

# 原子激光器简述

[美] Wolfgang Ketterle

张思溟 译

最近,麻省理工学院成功地制造出一台原子激光器.在这篇短文中,我们将讨论原子激光器的概念和特征,以及一些演示原子激光器所必需的技术.

## 什么是原子激光器?

原子激光器类似于光学激光器,只是原子激光器射出的是物质波而不是电磁波.它输出相干物质波,即可以聚焦到一点或经过准直后能无发散地长距离传播的原子束.这种原子束是相干的,也就是说,原子激光器的射束之间可以发生干涉.与普通原子束相比,原子激光器的射束异常明亮.同时,人们可以把这种“类似激光”的原子束中的原子说成是在“齐步走”.尽管还没有对原子激光作出严格定义(光学激光也是如此),研究者们一致认为高亮度和相干性是它的基本特征.

## 原子激光器的组成

激光器由激光腔(谐振腔),激活介质和输出耦合器构成.在麻省理工学院的原子激光器里,“谐振腔”是一个用“磁镜”将原子限制在其中的磁陷阱,激活介质是一团超冷原子的“热”云团,输出耦合器则是一个控制磁镜“反射性能”的射频脉冲.

作为信息的载体传递信息,当然是最理想的.光传播的媒体是光导纤维,所以信息高速公路是建立在光导纤维通信网络之上的.

近年来:“信息高速公路”的话题已说得很多了,它的来由是这样的:1993年9月,美国总统克林顿宣布实施“美国全国信息基础设施计划”,耗资4000亿美元,将历时数十年.这项计划的目的是建立覆盖美国全境的光纤通信网络,通过计算机系统,采用电视,传真、电话等通

## 原子激光器的增益过程

与激光中的自发辐射类似,原子激光器中的原子之间发生弹性散射(这种散射有如台球间的互相碰撞).在激光中,光子的受激辐射引起辐射场建立一个单一模式.在原子激光器中,玻色-爱因斯坦凝聚(此时原子占据系统的一个“单一模式”,即能量最低态)产生原子受激散射,使更多的原子进入该态.确切地说, $N$ 个原子发生的凝聚使其他原子被散射到此态的概率增加了 $N+1$ 倍.

在普通气体中,原子的散射发生在系统大量的量子态中,但当温度达到玻色-爱因斯坦凝聚的临界温度时,使原子进入最低能态的散射占优势,虽然最低能态仅仅是无数量子态中的一个.这一突变很像调整激光器到达临界状态时的情形,一旦辐射原子的数目继续增加,激光器便会立即射出激光.

在原子激光器中,“激励”和“激活介质”由蒸发制冷提供——蒸发过程产生了向更低温度弛豫的非热平衡原子云团,这引起凝聚体的增大.达到热平衡之后,原子激光器的净“增益”为零,也即处于凝聚态的原子所占比例在进一步冷却前将一直保持稳定.

信技术,向全国公民及时地提供所需要的各种信息.显然,这项计划的基础是建设光纤网络,同时调动激光技术、计算机技术,通信技术,网络技术,多媒体技术和卫星通信技术等,组成以极快速度和巨大容量传递信息的系统.这一巨大工程被新闻界称为“信息高速公路”.可见光纤将成为信息时代的重要角色,在某种意义上建设信息高速公路就是建设四通八达的光导纤维通信网络.

光学激光器有时可以在多种模式(如几个相近的频率)上工作,但物质波激光器不同,它总是工作在固定的单一模式上。事实上,玻色-爱因斯坦凝聚的形成中仍然包含“模式竞争”,只是由于基态“贪得无厌”,第一激发态不可能有宏观意义上的占居数。

### 原子激光器的输出

光学激光器输出准直光束,而原子激光器输出原子束。光学激光器有连续和脉冲两种输出方式,但时至今日,原子激光器只实现了脉冲输出。此外,光和原子的传播都遵循波动方程,前者受麦克斯韦方程组约束,后者则由薛定谔方程描述。与激光束发射的衍射极限(最小的发散角)相对应,原子束的发散有海森堡不确定性极限。在理想情况下,原子激光器发射的原子束发散度为海森堡不确定性极限。

### 原子激光器与光学激光器的区别

1. 我们可以产生光子,但不能生成原子。原子激光器中的原子总数不会增大,增大的只是处于基态的原子数目,同时其他量子态上的原子数目相应减少。

2. 原子间有相互作用——这使输出的原子束产生额外的发散。与激光束不同,这种物质波不能在空气中传播很远。

3. 原子是有质量的粒子,故其受到重力的加速。这种物质波会像一束普通原子那样下落。

4. 玻色凝聚系统处于热平衡态,其特点是温度极低;与此相反,光学激光器的特点是工作时处于负温度的非平衡态(这意味着比无限高的正温度还“热”)。另外,在蒸发制冷和玻色凝聚中绝不会出现粒子布居数反转。

### 历史渊源

粒子的量子力学波动本性是原子激光的物理基础。1923年,德布罗意在博士论文中预言所有的粒子均具有波的特性并给出了著名的公式,指出粒子的波长与它的速度成反比(粒子的物质波波长 = 普朗克常数 / 该粒子的动量)。1917年,爱因斯坦从理论上指出了光有受激辐射,这是产生激光的基本机制。1924年,在那时看来与此毫无联系的另一工作中,爱

因斯坦和玻色预言了物质的一种新的状态,该物态形成于超低温下,现在我们称之为玻色-爱因斯坦凝聚态。

### 原子激光器的应用前景

尽管原子激光器已经试验成功,在实用之前仍须对它进行重大改进,特别是增加输出功率和简化总体结构。这种类似激光的原子射束只能存在于超高真空环境,所以看来原子激光永远没法用在超级市场的条形码扫描器和CD唱机上。然而在基础研究和应用原子束的工业中,它有很多应用。比如:原子钟、原子光学、基本常数的精密测量、基本对称性的检验、芯片制造中的原子束沉积(原子刻板印刷术)以及更普遍的纳米技术。原子激光器可能会对所有这些应用产生深远的影响。今天,如果你需要高质量的光束,你会用激光器;将来,如果你需要高质量的原子束,你可能会用上原子激光器。

(译者单位:上海交通大学应用物理系 200240)

## 科苑快讯

### 世界上第一台微波等离子体炬光谱仪研制成功

据《科技日报》报道:世界上第一台微波等离子体炬光谱仪(MPT光谱仪),由吉林大学化学系金钦汉教授等研制成功,最近通过国家鉴定。

金钦汉教授介绍,这种新的光谱仪是以吉林大学微波等离子体炬方面的理论成果为核心技术和基础研制的,全部技术产权属于我国。

据介绍,微波等离子体炬光谱仪的研制成功,解决了世界上现有光谱仪器无法检测对于生命科学和环境科学极为重要的卤素等非金属元素的困难,克服了现有光谱仪器成本运转费用过于昂贵而难以在一般实验室推广使用,更无法用作教学仪器等缺点。

金钦汉教授介绍说,新型光谱仪可广泛应用于商检、环保、医疗、材料、冶金、化工、宇航、法医等各种需要对样品元素进行分析的部门和领域,商业前景十分广阔。

(卞吉 秦宝 编)