

激光及其相关学科的发展

王祖赓*

在物理学家汤斯、肖洛、卜洛赫洛夫和巴索夫等人研究工作的基础上,美国人梅曼于1960年研制出世界上第一台激光器(红宝石激光器)。在梅曼获得成功之后的几个月内,又有好几种激光器研制成功,其中包括第一台连续波运转的激光器——氦氖激光器。以后,各种激光器竞相出现,呈现一派欣欣向荣的气象。

在固体激光器方面,首先研制成功的红宝石激光器是以掺氧化铬的氧化铝晶体为工作物质的,激活离子为三价铬离子。1961年到1964年间,在一系列不同基质晶体中掺稀土元素(如钕、镨、钐、铽、铕、镱等)的激光相继运转。其中最为著名的是输出波长为1.06微米的掺钕钇铝石榴石激光器和掺钕的硅酸盐玻璃激光器,它们获得了广泛的应用。现已发现了好几十种激光晶体和激光玻璃,而激活离子除了大多数稀土元素外,还有过渡元素。由它们制成的激光器输出波长分布在紫外到近红外区内。

在气体激光器方面,已有几千条谱线获得运转,它们分布在从真空紫外到远红外的广阔波段范围内。其中,氦氖激光器(典型输出波长为6328 Å、3.39 μm等)是原子气体激光器,以后又发展了金属(如铜、镉、铅等)蒸气激光器和其他惰性气体(如氩、氦等)激光器。分子气体激光器中,输出谱线位于10.6和9.6 μm附近的二氧化碳激光器是最为典型和有用的,它已成功地用于金属加工、激光化学、激光医用等领域。最强输出位于337.1 Å的氮分子激光器常用来泵浦染料激光器,而输出波长在紫外和真空紫外区的惰性气体卤化物准分子激光器(如ArF、KrF、XeCl、XeF等)则是另一类非常有用的激光器。在离子气体激光器中,1964年研制成功的,最强输出位于4880和5145 Å的氩离子激光器是最为重要的一种,与此类似的惰性气体离子激光器还有氪离子激光器、氙离子激光器等。

在液体激光器方面,染料激光器是最重要的一种,目前已在上百种有机染料中获得激光输出,由于可使激光输出波长在近紫外到近红外区调谐,因而它在光谱学、激光化学等领域中获得了广泛的应用。

在半导体激光器方面,目前已有砷化镓、铝镓砷、镓砷、镓磷、铅锡碲等材料可研制成半导体激光器,输出大部分在红外区。半导体激光器具有体积小、重量轻的显著特点,作为光纤通讯的光源,它得到了很快的发展。

自由电子激光器和X射线激光器是激光技术的最新研究领域之一,但它们往往需要庞大的设备和高功率输入。1977年首先在美国斯坦福线性加速器中心运转的自由电子激光器实际是粒子加速研究工作中的副产品。

随着激光技术的发展,激光的方向性、能量密度、单色性、可调谐性和可调制性得到了进一步的改善,为多种相关学科的建立和大量应用的实现打下了坚实的基础。

激光光谱学的建立和发展

人们所掌握的有关原子、分子和物质结构方面的知识,大部分都由光谱研究所得。在认识物质微观世界方面,光谱学作出了巨大的贡献。从光谱中能获得多少信息量,主要取决于能达到的光谱分辨率和检测灵敏度。激光发明后,科学家很快就将它们用于光谱研究,使传统的光谱学经历了一次深刻的变革,形成了一门新的学科——激光光谱学。激光光谱学的特点是:(1)激光所能达到的高光谱功率密度不仅有助于弱光谱信号的探测,而且场强与物质的非线性相互作用项增大到可探测的地步,从而形成了崭新的非线性光谱学领域;(2)激光极好的方向性使激光光谱取样区域有高度的空间分辨率和能量聚集,可进行远距离光谱分析和微区光谱分析;(3)极窄的激光线宽对应了极高的光谱分辨率,无多普勒加宽光谱方法所达到的分辨率要比传统光谱分辨率高出好几个数量级;(4)可调谐激光器既是一种强光源,又是一种具有最高分辨率的光谱仪;(5)激光的可调制性使人们得到了一种短脉冲、巨峰值功率的光源,开拓了一个称为微微秒光谱学的新领域,这种时间分辨光谱学可用于快速弛豫过程、能量转移过程和化学反应等方面的研究。

激光运用于光谱学的最直接的方式是取代传统的光源,于是形成了应用最为广泛的激光吸收光谱术、激光荧光光谱术、激光拉曼光谱术和激光光声光谱术等。从光与物质相互作用机理这一角度来看,它们与传统光谱学相同,均涉及线性相互作用,因而称为线性激光光谱学。它所能达到的光谱分辨率原则上受原子(或分子)的跃迁线宽(主要是原子或分子热运动所引起的

* 作者系华东师大物理系主任、教授

多普勒宽度)的限制。因而也称为多普勒受限的激光光谱学。

另一类基于激光与物质非线性相互作用的光谱学称为非线性光谱学。它有崭新的光谱学机制、巧妙的实验方法和令人赞叹的研究成果。无多普勒加宽激光光谱学揭示了反映物质精细结构的光谱细节,是非线性激光光谱学中的突出成就。在这方面,为激光器的发明作出过关键性贡献的肖洛,又作出了杰出的贡献,为此获得了1981年诺贝尔物理学奖。

无多普勒加宽饱和吸收光谱是70年代初实现的第一个无多普勒加宽光谱技术,这种光谱方法是把那些对激光束无多普勒频移的样品粒子挑选了出来,所记录到的光谱是无多普勒加宽的。运用这种光谱技术已以高分辨率和高精度测量了大批原子和分子跃迁。紧接着无多普勒饱和光谱学,无多普勒双光子光谱学也得到了实现。双光子光谱学的优点不仅在于可用可见光波段来研究与紫外波段相对应的高位能级,而且在于它所达到的终态是与初始态具有相同宇称的能态,这些跃迁在单光子吸收中是禁戒的,因而双光子光谱研究填补了许多光谱数据的空白。双光子光谱已广泛地用于原子和分子的研究,例如可测量原子中D态和F态的精细和超精细结构分裂、同位素位移、塞曼和斯塔克分裂,可对里德堡态进行深入研究。偏振光谱法比饱和吸收光谱有更高的信噪比,由激光强度起伏等而产生的噪声可几乎全部被消除,这就能在较低样品浓度下或用较弱的光来进行光谱实验。

除了上述三种典型的无多普勒光谱技术之外,还有其它一些方法,例如内调制荧光光谱学、饱和干涉光谱学、量子拍频、拉姆西条纹技术等。

非线性激光光谱学中的另一大类是所谓时间分辨激光光谱学,它开辟了在规定时间内以高分辨率研究快速瞬态现象和超快弛豫过程的新领域。超短脉冲激光技术的发展和成熟,为该领域的研究打开了一个不可估量的前景。能级寿命的测量、反应动力学中碰撞过程研究、生物过程研究等都是时间分辨激光光谱的应用方面。此外,人们还发现了多种相干瞬态效应,例如光子回波、光学章动、自由感应衰变、量子拍频等。鉴于瞬态光谱考察的是物质对快速激发或激发骤然中止所作反应的光谱效应,因而可借以获得许多在稳态光谱中难于获得的样品结构和光谱的讯息,它还能在取得时间高分辨率光谱的同时获得频率高分辨率光谱。它在原子、分子和凝聚态分子弛豫机制研究方面占有重要地位。

非线性光学的发展

激光的发明使物理学中产生了一个令人神往的新学科分支——非线性光学。自从1961年美国的夫蓝肯及其同事在实验中观察到光的二次谐波以来,非线

性光学一直以惊人的速度发展着,几乎在所有科学领域中都获得了应用。

在非线性光学发展的开始阶段(1961—1965年),大量非线性效应被发现,这些效应包括和频、差频、谐波产生、参量放大和振荡、多光子吸收、自聚焦和受激散射等,它们的应用潜力立即得到了公认。在第二个阶段(1965—1969年),又发现了另一些非线性光学效应,例如光学击穿、非线性光谱学、瞬态相干现象等。人们的主要兴趣在于更好地理解在各种介质中的各种非线性光学效应以及建立有用的非线性光学器件。自70年代开始,非线性光学及其应用日趋成熟,它的研究已进入使用可调谐激光和超短脉冲激光的新领域,同时也扩展到众多的介质中。例如发展了表面非线性光学、波导内的非线性光学、等离子体内的非线性光学等。近年来,在相位共轭、光学双稳态、光学分叉、混沌、光压缩态、表面二次倍频、表面共振及多光子电离等方面的研究中,都取得了引人注目的进展,并获得许多应用。

全息光学

早在1947年,英国科学家伽柏为改进电子显微镜,提出了关于全息照相的概念,并进行了一些实验。但由于没有适宜的强相干光源,因而全息照相的发展被延迟了近三十年。激光的发明使伽柏提出的全息概念很快地发展成近代全息照相术。为此,伽柏于1971年获得了诺贝尔奖。

全息相片所记录下来的是包括位相和振幅在内的物光的全部信息,这是参考光和物光在照相片上相互迭加干涉的结果。当以激光束照射所摄制的全息相片时,它被相片上所记录到的复杂干涉图样衍射,所产生的衍射波构成了所摄物体的再现现象。随着灵敏底片和强短脉冲激光的使用,全息术不仅拍摄静物,而且能拍摄运动的物体。由于全息片上已记录了物光的全部信息,因而再现的物象与原物完全一样,除了有理想的三维性外,视差效应也极明显。此外,由于参考光与物光之间夹角不同时,底片上的干涉图样也随之变化,因而在同一底片上可多次曝光摄制多个图象,再现时各图象的再现现象将独立地出现在不同的衍射方向上。

全息术已获得多方面的应用和发展。使用厚感光乳胶、光色玻璃、卤素晶体、铁电晶体等介质,可在一定厚度内记录参考光与物光的三维干涉图样,构成了体全息图。通过逐次改变入射角或波长,单块介质可同时存贮大量的全息图,这实际上是一种高密度的记忆器件,可将一部立体全息电影、一部丛书等都记录在一小块晶体中。

全息术在干涉量度领域中得到了最实际的应用,它可以通过分析复杂的干涉图案及其变化,来计量研究任意形状和表面的物体以及它们的运动现象。

落管——空间实验的地面模拟手段

秦志成*

空间材料科学研究的主要目的在于利用空间环境,制备地面无法得到的新材料和在空间实现材料新工艺。然而,空间实验机会十分难得,且耗资甚巨。为此,各国科学家在地面建造了各种模拟空间环境的实验设施。落管就是其中之一。它是垂直安置并抽成真空(或根据需要充以某种惰性气体)的长管。样品在其顶部的熔化室熔化后成液滴状自由下落,并在下落时产生的失重和无容器过程中凝固,以进行空间材料研究的模拟实验。

落管的用途及科学价值

空间环境的特点是微重力、极低温、超高真空和无屏蔽的各种辐射等。其中最主要的也是地面上比较难以实现的是微重力。能模拟微重力条件的地面设施有探空火箭、高空气球、失重飞机、落管和落塔等。其中落管提供的微重力条件最好也最稳定,在较高真空下可达到 $10^{-8}g_0$ (g_0 为地面上的重力加速度值)的微重力水平,在落管中甚至没有在空间站中所存在的因宇航员的活动所引起的扰动;加之落管中的实验条件容易控制,模拟实验周期也短,一天可进行一次或数次实验。因此,落管成为开展空间材料科学模拟实验的重要手段。

落管中自由下落的液滴,在真空或某种惰性气体中凝固,是一种十分简单的无容器固化方式,它不像其它无容器过程(如电磁悬浮、助熔剂技术等),需要一种外力来抵消重力的作用。因而,也就没有其它无容器过程中的各种干扰。所以,落管的科学价值就在于,它是一种地面上模拟微重力条件下无干扰的无容器过程的实验手段。

目前,人们对空间环境、空间环境中的物理规律,以及它们对材料制备所产生的影响的认识还远远不够,而增加这些认识的空间实验机会却很有限;所以,实验前的理论与技术的广泛论证,都离不开地面模拟实验。因此,落管作为一种方便、可靠,而且花费不大的地面模拟手段,倍受各国科学家的欢迎和重视。

落管技术的历史演变

英国人 William Watts 于 1782 年申请了利用自由落体方法改善铅弹圆度的专利,这是最早将失重效应用于材料制备的例子。1956 年美国 Turner 设计并安装了世界上第一个锥型落管,管高为 1.2 米,并在其中进行了 Fe-Ni 合金的过冷研究,得到了亚稳的

* 本文作者还有杨海清 王文魁 刘培铭 王龙 陈佳圭

由于声波在液体和固体中可以很好传播,因而所发展的超声全息术能很好地记录水下的潜物、人体内的器官等。而红外和微波全息术对军事侦察和监视有重要意义,因为某些红外和微波波段在大气和水中有着较好的传输特性。

全息显微术也是全息术的一个重要应用。如用波长为 λ_1 的激光束来摄制全息片,而用波长为 λ_2 的激光束来再现,则物体就被放大了 λ_2/λ_1 倍。例如以电子束来摄制全息片,以可见激光作为再现光,则放大倍数可达十万倍。这种技术具有立体性,能显示物体和生物样品的详细细节。

激光在多种领域内的应用

激光的神奇特性以及激光技术的飞速发展,使它在诸多领域内获得了广泛而重要的应用。

激光在物理学中的应用首先涉及对原子分子的结构、它们的内部运动规律、它们在各种物理环境下的外

部运动规律及它们之间的相互作用规律的研究,激光光谱学和非线性光学已发展成为新兴的前沿学科。另一个重要应用方面是对基本物理定律的验证,例如首次在光学波段直接测得了拉姆位移值(1058 兆赫),这是对量子电动力学的最好验证。

在计量学方面,通过激光稳频技术的发展,产生了新的频率和时间标准,光频可测准到 10^{-14} , 时间测准到 10^{-11} 。

激光通信,尤其是近十余年来发展起来的光纤通信,是一种前景似锦的通信方式。1970 年人们研制出第一根光纤。所使用的光源通常为磷砷镓半导体激光器。进入 80 年代后,光纤通信得到了大发展,几个技术领先的国家组织了大容量、高速率和长距离的大干线、各类通信网和越洋海缆等。

激光还在医学、生物学、化学、机械加工和军事方面获得广泛地应用。可以预料,在今后的岁月中,激光及其应用将继续发展并不断造福于人类。