

现代光学

杨国桢

(中国科学院物理研究所)

一、 尼尔斯·玻尔与现代光学

在纪念著名物理学家尼尔斯·玻尔诞辰一百周年的时刻，我们不能忘记玻尔对现代光学的推动作用。

玻尔是量子力学的奠基人之一。他首先明确地提出了微观体系(例如原子)存在着一系列能量不连续的定态的概念。这与传统的经典力学的体系状态能量连续的想法是截然不同的。玻尔还指出，原子可以从一个定态跃迁到另一个定态，放出或吸收能量，这能量也是不连续的，此过程叫做量子跃迁。上述两个基本思想构成了人们对原子和分子等微观体系吸收和发射光量子的主要认识。此外，在量子力学建立以前，玻尔提出了对应原理。他利用经典振子的概念解释了原子光谱线的强度和偏振状态。在量子力学建立以后，对应原理成了量子力学与经典力学如何对应的一个极好的范例。

谈到现代光学，大家一定会想到光学是物理学的一个分支，是一门古老的科学，已经有数千年发展历史。在十七世纪前后，光学已初步形成了一门独立的学科。以牛顿为代表的微粒说和与之相应的几何光学以及以惠更斯为代表的波动说和与之相应的波动光学构成了光学理论的两大支柱。到十九世纪末，麦克斯韦天才地总结和扩充了当时已知的电磁学知识，提出了麦克斯韦方程组，把波动光学推到了一个更高的阶段。然而，人们对光的更进一步的认识是与量子力学和相对论的建立分不开的。一方面，十九世纪及其以前的光学为这两个划时代的物理理论的建立提供了依据；另一方面，这两个理论的建立，更加深了人类对光学有关现象

的认识。

因此，我们可以毫不夸张地说，玻尔的思想是现代光学的主要理论基础之一。

二、 现代光学的特点和主要内容

1960年，Maiman用红宝石晶体进行实验，首次实现了激光振荡，做成了世界上第一台激光器。激光器的发明，促使光学研究和技术得到飞速的发展，出现了一个崭新的局面。可以认为，现代光学的发展是和激光的出现紧密联系在一起。

从研究内容来说，现代光学可以分成两大类，即光与物质相互作用以及光与信息。

1. 光与物质相互作用

(1) 超强光与物质相互作用 (光强 $> 10^{12}$ 瓦/厘米²)

目前，激光器的最大连续输出功率为数千瓦，最大脉冲输出功率为100兆瓦左右。如果把100兆瓦的激光聚焦成数十微米直径的光斑，在焦点区域的光强能达到 10^{18} 瓦/厘米²以上。这样的光强对应的电磁场的电场强度比氢原子基态电子所受到内电场作用还要大一个数量级以上。在如此强的激光($> 10^{14}$ 瓦/厘米²)作用下，物质很容易被离化，产生数千万度的高温，成为高温等离子体。研究物质在超强激光作用下产生高温等离子体的过程以及激光如何与高温等离子体相互作用，这是人们非常感兴趣的研究课题。例如，激光引发核聚变，在实验室中模拟热核爆炸就是这样的重要研究课题之一。世界上许多国家已经投入相当大的人力、物力开展这方面的研究工作。中国科学院上海光学精密机械研究所也在进行着此项研究。

再考虑一种比引发核聚变所用激光的光强稍低但仍然是足够强的光(光强为 10^{12} 瓦/厘米²左右),这种光与物质相互作用,可导至材料的破坏。高能量激光武器研究一直是苏联和美国的重点投资项目之一。最近,美国里根政府提出并正在实施的“战略防御创新”计划,即通常国内外报刊上所说的“星球大战”计划,发展激光武器是此计划的核心部分。激光武器的最大优点是命中目标速度快,“光弹”以光速前进,因此,用它来对付洲际弹道导弹是十分有效的。

此外,激光应用于材料的切割、焊接和热处理等方面,已成为比较成熟的工业应用,有着明显的优点。由于用激光对材料进行加工是非接触加工,所以加工过程中产生的表面应力和形变极小,并且加工的材料可以从金属到非金属的几乎一切材料。

(2) 强光与物质相互作用(光强为 10^3 — 10^{12} 瓦/厘米²)

这是属于非线性光学和非线性光谱学的范围,有许多基本物理问题需要人们进一步研究和探索。主要有以下三个方面的问题。

首先,研究体系(例如原子、分子等)在强光作用下如何变化。变化的规律应满足物质方程,即薛定谔方程:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H(\mathbf{E})\psi, \quad (1)$$

式中 H 为体系的哈密顿量,是光的电场强度 \mathbf{E} 的函数, ψ 是体系的波函数。假如激光很强,具有很窄的频谱,并且调整激光频率使得光频与体系的能级差处在接近共振的状态。在这种情形下,常常不能用微扰论的方法来处理近共振的激发问题,必须发展非微扰论方法求解体系的薛定谔方程,从而得到体系的波函数 $\psi(\mathbf{E})$ 与光强度的函数关系。只有在很特殊的体系中,才能严格求解光与此体系相互作用的薛定谔方程。一般说来,薛定谔方程的非微扰求解是一个没有完全解决的问题。

其次,光场应满足麦克斯韦方程,即

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{P}(\mathbf{E}), \quad (2)$$

这里 \mathbf{P} 是体系的宏观极化矢量,在电偶极近似情况下可表示为

$$\mathbf{P} = \sum_i \int \phi_i^*(\mathbf{E}) \epsilon \mathbf{r}_i \phi_i(\mathbf{E}) d\mathbf{r}_i, \quad (3)$$

式中 $\phi_i(\mathbf{E})$ 是第 i 个微观粒子的波函数。从(2)式可以看出,光场满足的方程与光场本身引起体系的宏观极化 \mathbf{P} 有关,一般说来, \mathbf{P} 和 \mathbf{E} 的关系不是线性关系。因此,在通常情况下,(2)式是一个光场中的电场 \mathbf{E} 的非线性方程。众所周知,求解非线性方程是困难的,也是目前许多学者正在研究的问题。然而对于非线性方程性质的了解,就能够解释一系列新现象,而从线性方程出发是不可能理解这些新现象的。

最后一个基本问题是非平衡统计问题。由于在许多情形下光场是一个脉冲光场,光脉冲作用的时间很短(毫微秒、微微秒或更短)。这时在光场作用下的体系常常是非平衡的体系。例如,光场共振激发的原子体系,光场共振激发的多原子分子体系,在人们感兴趣范围内,这些体系的能量分布通常并不是热平衡分布的。

强光与物质相互作用的基本理论问题可归结为量子力学体系波动方程的非微扰方法求解、非线性麦克斯韦方程和非平衡统计问题。实验上也已经观察到了与这些理论问题密切相关的一系列新现象。例如:光场在非线性介质作用下的倍频和三次倍频;原子和分子体系的双光子和多光子过程;光场通过非线性介质的自感应透明现象及其孤子解;在非线性介质作用下脉冲光频率的超加宽现象;光学双稳现象;光导纤维中光波传播及非线性薛定谔方程;光学双稳装置和激光器中的混沌现象;光波在原子和分子体系中的选择性激发等等。

下面选择两个比较重要的现象及其可能的应用作进一步介绍。

首先介绍一下激发态光谱,特别是高激发态光谱。利用激光单色性好的特点,能够把原子和分子体系选择性地激发到特定的激发态。现在已经可以做到,把原子激发到其主量子数 n 超过 100 的高激发态。大家知道,原子的平

均半径 r 与主量子数 n 的关系为

$$r \propto n^2, \quad (4)$$

原子激发态的平均寿命 $\bar{\tau}$ 与主量子数 n 的关系为

$$\bar{\tau} \propto n^3 \text{ (或更高次方)}. \quad (5)$$

由(4)式可见,如果在基态时原子的半径是埃的量级大小,则在 $n > 100$ 的高激发态时,原子的平均半径将为微米量级大小,也就是说具有宏观的量级大小.从(5)式可见,如果在基态时原子的第一激发态的寿命约为 10^{-8} 秒,于是在 $n > 100$ 的高激发态时原子的平均寿命将是 10^{-2} 秒或更长.所以,高激发态原子与基态原子或第一激发态原子相比,具有非常不同的性质.

人们利用激光选择性地激发原子或分子到特定激发态的特点,可以开拓应用领域.一个可能的应用是激光分离同位素.我们以原子法分离或浓缩铀同位素为例进行说明.铀原子的能级示意图如图 1 所示. U^{235} 和 U^{238} 两种同

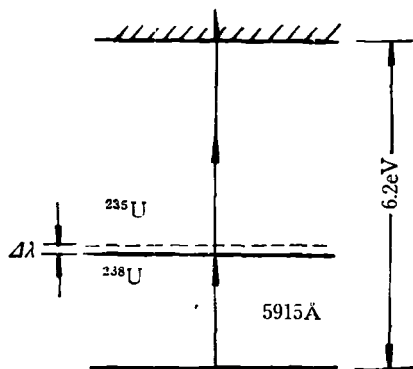


图 1 原子法激光分离铀同位素示意图

位素的原子核的质量具有微小的差别,从而原子能级也有微小的差别,相应的激发光的波长差 $\Delta\lambda = 0.1$ 埃.我们可以选择性地激发 U^{238} ,并用光场或电场的办法使它离化和从样品中分离出去,因而可从 U^{235} 的丰度不高的天然铀中得到浓缩的 U^{235} 的核燃料.激光分离铀同位素的特点是生产成本低,能耗小.近年来,美国用上亿美元的资金发展铀和钚的同位素激光分离技术.激光分离同位素已接近工业生产阶段,美国能源部计划在 1987 年建成一座激光分离铀同位素的试验性工厂.可以期望,用激光方法分离或浓缩同位素,能与传统的气体扩散法和离心法竞争.

其次我们介绍一下对单个或少数原子和分子的探测问题.大家知道,不同原子和分子的能级结构是不同的.利用激光良好的单色性,可以选择性地把特定的原子或分子激发到适当的激发态,或者继续用光激发或外加电磁场使激发态原子或分子离化.通过探测激发态原子或分子的荧光发射或电离态的带电粒子(电子或离子),检测特定的原子或分子是否存在.单个原子检测技术的示意图如图 2 所示.由于探测荧光发射或带电粒子的灵敏度很高,因而检测原子和分子的灵敏度也可以很高.目前已能做到检测每立方厘米存在 1 个原子或分子,并在 Na, Ba, Cs, Fe, Li, Yb, NO, NO₂, I₂, CH₃I 等数十种原子和分子中获得了成功.传统光谱分析的检测灵敏度约为 10^8 原子/厘米³.由此可见,少数原子或分子的激光检测方法的灵敏度是非常

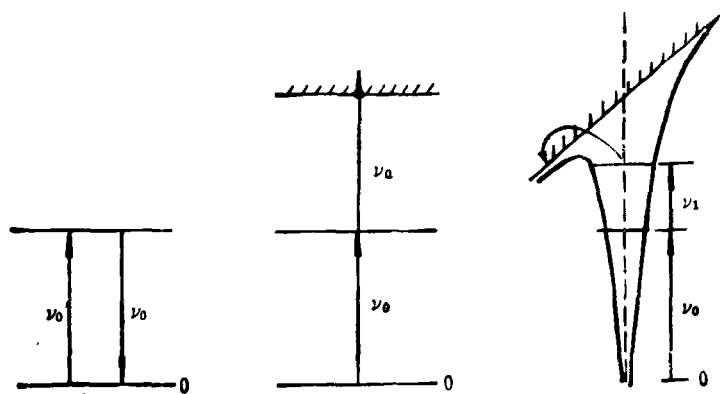


图 2 单个原子检测技术示意图

高的,人们可以利用这种方法探测诸如核裂变、光化学反应等突发事件产生的中间产物的性质,例如寿命、输运特性等,还可以用于环境污染的监测、罕见粒子(例如夸克)的探测等方面。

(3) 超短光脉冲与物质相互作用

利用激光在光导纤维中的非线性传播引起的频率加宽以及光栅的色散延迟器作用,能够大大压缩光脉冲。迄今获得的最短光脉冲为 1.2×10^{-14} 秒。取光波的波长为 6000 埃,这意味着一个光脉冲只有 6 个振动周期。获得超短脉冲激光的示意图如图 3 所示。

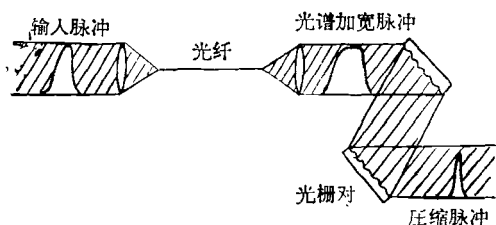


图3 获得毫微微秒光脉冲的实验装置示意图

亚微微秒或更短的超短脉冲的获得,反映了人类对于光与物质相互作用了解的深入。反之,有了超短脉冲作为工具,可以研究超短脉冲光与物质相互作用的快速过程,更好地了解物质的性质。例如:可以用超短光脉冲研究半导体中光激发载流子的寿命以及固体中快速弛豫过程;利用超短光脉冲作为激发和诊断手段,可以得到化学反应中间产物的信息(产生什么物质以及它们处在什么激发态等等),研究化学反应微观动力学;利用超短光脉冲,可以了解光合作用和视觉光化学等生物过程中快速能量转移过程。超短脉冲光与物质相互作用是除原子核过程以外的最快的过程。在原子、分子、固体、液体和等离子体中存在着快速能量转移和弛豫过程,对这些过程的了解,只有在超短脉冲激光出现之后才有可能。此外,能够得到的最短光脉冲是什么,有无极限,这也是人们感兴趣的研究课题。

2. 光与信息

现代光学的另一个重要方面是激光用于信息的传输、处理和存储的研究和应用。大体上可以分成以下几个领域。

(1) 光导纤维通信

光纤通信的最大优点是传递信息的容量大、价廉和抗干扰保密性好,现已进入大量推广应用阶段。

以 0.8~0.9 微米短波长光源和石英多模光纤组成的第一代光纤通信系统业已成熟,并在城市电话中继线路和中短距离信息传输中获得广泛应用。为了进一步降低信息在光纤中传播的损耗,以 1.3~1.55 微米长波长光源和单模光纤为代表的第二代光纤通信系统也发展得相当成熟,并已在中等距离的通信系统中使用,即将在长途干线上使用。北美和欧洲正在筹划铺设第一条横跨大西洋的海底光缆,信息量相当于四万条电话线路。到 1983 年为止,世界上总共敷设的光纤线路已达 27 万公里。

(2) 光学信息处理

光学信息处理的基础是球面透镜的傅里叶变换功能,即理想薄透镜的前、后焦平面的图象互成傅里叶变换,如图 4 所示。

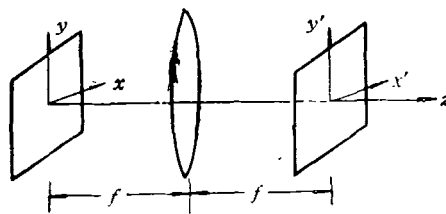


图4 理想薄透镜的傅里叶变换功能

光学信息处理的特点是同时能实现二维图象的平行运算,因而速度快和内存信息量大。对于分辨率为 50 万(625×800)点的图象,进行一次傅里叶变换运算,只需要毫微微秒量级的时间,相当于光波在光学系统中传播时间。目前光学信息处理已成功地用于合成孔径雷达的信息处理,并部分地应用于图象特征识别和模糊

图象处理等方面。特别是把光学信息处理和电子计算机的运算功能结合起来,发展了混合计算方法,大大地提高了光学信息处理的通用性,并开拓了新的应用领域。

以半导体光学双稳元件为核心的新一代计算机——光数字计算机,正在研究之中。目前 GaAlAs/GaAs/GaAlAs 型光学双稳装置,能得到的光开关速度已达微微秒量级。美国和西欧国家都集中了相当的人力进行光数字计算机的研制工作。

(3) 光学存储

光学存储就是采用聚焦激光束对信息进行写入和读出的技术。已经取得显著进展的主要领域包括录象光盘、袖珍光盘(或叫数字声频光盘)和可录/可擦光盘。前两种所用记录材料不象磁盘那样是可擦的,而是一种永久性记录介质;后一种所用记录材料是可擦的,通常用的记录介质为 MnBiCu, TbGdFe 等磁光材料。

光盘是一种高密度、大容量的存储器。在直径为 30 厘米的圆盘上可存储 10^{11} 位的信息,存储密度比磁盘高 100 倍,比盒式磁带高 50 倍,而每位信息的成本却低两个量级,使用寿命提高五倍左右。

录象光盘和袖珍光盘从七十年代末已陆续进入市场。据统计,1984 年全世界的销售额已

达三亿美元左右。可录/可擦光盘技术正在迅速发展。有人预计到 1990 年,全世界 50% 以上的计算机机存数据将储存在激光光学介质上。

3. 其他领域

前面已经简单介绍了光与物质相互作用和光与信息两大方面的情况。当然,还应该提一下产生激光的激光器的发展情况。迄今为止已经研制成功的激光器是多种多样的。从工作物质看,有固体、液体、气体、等离子体,甚至基本粒子(自由电子);从光波波长看,从亚毫米波一直到真空紫外,甚至 X 射线;从工作机理看,有束缚态和束缚态之间的跃迁(例如通常的激光器),束缚态和自由态之间的跃迁(例如准分子

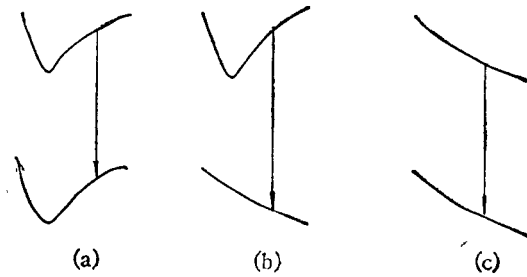


图 5 不同类型激光器能级跃迁示意图

- (a) 束缚态→束缚态;
- (b) 束缚态→自由态;
- (c) 自由态→自由态

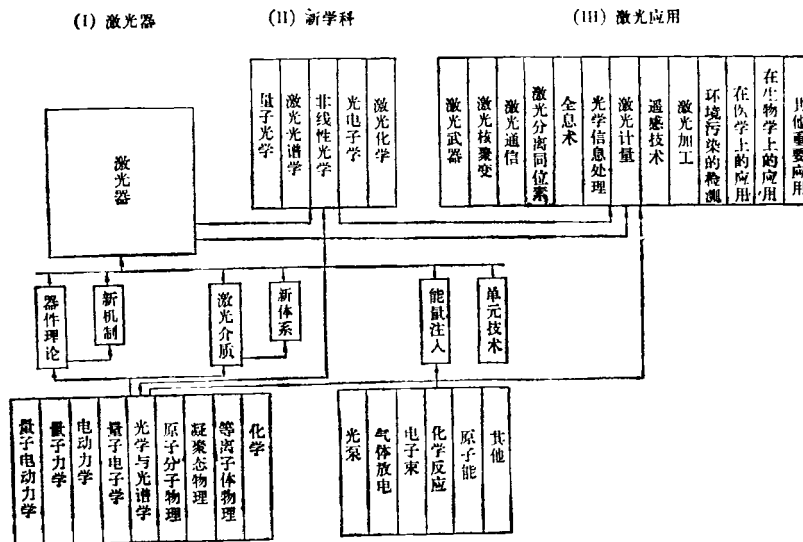


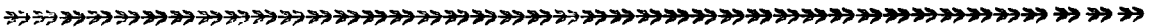
图 6 激光科学的基础理论、技术基础和主要应用示意图

激光器),以及自由态和自由态之间的跃迁(例如自由电子激光器),见图5。此外,激光的泵浦源的工作方式和输出功率等也是多种多样的。目前主要是向大功率、高重复率、短波长、可调谐、短脉冲和新激光体系等方向发展。

以上我们介绍了现代光学的一个概貌,主要着重于与现代光学的核心部分(激光科学技术)有关的基础物理问题和重要的应用,本文并不企图全面介绍现代光学的所有领域。应该提到的是,由于计算机和其他新技术的发展并日益渗透到光学领域,使得光学设计、光学仪器、光学材料和光学元件等方面都发生了重大的变化。此外,就激光领域而言,有些重要方面我们也没有涉及。例如,光频标、光子统计计数、激光医学等等。

三、结 束 语

激光科学的基础理论、技术基础及主要应



1986年第5期《物理》内容预告

分数维数和分数生长过程(黄昀);量子阱的光学性质(徐仲英等);新型非线性光学晶体KTP(黄朝恩);金属-绝缘体-半导体(MIS)太阳能电池原理简介(郑文琛);宇宙的大尺度结构的形成和演化(邓祖淦);生物磁学在农业上的应用(李国栋);磁性流体及其应用(郭华聪);X射线编码成象的噪声与象的畸变(林书煌等);复相X射线定量分析中的一种内标法(钟福民等);准晶体的原子间向量函数(李方华);用双探测器系统实现实验室EXAFS测量(陆坤权等);高压物理

用如图6所示。它粗略地反映了激光科学技术内部各分支之间的联系以及激光与其他学科之间的相互渗透的关系。从图6可以看出,今天的光学再也不是三十年前所感觉到的那种“日暮途穷”的情况了,它展现出一派欣欣向荣、蓬勃发展的景象。在光学领域中,基础理论、技术和应用紧密联系,新的现象和发明创造不断涌现,与其他科学技术的相互渗透日益增加,出现了一些新的边缘学科。光学的研究范围异常广泛,在国民经济和科学技术的发展中起着越来越重要的作用。

本文撰写过程中,得到程丙英同志的帮助,特此感谢。

讲座:动态高压技术(经福谦);朱载堉及其平均率(戴念祖);麦克斯韦是怎样推导速度分布律的(沈慧君);介绍中国科学院固体物理研究所内耗与固体缺陷开放实验室(中国科学院固体物理研究所业务处);中国科学院上海技术物理研究所红外物理实验室简介(唐文国等);建设一个国内外同行前来合作研究的基地——中国科学院上海冶金研究所离子束开放实验室简介(柳襄怀)。