
* 学科发展 *

量子光学的新进展

王 育 竹*

(上海光机所量子光学开发实验室)

〔提要〕 量子光学是现代物理学中发展极为迅速的最重要的基础学科之一,本文扼要地论述了它的几个主要分支学科:腔内量子电动力学、压缩态研究与压缩态的量子无损测量、无粒子数反转激光研究、激光冷却气体原子与光学粘胶和原子光学的最新研究进展。

量子光学是现代物理学中最重要的基础学科之一,也是当前发展极为迅速的学科。量子光学是现代光学、激光科学和激光技术的基础。量子光学是研究光场本身的非经典性质以及光与物质相互作用过程中的量子力学现象的一门学科,包括光场的量子统计特性、光场的量子状态以及只能采用全量子理论来解释的光和物质相互作用产生的物理现象。更广义地说,与光场的量子性质有关的量子现象均属于量子光学研究的内容,如最近蓬勃发展的原子光学等。量子光学的研究成果不仅有助于近代物理学和近代光学的发展,而且影响到激光科学和技术、光电子学、非线性光学以及光通信、精密测量等高技术的发展。

量子光学自从 1956 年著名的 Hanbury-Brown 和 Twist 的光子相关实验发表后,发展就十分迅速。经典的 Young 干涉实验测量了光子的一次相干性,这种相干性实质上是描述光子通过这个或那个狭缝几率幅度的干涉,但是它没有证实光子的量子力学性质,而 Hanbury-Brown 和 Twist 的光子相关实验描述了两个光子的相关性,提供了观察纯粹量子力学效应的可能性。正是对这个实验的深入研究使近代物理光学对光场的量子力学性质有了更深刻更本质的认识。在量子光学中,相干性的量子理论引导出“相干态”概念的诞生,它描述一种物理上真实的光场量子态。而且,相干态表象为量子理论提供了一种用途广泛的有效方法。从相干态研究导出了压缩态光场的新概念。迄今,相干态这个既新颖又有深刻物理含义的概念已广泛地推广到物理学的各个领域。在激光出现后,特别是单频染料激光器的应用,成功地实现了用光压偏转原子束实验,重新诱发了人们对光子具有动量的研究兴趣。光子和原子动量传递规律研究和激光冷却气体原子的研究极大地丰富了量子光学的研究内容。不久前,利用光场的辐射压力控制原子运动的技术,成功地获得了高单色、高亮度、高准直度的原子束,并且成功地观测到了原子的干涉和衍射现象,把光学从光波段推向了物质波段,从而翻开了量子光学新的一页。下面扼要介绍一下国际量子光学研究的新进展。

* 作者为该开放实验室主任。

一、腔内量子电动力学 (Cavity QED)

Parcell (1945 年), Jaynes-Cummings (1961 年) 和 Barton (1970 年) 很早就提出了腔内量子电动力学效应的理论分析。由于腔内量子电动力学的基础研究, 对了解光和物质相互作用的基本过程有着重要意义, 因此, 很早就受到人们的注意。但由于早期技术条件的限制, 因而不可能进行实验研究。近十年来人们集中研究了最简单和最基础的系统, 即二能级单原子与腔内单模场相互作用的研究。德国 Walther 和法国 Haroche 等人研究了里德堡原子在高 Q 微波腔中的量子电动力学 (QED) 现象, 观察到了原子自发辐射增强和抑制以及量子崩塌和复苏的过程。近两年研究工作的重点从微波波段转向光波波段, 并主要研究三方面的问题: (1) 原子自发辐射增强的抑制及受激辐射增强现象, (2) 真空场的 Rabi 分裂, (3) Fock 态的产生和测量。

自发辐射速率的改变是由于真空场模密度的变化, 在自由空间中单位体积和单位频率的真空场模密度为连续的并与频率的平方成正比。在谐振腔中连续模谱变为分离模谱, 并与腔的 Q 值成正比, 在高 Q 微波腔内已观察到自发辐射的增强现象。但在光波段中, 由于波长很短, 一般看不到自发辐射的增强现象。近几年来人们提出了用微腔结构研究光波段的自发辐射的增强和抑制, 即腔内量子电动力学效应。意大利的 Martini 用间隔在半波长量级的 F-P 干涉仪作谐振腔, 观察腔内染料介质的自发辐射增强及自发辐射向受激辐射的过渡, 提出了零阈值激光振荡。美国 Heinzen 和 Campillo 等提出在光波段可利用共焦腔和球型腔研究 QED 效应。Campillo 用染料液滴做微腔, 观察到低阈值激光振荡。上海光机所用固体钕玻璃微球做谐振腔观察到增强的自发辐射和受激辐射, 并得到新的钕玻璃激光谱线输出, 为 QED 效应的实际应用提供了可能性。QED 效应的研究将促使人们对原子(物质)发光特性有一个更深入的了解。

原子和腔模间能量耦合与交换是 QED 研究中很活跃的课题。目前, 最感兴趣的是两能级原子和高 Q 腔共振或近共振耦合。原子和腔形成组合系统, 它的吸收光谱线由两条谱线组成, 其频率分别高于和低于未被微扰的原子共振频率和腔的共振频率, 称为真空 Rabi 分裂。最近已观察到仅有少数原子条件下的 Rabi 分裂, 估计不久将能观察到单个原子的 Rabi 分裂。

腔内量子电动力学研究中另一感兴趣的问题是 Fock 态光场的产生。Fock 态是光子数完全确定的光子态, 它具有极低的量子噪声, 是一个进行高灵敏度测量和验证各种量子理论的工具。理论指出, 单原子振荡器的光子统计分布依赖于原子与场的作用时间, 在高 Q 腔中和低温条件下, 光子在腔内几乎不损耗能量, 并且热噪声也完全抑制。当选定作用时间时, 原子发射到腔内的光子数是完全固定的, 因而可形成 Fock 态。另一种产生 Fock 态的方法是绝热快通过方法, 当腔的共振频率快速扫频时, 腔内处于高激发态的原子将辐射出光子并停留于基态离开谐振腔, 若腔的损耗可以忽略时则原子辐射的确定数目的光子留在腔内。这是当前力图实现 Fock 态的另一方法。

二、压缩态研究与压缩态的量子无损测量

光场压缩态是典型的非经典光场,它纯属量子力学效应。理论指出,一单模电磁场可用两个正交相分量表示,在压缩态中一个相分量的起伏被压缩而另一相分量的起伏增大,但两分量的起伏仍满足测不准关系式。压缩态研究在 1985 年前只限于理论,而理论工作又集中在讨论各种非线性光学过程产生压缩态的可能途径。理论指出,很多非线性物理过程都可以产生压缩态光场。

1985 年 AT&T 实验室 Slusher 小组首先在实验上观察到了压缩态光场,其辐射场量子噪声水平较相干态光场的噪声水平下降 7%,接着 IBM 的 Shelby 小组、MIT 的 Kumar-Shapiro 小组等利用不同的方法得到光场的压缩态。特别是加州理工学院 Kimble 小组于 1985 年利用环形稳频 YAG 激光器进行内腔倍频,以此输出作为 OPO 腔的泵浦光进而得到噪声水平较真空噪声水平下降了 63% 的压缩光。

日本的 Yamamoto 提出利用振幅负反馈产生振幅压缩态(粒子数态)光场。这种方法是将激光输出的随机起伏经理想的光子探测器负反馈到半导体激光器的直流偏置上。理论指出反馈环路中不仅剩余噪声可以压低,而且量子噪声也可压缩。实验证明它的光子统计是亚泊松的,仅存在于反馈环路中,不能引出使用,这是因为光束分束器起破坏亚泊松分布的作用。但是采用量子无损探测器代替光分束器时,则可在环路外观测到 Fock 态光场。最近, Yamamoto 又提出了利用相关性好的电子流激发半导体激光器产生亚泊松光子统计分布的激光束,这种压缩态光束可在开放光路中得到,无需用 QND 测量,因此,具有重要的应用前景。实验上利用驱动半导体激光管电源中的电阻所产生的负反馈,将量子噪声压缩 85%。上海光机所在两个串联的半导体发光管中得到压缩量子噪声 75% 的振幅压缩态光场。在这项工作中,从一个发光管取出噪声信号反馈到公共电源,由于两个串接发光管的光场噪声存在量子相关性,因而可压缩开放光束的量子噪声。

量子无损探测是压缩态光场研究的重要课题,它提供了一个不使压缩态光场性质遭受破坏的探测方法。在这类探测方法中,最重要的是在探测过程中不产生也不吸收光子。最近,法国的 Haroche 提出利用离共振时能级移动与腔内光子数的关系探测光子的状态。在离共振时能级的移动与腔内光子数成正比,而能级的移动导致了原子经谐振腔时原子叠加态的相位移动,这种相位移动可用 Ramsey 分离场方法探测出来。另一种量子无损探测压缩态光场的方法是利用原子束探测光场性质的方法,若原子束穿越光场的时间远小于原子激发态寿命,这时原子在光场作用下可吸收光子和受激发射光子,但光场的能量不变,而原子的动量分布却发生了变化,并且与光场的状态直接相关。因此可通过测量原子动量分布来判断光场的状态,这样可实现光场的无损测量。这是当前重要的研究课题之一。

三、无粒子数反转激光研究

无粒子数反转激光研究是近几年在量子光学研究领域中的重要课题之一。众所周知,原子自发辐射的速率随频率的三次方而增长,因此,在紫外波段或更短波长的激光介质中获得粒子

数反转是非常困难的。无粒子数反转激光研究为获得短波长激光提供了一个新的途径。很多作者提出了一系列的无粒子数反转激光的可能方案。很多方案是建立在 Fano 干涉效应的基础上和利用外场使原子在场中的吸收和发射谱改变,完全不同于裸原子吸收和发射的情况,以至于在不存在粒子数反转的条件下可以获得对信号的放大增益。例如在 Λ 结构的方案中,首先要建立相干叠加态,由于相干态的存在使得基态原子处于相干粒子数囚禁条件。因而,从这些态上吸收光子到激发态是不允许的,而从激发态发射光子却是允许的,这时激光发射不取决于粒子数反转,只取决于激发态上的粒子数。吉林大学物理系观察到了无粒子数反转介质中的放大现象。

四、激光冷却气体原子与光学粘胶

激光冷却气体原子是近十年来发展非常迅速的研究领域。激光冷却的概念是由美国斯坦福大学的 Hänsch 和 Schawlow 于 1975 年提出的,其物理思想是利用激光的光子动量传递给原子,形成辐射压力阻尼原子的热运动,使原子气体的温度降低。自从激光冷却气体原子的概念提出后,光的力学效应研究受到了物理学家的高度重视。因为利用电磁辐射压力影响和控制原子运动本身就是一个十分有意义的研究课题,同时激光冷却原子又为物理学研究提供了一个新的研究对象——超冷气体原子。激光冷却气体原子实质上是研究原子在光场中光子动量如何传递给原子,而原子又如何将动量传递给光场的。在这种光子动量传递过程中就形成了光场对原子的各种力学效应,如自发辐射力、感应辐射力(或偶极力),迟后偶极力,整流力和动量扩散等力学现象。利用这些力可以冷却、加热、偏转、准直和聚焦原子束等。1985 年美国的 Phillips 小组和 Chu 小组首先实现了激光冷却原子束实验,并且得到了极低温度($240\mu\text{K}$)的 Na 原子气体。更进一步他们用三维激光束交汇于空间一区域,在这个区域内,原子受到各种辐射压力的作用,其运动受到阻尼,原子如同在“光子胶水”中运动一样,处处受阻尼从而滞留在这个区域内,这就是著名的“光学粘胶”。在光学粘胶中人们得到了比理论预言“多普勒冷却极限”更低的温度,这个问题便成为近年来研究的一个热点。围绕这个问题的研究发展了很多激光冷却的新理论,这些理论的共同点是考虑原子是一个多能级的系统,原子的内部动态过程参与了光场和原子的动量传递。原子运动时,原子的内能态不能绝热的随外部场的变化而变化,导致了附加的阻尼力,因而可获得更低的冷却温度。根据光场的不同结构,提出了多种可以得到深度冷却的新机制:如偏振梯度冷却、磁共振冷却、叠加态粒子囚禁冷却和势垒中原子气体的绝热膨胀冷却等等。从理论上和实验上研究这些新的冷却机制是当前重要的研究课题。近几年人们用已冷却了的原子在光场的作用下产生速度选择性的相干粒子数囚禁,因为只有原子速度近于零的原子才能满足囚禁条件,利用这种方法已获得动量低于十分之一光子动量的原子气体。又如利用原子在势垒中运动过程的绝热膨胀也得到了小于一个光子动量的原子气体。研究这种超低温的气体原子的物理性质将对物理学的发展产生革命性的影响。

激光冷却离子也是一个重要的研究方向。离子用高频陷阱或 Penning 陷阱囚禁在一个很小的区域内,用激光冷却技术可把离子冷却到极低的温度。冷却了的离子可以长期囚禁于陷阱中,可供进行各种研究,如原子频率标准,光子反聚束研究和结晶过程的研究等,并已得到

了很好的结果。特别是利用离子陷阱技术是最有可能获得高稳定度的频率标准,这种高稳定度的频标对国防和科研有着重大的价值,因此受到了各国科学家的高度重视。

五、原子光学

近一年来,原子束技术的发展和激光冷却技术的应用,使得人们有可能研究物质波的衍射、干涉等的一系列类似光学的现象,从而使近代光学进入了一个崭新的研究领域,即原子光学。

量子力学的一个最基本的概念是物质波,称之为德波罗意波,所有的物质都有两象性,即波动性和粒子性。以往在原子物理研究中人们只考虑原子的粒子性,近年来激光冷却原子技术和原子束的速度单一化技术的发展,使得人们能够研究原子的波动性,即原子光学。在原子光学中,时间依赖的薛定谔方程形式上类似于经典光学中的标量亥姆赫兹方程,即在原子光学中波包传播的描述非常相似于经典光学中的描述。因此,当原子通过微加工的光栅结构时或周期性变化的光场时,会产生干涉和衍射等一系列与经典光学类似的现象,但在原子光学中这些现象是很难被观测到。这是因为粒子的波长比经典光学波长要小几个数量级,常温下约为 $0.1 \text{ \AA}$ 。同时,在通常的原子束中,相干性和束流强度仍远低于观察到干涉现象所要求的条件。只是近一年来,利用超声束技术、激光冷却技术和激光控制原子的技术等使得上面的条件能够得到满足。

目前原子光学研究中最核心的问题是观察原子波包的干涉现象和研制原子干涉仪。原子干涉仪不同于电子干涉仪和中子干涉仪,它具有内能态,可与光场相互作用,这点使干涉仪具有更重要的应用价值。从更普遍的意义讲,在干涉仪中原子初始是处于某一能态 $|i\rangle$ 上,然后经由某种势垒的散射而进入了复合态 $a|i\rangle + b|j\rangle$,复合态的这两个分量相互间可能发生波包位相的相散,最后由另一势垒散射而在某能态上重合,例如 $|i\rangle$ 或 $|j\rangle$ 态上,重合时就产生了波包的干涉。散射势垒可以是晶体表面、透明狭缝或金属栅格,也可用驻波场形成原子相位光栅或行波光场(即利用原子 Kapitza-Dirac 效应)。原子具有外部空间运动的自由度(如质心的运动或自旋)和内部运动的自由度(如原子处于各种能态上的运动),因此干涉过程可纯粹是由于外部质心运动状态的变化产生,也可能是内部状态变化所产生,或者两者混合。

德国 Konstanz 大学和美国 MIT 分别用双狭缝和周期栅格光栅观察到了氦原子和钠原子物质波包的干涉现象。这些实验完全相似光学的双缝杨氏干涉实验和光栅衍射实验,如图 1 和图 2 所示,它们相同于电子或中子干涉实验。实验中利用超声束技术得到单色的和强束流的原子束,经过第一狭缝的散射,形成相干原子束流。然后,相干原子束流照射双狭缝或金属栅格产生衍射,则原子波包在其后的一个平面上产生干涉。探测原子在空间的分布,即可观测到原子干涉图形。这类干涉仪的特点是原子质心在干涉仪中经历的途径在空间上完全分开,因此可在一条途径上加入某种作用势场(如光束或电磁场)改变原子波包的传播相位,观察干涉条纹的变化来研究势场对原子的作用,另一类原子干涉称为光学原子干涉仪,它完全不同于电子和中子干涉仪,它不要求原子质心的运动在空间上完全分开,它是通过对原子状态的探测来观察干涉现象。图 3 表示两对相反方向传播的四光束原子干涉原理图。以实线途径为

例,它表示一组原子波包轨迹的闭合环路,代表了一个相当于 Mach-Zenhoder 干涉仪。虚线为另一组干涉仪环路。原子在第一行波场中吸收一个光子而激发到激发态,若激发态有足够长的寿命,则原子分裂为两个部分波束,它们有不同的动量和不同的能态,但在 $|e, p + \hbar k\rangle$ 上的原子波包发生偏转。原子经飞行距离 D 后进入第二个行波光场,由于经历了不同途径原

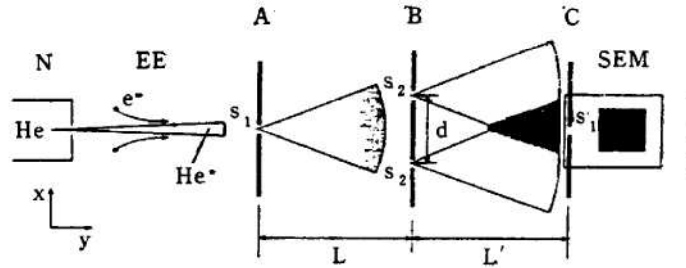


图1. 实验装置示意图。N——喷嘴系统和气体库；EE——电子碰撞激发；A——入射狭缝；B——双狭缝；C——检测器平面；SEM——二次电子放大器。 $D = 8 \mu\text{m}$ ； $L = L' = 64 \text{cm}$ ；狭缝宽 $S_1 = 2 \mu\text{m}$ ； $S_2 = 1 \mu\text{m}$ 。

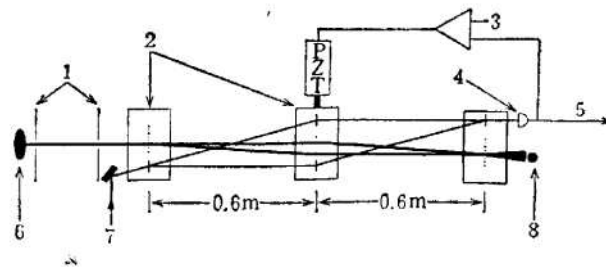


图2. 显示主动振动隔离系统的干涉仪。垂直虚线表示 $0.4 \mu\text{m}$ 周期的原子光栅,垂直实线表示 $3.3 \mu\text{m}$ 周期的光学光栅。1——准直狭缝；2——转换区；3——参照物；4——光电管；5——光电管信号；6——钠/氪源；7——氦氖激光器；8——为热丝探测器。

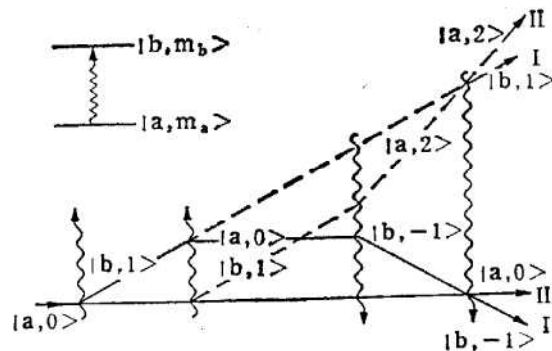


图3. 由四个激光场引起的钙原子束的光学 Ramsey 激发,可以看作是物质波干涉仪(实线: 高频反冲分量; 虚线: 低频分量; 这儿仅画出了导致 Ramsey 共振的轨迹)。在第一作用区,物质波分裂为两个部分波,内态为 $|a, m_a\rangle$ 和 $|b, m_b\rangle$, 这一部分仅分别对应于能级 a 和 b , 光子动量数 m 导致了空间分离。

子波包已分裂,在第二个行波场中激发态 $|e, p + \hbar k\rangle$ 上的原子受激发射一个光子回到基态 $|g, p\rangle$,同时改变运动方向而平行原来的人射方向 P ,但处于不同的途径上。然后原子进入第三个光场,由于光场的传播方向与第一和第二光场方向相反,基态原子吸收一个光子后跃迁到

激发态 $\langle e, p - \hbar k |$, 但运动方向向下偏转, 然后经飞行 D 距离后在第三光场重合(见图 3)。第三光场起到原子波包干涉的作用, 只需探测激发态上的粒子数, 即探测荧光强度就可给出干涉条纹。若在激发态上波包重合, 则探测到的荧光最强, 若波包完全分开找到原子在激发态的几率为零, 则荧光最弱。由波包分离的大小或相差 $\Delta\varphi$ 的大小与激光频率的失谐量有关 $\cos(\Delta\varphi) = \cos[2T(\Delta - \delta)]$, T 为在光束间飞行的时间, Δ 为激光频率对原子共振频率的失谐量, δ 为光子反冲频率, 改变激光频率即可观测到 Ramsey 干涉条纹。当有各种势场作用于原子的能态时, 就可看到干涉条纹的移动, 用以研究势场的作用。

原子干涉仪在科学技术上有着巨大的应用价值。由于原子具有复杂的内部结构, 而且对各种势场非常敏感, 因而用它可作各种势场的精密测量, 特别是用以测量弱作用力的实验, 如研究原子的纯荷电量、“第五”力实验、验证广义相对论和验证量子力学等。原子干涉仪又是一个精密的惯性敏感器, 因而可用于油井定位、新型原子导航仪、精确测量引力场加速度及二次加速度、测量 Sagnac 效应(旋转干涉仪时), 利用光场与原子作用可测量 A.C.Stark 效应、自发辐射的测量及量子 Berry 相位测量和 Aharonov-Casher 效应研究等。原子光学的另一个应用是研制原子显微镜。由于原子的德波罗意波长极短, 因此仅有几 $\text{\AA}$ 大小的焦斑, 用以探测物体表面, 可以获得极高的分辨率。这种显微镜对所研究的表面损坏最小, 因为原子不像电子带有电荷, 也不像中子具有很强的穿透能力, 原子的能量可小于 10meV , 对表面探测不产生损伤。

原子光学是一个非常年轻的研究领域, 由于它具有非常丰富的研究内容和非常重要的应用价值, 已吸引了大批科学家从事这方面的研究, 因而发展极其迅速。可以预计, 在不久的将来原子光学研究将会有突破性进展, 它不仅使人们对原子物理有一个更深刻的了解, 而且推动人们在更深层次上认识基础物理的规律, 也必将影响到科学技术的深远发展。从高技术角度看, 原子光学也将提供新的精密测量技术和仪器, 推动高技术的发展。光学这门古老的学科将在原子光学研究领域内重新焕发青春。