输出光谱的积分强度随激发光强的变化情况表现出来(如图3所示).当抽运光强超过阈值后,输出光谱积分强度的增加速度迅速变大.

粉末薄层的散射平均自由程很短,受激辐射光被强散射,并由多次散射形成封闭环.粉末薄层中可形成多个这样起光学谐振腔作用的环.由再现散射形成的诸多环形谐振腔对光的损耗不同.当抽运光强度增加时,首先低损环形腔中的增益超过损耗,这些腔内产生激光振荡,振荡频率由腔的共振频率决定,此时,粉末薄层中出现少数的激光振荡纵模;当抽运光强继续增加时,高损环形腔中增益也超过损耗,此时出现多个纵模振荡.

粉末薄层随机激光增益介质的尺寸大小存在阈值.随机激光理论预言:维持激光输出需要的粉末薄层尺寸有最小临界值.对于三维的粉末薄层激光介质,最小临界尺寸  $V \sim (l_g)^{3/2}$ .实验表明,当激发辐照体积小于临界值时,粉末薄层中激光振荡停止.这是因为在激发体积小于此值时,环形谐振腔中光程

太短,其光放大不足以抵消损耗.

粉末随机激光除具有前面所介绍的特性外,还具有常规激光所不及的独特优点.对于常规激光而言,光的输出具有一定的方向性,其光束发散角很小,这是经常要利用的激光特性.但另一方面,也有很多应用场合需要光源在各个方向上都有强辐射,在这种情况下,常规激光的使用受到了限制,而随机激光恰恰是常规激光的有益补充.对于粉末随机激光器而言,由多次散射形成的不同激光谐振腔有各

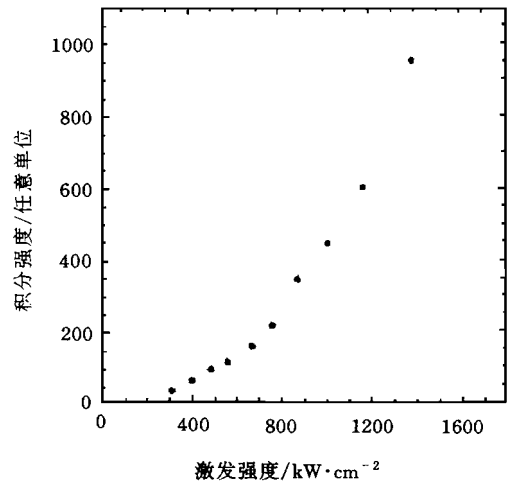


图3 不同激发强度下 ZnO 粉末辐射光谱的积分强度

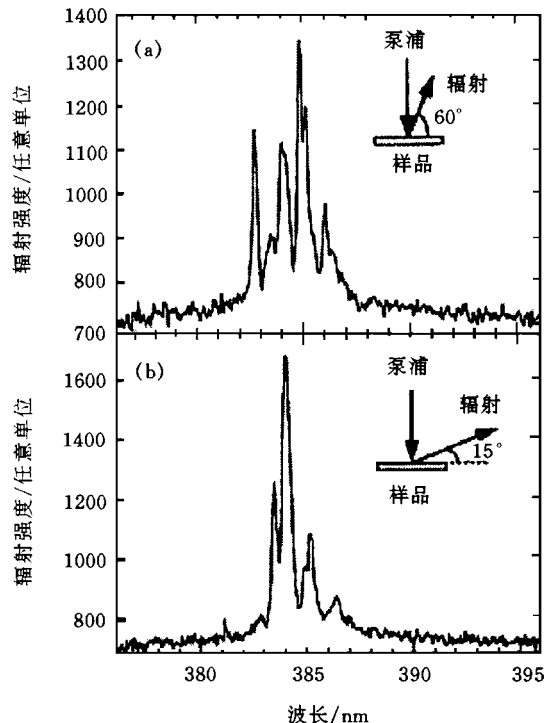


图4 两个不同方向上的激光发射光谱.

(a) 样品表面  $60^\circ$  方向; (b) 样品表面  $15^\circ$  方向  
(激发强度为  $1188\text{kW/cm}^2$ ; 激发面积为  $1130\mu\text{m}^2$ )

(下转第 456 页)