

“一把尘埃出激光”^{*} ——介绍一种新的无序激光器

宗 泽

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘 要 文章简略地介绍了新型无序激光的发现和确证过程,以及它产生相干光的机制.这种激光器没有腔镜,代替腔镜起作用的是无序介质中的光子囚禁效应.实验并显示了被囚禁的光子在介质中的分布.通过这种机制还可制成一个微米大小的微型激光器.

关键词 无序激光器,光子囚禁效应

“ Laser light from a handful of dust ” ——the newly discovered random laser

ZONG Ze

(School of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China)

Abstract The discovery and verification of a new kind of laser , the random laser , as well as the mechanism whereby it produces coherent light are briefly described. This kind of laser has no cavity-mirrors. The function of the cavity-mirrors is borne by the photon-confinement effect in the disordered medium. Experiment has also shown how the confined photons are distributed in the medium. Microlasers around one micron in size can also be fabricated based on this mechanism.

Key words random laser , the photon-confinement

“一把尘埃出激光”,这个别出心裁的标题是美国 Science 杂志 1999 年介绍这种新激光器时采用的,而《芝加哥论坛报》的介绍文章用的标题则是《新颖激光器——美国西北大学的魔术使它甩掉了腔镜》.这两个互补的标题简要地说明了这种新激光器的基本特点:它是由细微的半导体(如 ZnO, GaN)粉末(直径为几十纳米)沉积到玻板上所形成的一层薄膜,不需制作任何腔镜,此粉末薄层在光照射下即可产生激光.这一现象是我国留美的年青学者曹蕙在 1998 年发现的,在美国和国际上都受到广泛的重视.其他一些杂志如 Physics Today, Optics and Photon News, Chemical and Engineering News 等也都作了报道.在这篇短文中,将对它的发现过程、应用前景和物理机制作简单的介绍.

这一发现像许多其他大大小小的发现一样,有

一定的偶然性.但同样地,任何偶然的机遇只有“有心人”才能把握住,并需要锲而不舍地发掘出其深层的内涵,否则就是碰到机遇也会失之交臂.这次曹蕙原本是在测量 ZnO 粉末物质的光学参数,此项工作很快就完成了,但在测量过程中却观察到一个意外的现象:本来这种粉末介质所发射的光具有相当大的谱宽,但当泵光的功率超过某个值时,在原来宽谱的背景上会出来一些尖锐的谱线,其谱宽约为 0.2nm,为原来谱宽的 1/50 左右(参见图 1).这些特征很像是产生了激光:有一个阈值,在此阈值以上谱宽突然变小.但她未发现任何反射面可构成腔镜.我们知道,腔镜在激光的生成中有着十分关键的作用.首先是选频,即从自发辐射的光中选出一个特定频

* 2003-04-02 收到

率,其次是约束住发射出的光以引起受激辐射.现在没有发现腔镜,如何会产生激光呢?她与其他一些学者讨论时,许多人认为所出现的尖锐谱线可能是某种发光中心被激活后产生的.但她总觉得这种解释不踏实,并无实验证据说明这种活性中心的存在,另外当泵光增强时,会出来更多的尖锐谱线,哪来这么多的活性中心?她不懈地思索着,忽然觉得这些谱线可能并不密切与测试介质的成分相关,而是与粉末形态相关.按照这一思路她查阅了与粉末介质有关的文献,这才发现自己闯入了一个不熟悉的领域“无序介质中光的传播”,而她所发现的现象可能与光子的“安德森(Anderson)局域化”相关.

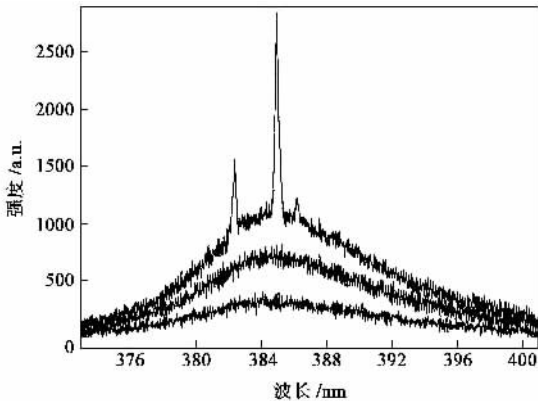


图1 泵光的强度增加时发射光谱的变化(由下向上泵光强度分别为400,562,783kW/cm²)

安德森局域化原本是对电子在无序半导体中的状态提出来的.当电子的自由程足够小时,由于多重散射的结果将会出现一些电子局域态.处于这种状态的电子将被囚禁在一个小范围内.按照这一理论可以解释无序半导体的许多性质.后来有人提出:是否在无序介质中光子也有囚禁的可能?但直到1997年才观察到与这种效应有某种联系的现象——反向散射的增强(对于微波在1991年就被观察到),而光子囚禁本身则一直未发现.

光子与电子有一个重要差别:光子的数目在传播中不守恒.在吸收介质中光子数会减少,而在增益介质(反转介质)中则将增加.如果囚禁在反转介质中的光子获得的增益大于损耗,就可能产生激光.在这里,代替腔镜起作用的就是粉末介质中的多重散射.此即为无序激光器的物理机制.这样,曹蕙在发现无序激光的同时也就发现了光子囚禁现象.但并不是单纯的光子囚禁,无序激光是光子囚禁和受激辐射相结合的过程.而这只有在反转介质中才会发生.

与普通激光器相比,这种新激光器有一个不同之处,就是它的光是向各个方向发射的,因而适宜于作光学显示和照明.对此,《芝加哥论坛报》作了下述报道:也许有一天这种更明亮也更便宜的激光器会取代年产值达300亿美元的发光二极管,作成高亮度的平板显示器和交通灯等等.该记者还访问了一些知名的光学专家.他们一方面表示这种新型激光器的确很令人感兴趣,一方面又指出,要将它实用化并形成产业还有很长的路要走.例如现在广泛使用的半导体激光器,其发明技术在1966年就获得了专利,但直到20世纪80年代末才形成产业.他们认为,这种无序激光器要实用化首先一个关键问题是要从光激发(光泵)改成电激发(电泵).改成电泵后只要接通电源就可发出激光,不仅使用方便,价格降低,体积变小,而且节省能源.同发光二极管相比,同样的功率其亮度将大上千倍.但从光泵改成电泵困难不小.曹蕙是一个物理学者,她觉得在无序激光和光子囚禁方面还有许多物理问题需要弄清楚,没有精力兼顾开发研究.据了解,在国外已有人在从事实用化方面的探索.

曹蕙随后的研究工作有下面几个方面:

(1)确证产生了激光.激光与普通光本质上的差别并不在于它的单色性好或方向性好(例如无序激光器所发的激光就不具有确定方向).激光与普通光的本质差别在于它的强度恒定.从微观角度来看,在普通光束中,光子是成团的,涨落很大(从而噪音很大),而在激光光束中,光子是随机分布的,涨落小(只有散粒噪音).曹蕙所观测到的“存在阈值”和“谱宽变窄”两个现象,只能表明发生了某种(非平衡)相变,未必就是产生出激光.确证产生了激光需要进行光子计数测量,从求出的光子计数分布和二阶相关度来作出判断.曹蕙研究组随后的研究确证了在阈值以上的确产生了激光.

(2)局域模的空间分布.初一想来,无序激光是多重散射形成回路而产生的(有如环形腔),因此光场似乎应该是以一个个回路形状分布在膜面上.但曹蕙研究组进一步观测发现,这一猜想并不正确.实际情况是:在阈值以下,膜面上的发光强度基本上是均匀的,而到阈值以上即出现激光时,发光强度变得不均匀,并出现一些小的亮点(见图2),其大小为半个微米左右(与波长同一量级).这表明激光光子基本上是囚禁在这些亮点上,每个模式包括相互邻近的若干个亮点,它们发出同样频率的光.

(3)制成无序“微激光器”.微激光器是集成光

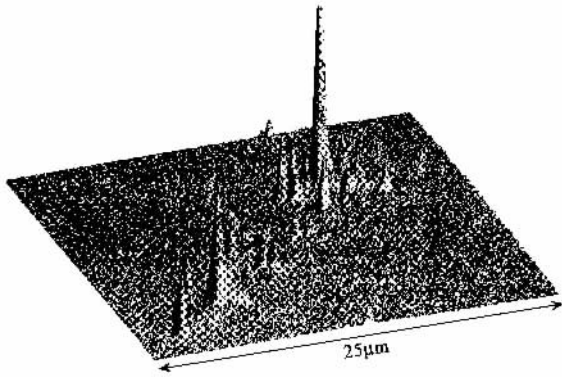


图2 纵坐标为薄膜面上的发光强度,此结果表明光子囚禁在一些圆点上.泵光脉冲能量为12.5nJ,图中约含3—4个模

路所不可缺少的元器件.大规模集成光路不仅要求激光器体积小,易抽运,而且要求能耗低.人们期望能做成大小与波长相当的微激光器(光的波动性给出腔长的下限是半个波长).过去十多年来,有两种半导体微激光器为人们所研究:一是面发射型量子阱激光器,其微腔长度为半个波长,再加上两个“分布布拉格反射镜”,总长度在10个波长以上,这种微激光器要用分子束外延装置来制造,工艺要求很高;二是侧发射型微盘激光器,它通过光在圆盘周边上的全反射形成环形腔(犹如天坛的回音壁),故其光模称为回音廊模式.这种激光器最小周边为一个波长直径,工艺上的难度也相当大(曹蕙在上述两个方面都进行过研究,目前仍有一半精力放在后一方面,并得出一些世界领先的结果.例如率先制成了单量子点微盘激光器.单量子点好比一个人工巨分子,这种激光器可能产生涨落比激光还小的光,即其噪音比散粒噪音还小——作者注).除了以上两种

以外,1999年有人提出在二维光子晶体上人工造成特定的缺陷以产生激光.这将是另一种新的微激光器,但工艺也不简单.而由粉末沉积出一个个微米大小(或更小)的团簇,则是很容易的事(因为对团簇形状要求不高).曹蕙研究组发现,直径在 $1\mu\text{m}$ 以下的团簇不会产生激光,但 $1\mu\text{m}$ 以上的就可产生,其中的发光亮点为1—2个.如果设想亮点是由多个散射回路交叉并在交叉点上相干叠加而成,那么从亮点本身大小已有半个微米看来,团簇直径需要大于 $1\mu\text{m}$ 也是容易理解的.这一结果著名的英国Nature杂志也作了报道.

另外,近年来曹蕙研究组还研究了这种无序介质中的局域模的一些与普通腔模不同的特点,这里就不再详述.

目前,光子在无序介质中的局域化研究,不仅受到光学界的重视,也受到其他邻近学科如纳米科学和无序科学等领域的研究者重视,近来还受到美国化学界的注意,并启发了对无序激光解析理论的探讨.

参 考 文 献

[1] Cao H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 73, 3656
 [2] Cao H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82, 2278
 [3] Cao H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84, 5584
 [4] Cao H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 76, 2997
 [5] Cao H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86, 4524
 [6] Burin A L, Ratner M A, Cao H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87, 5503
 [7] Burin A L, Ratner M A, Cao H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88, 93904

2003年第10期《物理》内容预告

庆祝北京大学物理系成立90周年

历史的回顾与启迪
 北京大学物理系90年(沈克琦等);
 核科学家摇篮——北京大学技术物理系的创建、发展和历史演变(郑春开);
 忆创办中国第一个五校联合半导体专业(陈辰嘉);
 怀念核物理学家虞福春教授(陆 焜等).
 特约专稿
 量子物理百年回顾(曾谨言);
 高温超导体的电子结构、反铁磁交换和实验新进展(韩汝珊等);
 酵母蛋白质网络的动力学性质(李方廷等);
 有限尺寸中的电子态(任尚元).

研究快讯

钠钴氧水合物新型超导体研究新进展(李建奇等).

评述

半导体纳米材料和物理(夏建白).

前沿进展

可调光子晶体研究进展(王东栋).

实验技术

阿秒激光脉冲新进展(韩海年等).

讲座

核科学百年讲座第十讲 中国老一代物理学家对核科学的重要贡献(郑春开).