

第一章 科学研究的方法和若干前沿

§ 1.1 科学研究的思想和方法

科学和技术的发展对于人类生活与社会进步起着愈来愈重要的影响. 20 世纪中叶电视和通讯的发展已无不影响人们的日常生活, 而计算机技术的发展已开始将社会带入信息时代. 20 世纪 50 年代 DNA 双螺旋结构的发现使生物科学发展到分子水平, 迅速发展的基因工程对于农业和医学产生了巨大的影响. 新兴的生物工程已经开始, 生命科学时代即将到来. 科学和技术已成为当今社会最重要的时代特征, 科学研究成为人类社会生活中最受关注的部分之一.

作为大学教育的一部分, 应该使学生充分认识到科学研究的重要性, 引导他们在大学的学习生活中亲自参加科学研究的实践, 学会进行科学研究的方法. 对于理科的大学生, 在学校里进行科学研究素质的教育和训练则尤为重要.

学者和专家对科学研究的思想和方法有深入的研究和探讨, 在此我们仅对于同学在开始从事科研课题研究时需要重视和认识的几个问题进行讨论. 希望他们通过参加一些小型的科学研究实验得到科研工作的锻炼, 为今后参加科学研究工作打下基础.

1. 科学研究中的创新意识

创新是科学发展的前提. 创新常常会改变科学和技术发展的进程. 比如计算机的发展以硬件为基础, 计算机使用的器件由电子管、晶体管、集成电路, 到大规模集成电路等, 使得计算机的性能愈来愈好. 但是软件技术的发展, 使得可以用软件代替硬件的某些功能. 20 世纪 80 年代至 90 年代软件视窗技术的应用不但大大推广了计算机的普及, 也在功能和应用上有许多新突破.

从事科研课题的研究最重要的也是创新. 首先必须有一个好的想法 (idea), 它不应该是陈旧的或重复别人的思想, 而需要自己创新的意念. 这样的研究工作才能有所发现, 有所创造.

2. 科学研究需要知识的积累和严谨的科学作风

科学研究的创新性并不意味着排斥知识的积累, 创新的基础是知识的继承和积累, 新的科学发现也是在前人工作的积累下发展起来的. 现在的科学和技术的发展更加复杂和深化, 研究工作者更需要有广博和深厚的知识基础.

从事科学研究还必须有严谨的科学作风，研究工作要一丝不苟、实事求是。科学实验常常要做大量重复的工作。居里夫人发现放射性镭就是经过四年历程，从几吨铀沥青矿中提炼出十分之一克的纯镭，可以想像当时的艰辛。科学实验和记录必须真实，不能主观忆测，更不能虚假，获取数据后要通过科学分析去伪存真，得到正确的结果。

3. 科学研究的分析法和综合法

几百年来自然科学发展进步的一个重要原因是科学研究使用的分析方法。科学研究分析法是指将研究的对象分隔，逐步深化进行研究，比如医学研究的解剖学，物理学研究的由宏观到微观。分析法对科学的深化研究有很大的推动作用。但是近二三十年来，科学的综合方法更趋向主流。这是由于研究的对象更加复杂，互相关联，局部的研究不能解决复杂系统的问题。比如生物学中脑功能的研究，物理学中宏观和微观间的介观物理领域的研究等，必须用综合方法做整体考虑。从事科学研究必须领略研究方法的重要性。

4. 科学研究中的学科交叉和合作精神

科学研究的复杂性要求更多的学科交叉和科学家的合作共事，合作完成科学研究的课题。比如同步辐射应用研究，仅建设同步辐射加速器光源本身就需要有物理、机械、控制、测量等多方面的科学和技术专家的合作。而建成的同步辐射光源则更是一个大的科学集体，在它上面可同时开展有关生物、材料、医学、化学、物理以及工业技术等各方面的科学研究。科学家们在这里分别研究各自的课题，也有交流和讨论，研究工作相互渗透，交叉学科的研究也在此产生。如果说19世纪末20世纪初科学家的个体科研活动还是主要方式，那么当今科学研究的复杂性则需要很多人的合作才能产生重要的研究成果。高能加速器研究实验中，数十名人员署名的文章已屡见不鲜。学会合作共事是从事科研工作需要培养的重要品质。

§ 1.2 物理学研究中的若干前沿

1. 天体物理学和天文观测

天体物理学是目前物理学研究中最活跃的领域之一。由于天文观测技术的发展，20世纪60年代以后天文学上有了一些重大的发现，如类星体、脉冲星、微波背景辐射、 γ 射线暴和引力透镜等。与此同时，一些新的理论和新的概念也不断提出，如暗物质、吸积盘、黑洞等。用新理论解释天文现象以及用天文观测验证、发展新的理论使天文学研究进入了新的时代。

天文观测最重要的发展是空间天文观测和全波天文学。它们克服了地球周围大气层的影响以及可见光望远镜接受光波的限制性。哈勃空间望远镜、伦琴 X

射线卫星、空间红外望远镜等都有重要的观测结果。21 世纪初，新的空间卫星和大型天文望远镜将要建立。我国科学家自行设计建立的大天区多光纤巡天望远镜(LAMOST)也将开始运行。

天体(恒星、星系、宇宙整体)的起源和演化是自然科学最根本的问题之一。21 世纪天体物理学的研究将用更令人信服的观测结果，更严格的理论研究天体，揭示宇宙起源和演化的规律。

2. 粒子物理学和高能加速器

粒子物理学从 20 世纪 40 年代开始成为物理学最前沿的领域之一，半个世纪以来对它的研究取得了非常大的成就。人们对微观世界的认识已经从分子、原子、原子核到了粒子的层次。现在我们已经知道所有物质都是由夸克(层子)和轻子两类粒子组成的。实验发现并经理论证实的有六种夸克(u、d、s、c、b 和 t)和六种轻子(电子、 μ 子、 τ 子、中微子、 μ 中微子和 τ 中微子)以及它们的反粒子。对于粒子的三种相互作用：弱相互作用、强相互作用和电磁相互作用都有了较深入的了解。建立了以弱电统一理论及量子色动力学为基础的基本理论，并探索建立弱、电磁、强作用统一的超对称大统一理论。

高能加速器的发展对于粒子物理实验研究起着关键的作用。20 世纪 60 年代以来使用世界各国建立的高能加速器已发现了数百种粒子。1995 年发现的 t 夸克就是在 1.8 TeV^①的质子-反质子对撞机(TEVATRON)上经过两年的实验找到 12 个 t 夸克后宣布的。我国在北京建设的北京正负电子对撞机(BEPC)工作在相对较低的能区，但正是适合于 τ 轻子和 c 夸克的能区。由于它具有高亮度的优势，使其在同能区占有领先地位。1992 年在 BEPC 上完成了对 τ 轻子质量更精确的测定，测量精度提高近 10 倍，对研究轻子普适性是否成立的问题起了关键作用。美国投资 10 亿美元筹建的世界最大的重离子对撞机于 1999 年建成。科学家设想进行金核-金核对撞，在两核中形成“真空”解除夸克的禁闭，观察夸克单独的自由运动状态。

21 世纪会是高能物理研究更活跃的年代。将最小的微观和最大的宏观的研究结合起来，揭开类星体和暗物质的奥秘并弄清楚 CP(电荷共轭与空间反演联合变换)不对称原理，物理科学必定会出现一个大的飞跃。

3. 团簇和纳米科学

在微观的原子、分子和宏观的凝聚态物质之间正在形成一个新的研究领域，这就是团簇和纳米科学。团簇是由几个乃至几千个原子、分子或离子通过物理或化学的结合力组成的相对稳定的聚集体，其空间尺寸约在纳米之内。天然存在或人工制备的纳米材料的尺寸范围约在 1~100 nm，它包含的原子数可达 10^5 个。

① 1 TeV = 10^3 GeV = 10^6 MeV = 10^{12} eV

以团簇为基本结构单元可以合成出具有纳米结构的新型材料和器件

在团簇和纳米这个层次上，物质明显的表现出与微观和宏观体系不同的特性，它们显示出与尺寸密切相关的相关性。人们已经发现它们奇异的电、磁、热、光及力学和化学的性质和现象。20世纪80年代人们发现使用激光加热石墨蒸发，可在甲苯中形成碳的团簇 C_{60} ，通过质谱仪检测发现 C_{60} 具有高度稳定的新奇结构。它由60个C原子组成封闭的足球形（幻数团簇），表现了包括超导性能在内的奇异的物理特性，这个发现引起科学界的轰动。现在一系列新的幻数团簇都已发现。团簇和纳米体系的复杂系统成为包括凝聚态物理、原子物理、量子化学、材料科学等多种研究的交叉点。

团簇和纳米体系的理论和实验技术的研究，特别是基于它们的新材料的设计和应用将是21世纪物理和材料科学研究的重要方面。扫描隧穿显微镜的应用及原子操作技术可能在原子水平上研究单个原子、原子团簇和团簇组装。改变团簇的组分结构，可人工组成具有新特性的纳米材料和器件，这些在许多高新科技领域中都将会有重要的应用。

4. 光子学和光子技术

光子学是正在发展的一门新的学科。继20世纪电子学发展之后，以光子作为信息载体的科学将会成为信息科学中的另一个重要支柱。光子相对于电子在信息容量、传播速率、存储能力以及互连和并行处理能力上都显示出它特有的优势。光子学发展会得益于电子学技术并必将经历光子电子结合的光电子学发展阶段。

光子学前沿研究体现了光子学物理基础与光子技术发展的结合。比如以腔量子电动力学效应为基础的微激光器的研究。根据量子电动力学原理，在“真空”中仍然存在电磁场起伏零点能，自发辐射是由这个真空电磁场起伏零点能与原子耦合作用引起的原子“受激”发射，控制真空电磁场起伏零点能就可以控制原子自发发射。对这种发光过程进行控制的新概念根本改变了激光器的工作原理，激光的增益长度尺寸缩小到 10^{-7} m 使得在 1 cm^2 芯片上制作100万个微激光器成为可能。其他的前沿研究还有弱光学的非线性、光子学集成、高密度光存储、光的压缩态在光子学中的应用等。

光子学和光子技术研究的成果将会在21世纪的通信和计算机技术中产生变革性的结果。另外光子作为能量载体的应用也受到足够的重视，它对能源科学和生命科学均有重要的意义。

5. 核聚变 未来的能源

人们从20世纪40年代开始探索核聚变能源的利用。核聚变能是最理想的能源。使用氘(D)和氚(T)作原料。从海水提取。取之不尽。而且清洁干净。

得到聚变能最基本的条件是反应温度达到亿度的高温和等离子体在高密度

下有足够的反应持续时间，它就是著名的劳逊判据， $nt \geq 10^{14} \text{ s/m}^3$ 其中 n 是核子的数密度， t 是聚变反应持续时间。目前主要使用磁约束核聚变（又称托卡马克）和激光惯性约束核聚变这两种可行的人工控制核聚变的方法，但是它们都有很高的技术难度，需要很大的实验装置及投入很大的财力。现在这两种方法都可使约束等离子体达到 10^8 K 的高温，在 21 世纪中期之前可望建造核聚变电站。我国在人工控制核聚变的研究上也投入了很大的力量，建立了“中国环流一号”和 HT-7 托卡马克装置以及“神光”激光惯性约束核聚变的实验装置，并已做出了许多研究成果。

激光惯性约束聚变使用高功率激光器瞬间辐照靶小球产生高温高压等离子体。它的作用时间很短，可以模拟核爆。在基础研究方面它还可以做高温高压实验，以及天体物理研究和激光原子物理学方面的前沿研究

参考资料

1. 路甬祥. 科学技术的时代特征和发展展望. 科学, 1998(3):3
2. 李政道. 展望 21 世纪科学发展. 科学, 1999(1):17
3. 沈致远. 新世纪曙光在东方 试论科学方法之兴替. 科学, 1998(2):8
4. 中国科学院院士谈 21 世纪科学技术. 上海：上海三联书店, 1995
5. 王志勤. 自然科学与技术概论北京：中共中央党校出版社, 1993
6. 李继宗. 现代科学技术概论上海：复旦大学出版社, 1994
7. 张焘. 科学前沿与未来. 北京：科学出版社, 1995
8. 现代物理学知识（增刊）, 1996

（谢行恕）

第二章 综合与现代实验

实验 2.1 非线性光学系列实验

当介质中有电场时，介质会发生极化，此极化一般可表示为

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots = P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)} + \dots$$

其中 $P^{(1)}$ 、 $P^{(2)}$ 、 $P^{(3)}$ 分别称为线性极化、二次极化、三次极化，相应项的系数称为线性极化系数、二次极化系数、三次极化系数，更高次项的依次类推，二次以上的项统称为非线性项。非线性项系数比线性项系数低 8 个数量级，故在激光器诞生之前，观察到的现象主要是线性光学效应，如几何光学、物理光学等。强相干的激光出现后，由于光强特别大，上式中的非线性项同线性项相比，不能忽略。这时物质对光场的响应与光的强度的关系是非线性的，即这时观察到的现象为非线性光学效应。

非线性光学是物理学领域内一门新兴的光学分支学科，它主要研究强光辐射与物质的相互作用过程中出现的各种新现象与新效应，研究这些新现象与新效应的产生原因和过程的规律性，探索它们在当前或今后科学技术发展中的各种可能应用等。

非线性光学的基本研究课题，包括以下几个主要的方面：

1. 强光辐射的相干变频和相干混频

单一频率的强光与特定物质作用时，会产生新频率的光辐射，如光学二次谐波和光学三次谐波，此外多种不同频率的强光辐射与特定的物质相互作用也会产生新的组合频率的光辐射。

2. 强光辐射引起的折射率变化及其对入射光的反作用

强光入射时，很多物质的折射率会发生与入射光强成正比的感应变化，折射率的这种感应变化反过来又影响入射光场的振幅与相位的分布，从而导致入射光束的自聚焦、自散焦、自相位调制等。在多波同时入射的情况下，折射率的这种感应变化还可产生全息光栅效应，从而可实现对入射光束波面畸变的自补偿，即光学相位共轭效应。利用折射率的这种感应变化，还可实现对入射光信号的各种控制作用，这就是光学双稳态效应。

3. 强光作用引起的受激散射

强光入射时，可引起某些物质微观运动状态或者宏观运动状态的各种感应变化，从而可对入射光产生各种形式的散射作用，并且在一定的条件下，散射光具有强相干辐射的特点。这些过程，统称为强光受激散射过程，它包括了多种不同形态的受激散射效应

4. 强光光谱学效应

在一定频率的强光作用下，具有特定能级结构和跃迁性质的介质可呈现出系列新的光谱学响应特性，从而为人们建立新型光谱学技术奠定了基础。这些新型光谱技术，能从根本上排除各种传统光谱技术所受到的种种限制而具有高光谱分辨率、高时间分辨率、高空间分辨率和省却传统光谱分光仪器而进行同步光谱扫描记录等特点。

5. 瞬态相干光学效应

主要是指脉冲强光辐射场与特定的共振介质在比较短的时间范围内发生的瞬态感应电极化过程，以及这些过程对入射光场产生的反作用。其中包括自感应透明、光子回波、光学章动、自由感应衰减和超荧光效应等。

6. 其他强光光学效应的研究

主要包括多光子离解与电离、光学击穿、多光子光电效应、强光光压、光悬浮与光推进效应、强光加速粒子效应、光学孤立子以及其他各种处于边缘学科的强光光学效应等。

非线性光学是一门十分活跃且成果显著的新兴分支学科。激光技术的发展，使得强激光与物质相互作用中蕴藏着的巨大潜力得到越来越充分的发挥，它的发展向人们提供了许多新的方法和新的技术，为今后技术应用打下了物理基础，大大促进和发展了人们对于光与物质相互作用过程的了解和对一些基本物理问题的认识。

人们可分别通过光学倍频、混频以及受激散射等强光光学效应，在新的频率处产生强相干光辐射。它们在本质上与入射激光的性能相同，因此开辟了产生强光辐射的新的物理机制。人们现在正利用这种途径来填补各类激光器件发射波长之间的空白光谱区域，并努力向更长的波段（远红外至亚毫米波）以及更短的波段（真空紫外、软 X 射线至 X 射线与 γ 射线）开拓。

非线性光学能比较及时地向人们提供许多实际可用的新方法与新技术。例如，非线性饱和吸收现象可用于激光器中的染料调 Q 开关和被动锁模，还可用于激光稳频及饱和吸收光谱中。双光子吸收现象可用于超短光脉冲的测量（双光子荧光法）还可用于消除多普勒加宽的光谱技术中。强光击穿用于触发快速火花隙电开关，多光子负电导效应用于快速导体电开关，光悬浮用于激光聚变微靶球定位，光学相位共轭用于波面畸变补偿，强光感应折射率变化用于实时全息再现

以及制造光学双稳态元件等。

本实验主要是通过光学倍频、激光倍频技术的基本原理，测量激光倍频效率、相位匹配角，了解影响激光倍频效率的物理量并测量其与倍频效率的关系；通过光学双稳态实验，希望同学们了解光学双稳态的基本原理及实现方法，观察双稳态实现的过程及所需的条件。

实验原理

1. 光学倍频原理

激光倍频技术是将频率为 ω 的光，通过晶体中的非线性作用，产生频率为 2ω 的光的技术。

当光与物质相互作用时，物质中的原子会因感应而产生电偶极矩。单位体积内的感应电偶极矩叠加起来，便形成了电极化强度矢量。电极化强度产生的极化场发射出次级电磁辐射当外加光场的电场强度比物质原子的内场强小得多时，物质感生的电极化强度与外界电场强度成正比，即

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (1)$$

式中 χ 为电极化率，与外界电场 E 无关。如果 E 以频率 ω 作简谐变化，则 P 及其产生的次级电磁辐射也以同样的频率 ω 作简谐变化。次级辐射与入射光波相互叠加的结果，决定物质对入射光场的反射、折射和散射。由于次级辐射和入射光波的频率相同，所以光波的单色性不会改变。激光没有出现之前，当有几种不同频率的光波同时与该物质作用时，各种频率的光都线性独立地反射、折射和散射，满足波的叠加原理，不会产生新的频率。研究这种现象的光学称为线性光学。

当外界光场的电场强度足够大时（如激光），物质对光场的响应与场强具有非线性关系：

$$P = \alpha E + \beta E^2 + \gamma E^3 + \dots \quad (2)$$

式中 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 均为与物质有关的系数，且逐次减小，它们的数量级之比为

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\gamma}{\beta} = \dots = \frac{1}{E_{\text{原子}}} \quad (3)$$

其中 $E_{\text{原子}}$ 为原子中的电场，其量级为 10^8 V/cm 。当 $E \ll E_{\text{原子}}$ 时，上式中的非线性项 E^2, E^3 等均是少量，可忽略。如果 E 很大，非线性项就不能忽略。

考虑电场的平方项：

$$E = E_0 \cos \omega t$$

$$P^{(2)} = \beta E^2 = \beta E_0^2 \cos^2 \omega t = \beta \frac{E_0^2}{2} (1 + \cos 2\omega t) \quad (4)$$

这里出现了直流项和二倍频项 $\cos 2\omega t$ ，直流项称为光学整流当激光以一定角度入射到倍频晶体时，在晶体后产生倍频光，产生倍频光的入射角称为匹配角。

倍频光的转换效率为倍率光与基频光的光强比，通过非线性光学理论可以证明：

$$\eta = \frac{I_{2\omega}}{I_\omega} \propto \beta L^2 I_\omega \frac{\sin^2(\Delta k l / 2)}{(\Delta k l / 2)^2} \quad (5)$$

式中 L 为晶体长度， I_ω 、 $I_{2\omega}$ 分别为入射的基频光、输出的倍频光的光强 $\Delta k = k_\omega - 2k_{2\omega}$ ， k_ω 、 $k_{2\omega}$ 分别为基频光和倍频光的传播矢量。

从上式中可以看出，相位匹配因子 $F = \sin^2(\Delta k l / 2) / (\Delta k l / 2)^2$ 对倍频效率影响很大。当 $\Delta k = 0$ 时， $F = 1$ 在其他条件相同的情况下倍频效率最高， $\Delta k = 0$ 即为相位匹配条件。相位匹配条件是非线性光学中一个非常重要的概念。在倍频技术中，相位匹配是有效地产生倍频光的关键。由 Δk 的关系式可以得到

$$\Delta k = |k_{2\omega} - 2k_\omega| = 2\omega \left(\frac{1}{v_{2\omega}} - \frac{1}{v_\omega} \right) = \frac{2\omega}{c} (n_{2\omega} - n_\omega) \quad (6)$$

式中 $v_{2\omega}$ 、 v_ω 分别为倍频光、基频光在晶体内的传播速度。很显然，如果满足相位匹配条件 $v_{2\omega} = v_\omega$ ，则倍频光和基频光在晶体中的折射率相等。其物理意义是：入射基频光在晶体中沿途各点所激发的倍频光传到输出面时，有相同的相位，因而沿途各点产生的倍频光在传输方向上相干叠加增强

在正常色散的情况下，倍频光的折射率 $n_{2\omega}$ 总是大于基频光的折射率 n_ω 所以相位失配。双折射晶体中 o 光和 e 光的折射率不同，且 e 光的折射率随着其传播方向与光轴间夹角的变化而变化，这样可以利用双折射晶体中 o 光、e 光间的折射率差来补偿介质对不同波长光的正常色散，实现相位匹配如图 2.1-1 所示。

图中画出了晶体中基频光和倍频光的两种不同偏振态的折射率面，虚线球面为倍频光折射率面，实线球面为基频光折

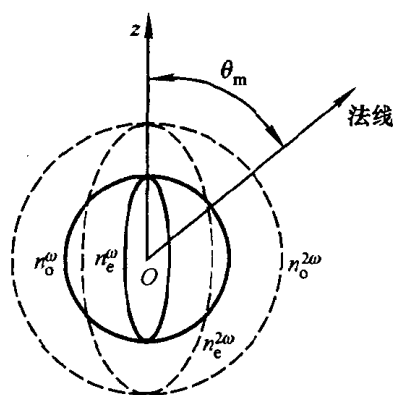


图 2.1-1 负单轴晶体折射率球面

射率面。球面为 o 光折射率面 椭球面为 e 光折射率面，z 轴为光轴。折射率面的定义为：从球心引出的每一条矢径到达面上某点长度，表示晶体以此矢径为波法

线方向的光波折射率的大小，实现相位匹配条件的方法之一是寻找实面与虚面的交点位置，从而找到通过此交点的矢径与光轴的夹角从图中看到，基频光中 o 光的折射率可以和倍频光中 e 光的折射率相等，所以当光波沿着与光轴成 θ_m 角的方向传播时，即可实现相位匹配。 θ_m 叫做相位匹配角， θ_m 角可由下式获得：

$$\sin^2 \theta_m = \frac{(n_o^\omega)^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}}{(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}} \quad (7)$$

式中 n_o^ω 、 $n_o^{2\omega}$ 、 $n_e^{2\omega}$ 可以查表得到，表 2.1-1 给出了几种常见的值。

表 2.1-1 几种常见的相位匹配角

晶 体	$\lambda/\mu\text{m}$	n_o	n_e	θ_m
铌酸锂	1.06	2.231	2.152	87°
	0.53	2.230	2.230	
碘酸锂	1.06	1.860	1.719	29°30′
	0.53	1.901	1.750	
KD*P	1.06	1.495	1.455	30°57′
	0.53	1.507	1.467	

应该注意的是，相位匹配角是指在晶体中基频光对于晶体光轴 z 方向的夹角，而不是与入射面法线的夹角。为了减少反射损失和便于调节，实验中大都让基频光正入射晶体表面。故在加工倍频晶体时，需按一定方向切割，使晶体法线方向和光轴方向成 θ_m 。

2. 光学双稳态原理

光学双稳态器件是光计算机最重要的组成部分。1969 年 Szöke 建议在腔内放入非线性介质以实现光学双稳态。1975 年，Gibbs 等用钠蒸气作为非线性色散介质首次实现了光学双稳态。1976 年，Lugitao 建立了光学双稳态的半经典理论。1979 年，Smith 和 Gibbs 分别用 InSb 和 GaAs 实现了半导体的光学双稳态。后来人们又制成了量子阱的 GaAs 光学双稳态器件，同时还制成了一些光学逻辑器件。

双稳态器件就是输出与输入信号呈 S 型曲线的器件，对于一定的输入信号，输出信号可以有两个稳定状态光学双稳态，则是用光学方法实现双稳态，即输出与输入的光信号呈 S 形曲线如图 2.1-2 所示，其中虚线部分不稳定。当输入信号较弱时输出很弱“关”的状态。当输入信号逐渐增强到一定数值时，输出光强发生跳跃式的增强“开”的状态。反之，当输入光强从强到弱逐渐减弱到一定数值时，输出光强则从上面的分支跳到下面的分支。在图中的 S 曲线的中间

部分, 对于一个输入信号, 有两个稳定的输出值. 究竟输出光信号在哪个状态, 与输入信号变化过程的方向有关.

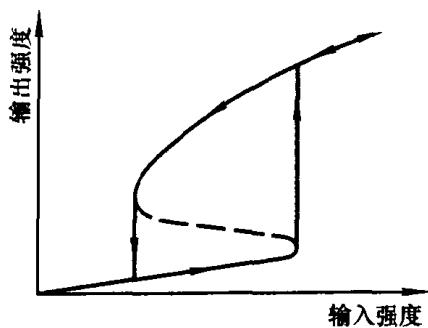


图 2.1-2 双稳态示意图

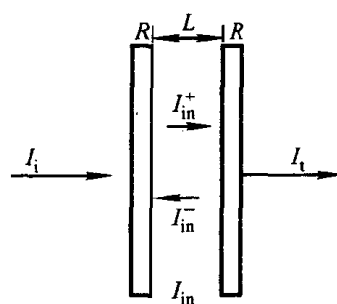


图 2.1-3 非线性光学器件光强

如图 2.1-3 所示, 图中一个干涉仪内充满非线性折射率的介质, 其折射率 n_r 为 $(n_0 + n_2 I)$. 这种介质称为克尔介质, n_2 即非线性系数. 干涉仪的几何长度是 L . 干涉仪的谐振条件为

$$n_r L = (n_0 + n_2 I) L = \frac{1}{2} m \lambda_r$$

其中 n_0 是线性折射率, $n_2 I$ 非线性折射率, m 是一个整数, I 是腔内的作用于非线性介质的光强. 假定 $I=0$ 时激光波长 λ_L 大于谐振波长 λ_r , λ_r 是光强为零时的谐振波长. 如图 2.1-4 所示, 若 $n_2 > 0$ 当入射光强增强时腔内光强 I 也增强, 使 n_r 增大. 由于 $n_r L$ 增长使 λ_r 增长而趋向共振波长 λ_L . 这样图 2.1-4(a) 中的透射峰向 λ_L 移动, 腔内光强变强, 腔内光强越强, 透射峰向 λ_L 移动得越快. 这是正反馈过程. 当入射光强 I_{in} 增强到一定的数值 I_M 时, 输出光强增强的斜率变为无穷大. 输出光强发生跳跃, 即从下分支跳到上分支. 这时若输入光强

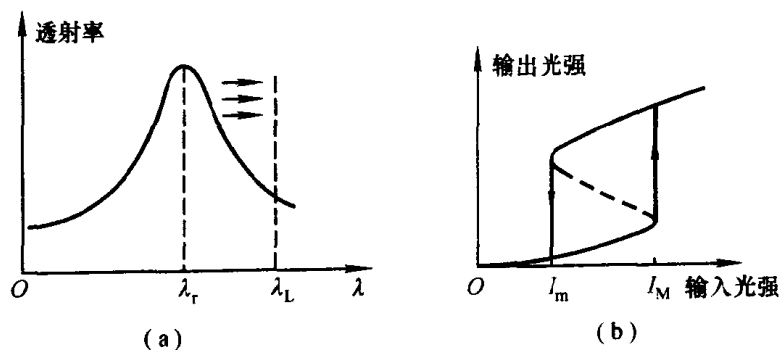


图 2.1-4 光学双稳态原理示意图

继续增强 λ_L 又偏离谐振 则 I_{out} 随 I_{in} 的变化就变慢了, 即在上分支有负反馈过程.

当输入光强从强到弱变化时, 输出略有降低. 当 I_{in} 到 I_M 时, 由于在该点正对应谐振条件, 腔内光强是强的, 所以绝不会在 I_M 点发生向下的跳跃. 当 I_{in} 从 I_M 进一步降低时, I_{in} 越小, λ_L 越偏离谐振. λ_L 越偏离谐振, 腔内光强 I 也就越弱. 当 $I_{in} = I_m$ 时, I_{out} 随 I_{in} 降低的速率 (斜率) 为负无穷大, I_{out} 便从上分支跳到下面的分支.

在双稳态曲线中, I_M 和 I_m 是开关点. 在 I_M 和 I_m 之间, 对应输入光强的一个数值, 则输出光强有两个态, 故称之为双稳态. 在 S 形曲线的虚线部分, I_{out} 随 I_{in} 增长的斜率是负的, 是不稳定的. 这个虚线部分对应于半导体隧道二极管的伏安曲线的负阻部分 (也是不稳定的). 由以上分析可知, 产生光学双稳态的两个条件是非线性 + 正反馈.

利用光学双稳态的特性, 可实现光学开关、“门”电路、光学放大和光学限幅器等.

实验内容

1. 光学倍频实验

利用 YAG 激光器中波长为 1 064 nm 和 1 320 nm 的输出光测量倍频效率及输入能量与倍频效率的关系, 测量相位匹配角, 实验装置如图 2.1-5 所示.

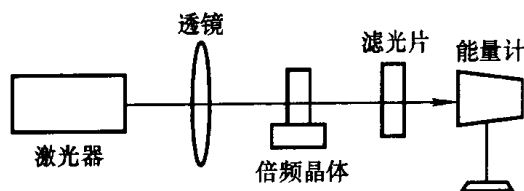


图 2.1-5 激光倍频装置图

在激光器实验中常用 He-Ne 激光调整光路. 调整光路时, 将一倍频晶体 (如 LiNbO_3) 固定在一带有角度刻度盘的五维调整架上, 调整晶体与光路准直、绕光路轴旋转和绕垂直轴旋转.

观察倍频光输出的方法是, 将晶体放在其前一透镜的焦点处, 调整支架, 使晶体与光路准直, 基频光在晶体内呈 \circ 光传播, 用示波器监测激光器的脉冲输出能量和脉冲波形.

测量倍频效率的方法是, 用能量计测量激光器的输出能量, 即基频光的能量. 然后利用一滤光片仅让倍频光透过, 用能量计测量倍频光的能量. 并利用公

式(5) 计算其倍频效率.

若移去聚焦透镜,再测量其倍频效率,可测量不同输入能量下,同一倍频晶体的效率.

试分析在相同的输出能量下,有透镜聚焦与无透镜聚焦时,同一倍频晶体的倍频效率有无区别,为什么?透镜的作用是什么?

测量相位匹配角的方法是,在同一输入能量下,在匹配角附近某一角度 θ 范围内,测量不同角度下倍频光的能量,作出角度与倍频光的效率 η 的关系图.从图中找出效率最大处的相位角 θ 即为最佳匹配角.用另一不同长度的同种倍频晶体,测量同一输入能量下的倍频效率,分析倍频效率与晶体长度间的关系.

试对 YAG 激光器中两组波长的测量结果进行比较,分析引起两者差异的原因.

2. 光学双稳态实验

图 2.1-6 是光学双稳态实验装置图.实验中采用 He-Ne 激光器作为入射光源,其出射波长为 632.8 nm,输出电流一般大于 15 mW.图中 P_2 和 P_3 为一对固定的正交偏振器,偏振器 P_1 和 P_4 分别与 P_2 和 P_3 组成可衰减器,转动偏振器可调整输入和输出光强. F_1 和 F_2 是透射率为 80% 的分束镜. F_1 将入射光分出一部分供探测器 T_1 测其光强. F_2 从出射光分出一部分,供光敏电阻转换成电信号,反馈控制晶体电极上的电压.探测器 T_2 用以测量出射光强.

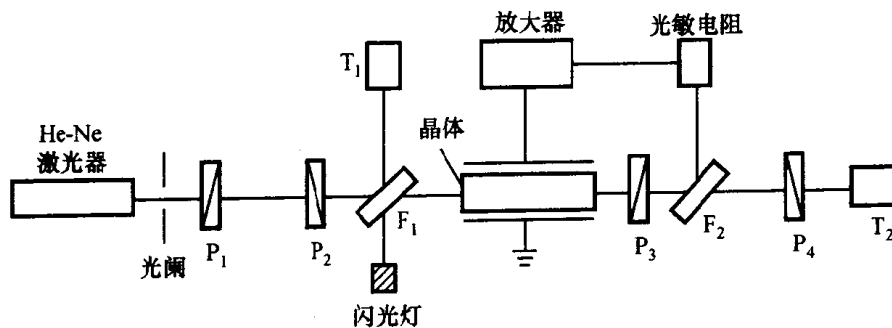


图 2.1-6 光学双稳态实验装置图

先旋转衰减器,使入射到 T_1 上的光强为零,减小衰减,使入射光强逐渐增加,当入射光强最大时,逐渐增加衰减直到光强为零.测量出输入光强和输出光强,并作出输入光强与输出光强的关系曲线.

将 T_1 和 T_2 探测器的输出分别接入示波器及 $x-y$ 记录仪的 x 和 y 输入端,调节适当,观察波形和曲线.

思考题

1. 用其他什么方法也可以将基频光和倍频光分开？
2. 如果激光器输出不稳定，对测量结果有何影响，应如何改进实验，测量倍频效率？
3. 设计一个能实现双稳态的光路和电路。

参考资料

1. 李福利 . 高等激光物理学 . 合肥 : 中国科技大学出版社 ,1992
2. 赫光生等 . 强光光学浅说 . 北京 科学出版社 ,1987
3. 黄植文等 . 激光实验 . 北京 : 北京大学出版社 ,1996

(张增明)

实验 2.2 激光系列实验

激光即 Laser(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 原意是受激辐射光放大所产生的光。它是从微波激射器 (Maser) 发展而来的。Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 意为通过辐射的受激发射进行微波放大。1954 年初，美国的汤斯 C. H. Townes 等人 制成了世界上第一个微波激射器。1958 年，汤斯和肖洛 A. L. Schawlow 将 Maser 原理推广到光学波段。1960 年 7 月 美国的梅曼(T. H. Maiman) 成功地做出了世界第一台激光器——红宝石激光器。此后，激光的发展突飞猛进，在激光理论、激光技术、激光应用等各个方面都取得了巨大的进展。激光技术的发展，还带动了一些新兴学科，如全息光学、非线性光学、傅里叶光学、激光光谱学、光化学等的迅速发展同时激光技术的出现和发展，也标志着人类对光频相干电磁辐射的手段、控制能力及其与物质相互作用规律性的认识，都达到了一个新的更高级的阶段。

和源于自发辐射的普通光源相比，源于受激辐射的激光有其一系列重要的特性：

其一，单色性和时间相干性。激光是谱线宽度极窄的单色光。常用的 He - Ne 激光器发射波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 的激光， $\Delta\lambda$ 可达 10^{-8}nm ，比普通光源中单色性最好的氪灯红光的宽度还窄 10^5 倍。

其二 空间相干性好。从激光器输出的是相干光束，任一时刻的波前上的各点是同相的。激光同普通光源相比，空间相干性极好

其三。方向性好。激光一般是沿谐振腔轴线输出的，其平行性较好。发散角一

般小于 10^{-3} rad. 良好的方向性使得激光具有高强度, 发射功率相同时, 激光比普通光源发光的空间范围小约 10^6 倍, 从而光束强度大 10^6 倍. 因发散角小 被激光照射的物体表面有很高的亮度.

激光器由工作物质、谐振腔、泵浦源几部分组成. 按产生激光的工作物质不同可将激光器分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器、液体激光器、化学激光器、自由电子激光器等. 其中气体激光器是以气体或金属蒸气为发光粒子, 常用的有 He-Ne 激光器、CO₂ 激光器、氩离子激光器等. 固体激光器是将产生激光的粒子掺于固体基质中. 工作物质的物理、化学性能主要取决于基质材料, 而它的光谱特性主要由发光粒子的能级结构决定. 固体工作物质中, 发光粒子都是金属离子, 称为激活离子. 最常用的固体激光器有 Nd³⁺:YAG 激光器、钕玻璃激光器、钛宝石激光器等. 半导体激光器是以半导体为工作物质, 常用的材料是 GaAs (砷化镓)、CdS (硫化镉)、PbSnTe (碲锡铅) 等. 化学激光器是基于化学反应来建立粒子数反转的. 自由电子激光器不是利用原子或分子受激辐射, 而是利用电子运动的动能转换为激光辐射的.

按工作方式分, 激光器可分为连续工作和脉冲工作两大类.

按激光技术分, 激光器可分为静态脉冲激光器、调 Q 激光器、锁模激光器、倍频激光器和可调谐激光器等.

由于激光的特点和激光技术的飞速发展, 激光在各行各业已经得到了广泛的应用. 利用激光的单色性制成的激光测距仪, 测量地球至月球距离, 误差仅为几毫米. 由于 CO₂ 激光器、钕玻璃激光器等易实现大功率连续输出, 可达到 10^{10} W 常用于材料加工、冲击强化 (利用强激光作用在吸收介质上产生冲击波从而实现对材料的冲击强化处理)、激光武器 (如利用强激光拦截快速飞行的导弹等)、激光定向引雷 (利用强激光与空气的作用, 在地面天线塔顶与雷云间形成一几百米长的等离子通道, 从而把雷电安全引入地面. 可用于大型机房、机场、油库等重要场所) 等方面. 激光具有高度相干性, 可作为光纤通信中的光源, 从而大大提高了通信容量. 如能利用激光与光纤的非线性作用实现孤立子作为通信光源的话, 不仅能提高通信速度, 而且可实现无中继通信. 目前激光在医疗卫生上也应用广泛. 如使用激光刀, 在手术中可实现无痛感、无流血手术, 利用激光可在心脏上钻孔, 实现人造血管, 可挽救、延长心肌梗塞病人的生命.

半导体激光器因其体积小 结构简单常用于远距离教鞭、激光唱机、光盘、数显等领域. 总之, 激光在我们的日常生活中正越来越得到广泛的应用.

本实验以 Nd³⁺:YAG 激光器为研究对象, 了解固体激光器的原理、学会调整光路、调节激光器、测量激光器的静态基本参数、调节 Q 开关激光器并测量其相关参数及调节锁模激光器的光路并测量其基本参数, 从而对激光原理及其激光技术有一定的了解.

实验原理

光与物质的相互作用可以归结为光与原子的相互作用，这种相互作用，主要有三种过程：吸收、自发辐射和受激辐射。

如果有一个原子，开始时处于基态 [图 2.2-1(a)]，在没有外来光子接近它时，它将保持不变。如果一个能量为 $h\nu_{21}$ 的光子接近这个原子，则它可能吸收这个光子，处于激发态 E_2 [图 2.2-1(b、c)]。图 2.2-1 表示原子对光子的吸收过程。

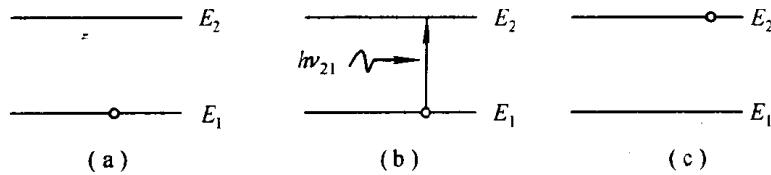


图 2.2-1 光与物质作用的吸收过程

在此过程中不是所有的光子都能被原子吸收，只有当光子的能量正好等于原子的能级间隔 $E_2 - E_1$ 时才能被吸收。图 2.2-2 表示了光与原子相互作用的自发辐射过程。激发态的寿命很短，在不受外界影响时，它们会自发地返回到基态，从而放出光子。自发辐射过程与外界作用无关，由于各个原子的辐射都是自发地、独立地进行的，因而不同原子发出来的光子的发射方向和初相位是不相同的。图 2.2-3 表示受激辐射过程。处于激发态的原子，在外来光子的影响下，会从高能态向低能态跃迁，并把两个状态间的能量差以辐射光子的形式发射出去。只有当外来光子的能量正好为激发态与基态的能级差时，才能引起受激辐射，且受激辐射发出的光子与外来光子的频率、发射方向、偏振态和相位等完全相同。激光的产生主要是依赖于受激辐射过程。

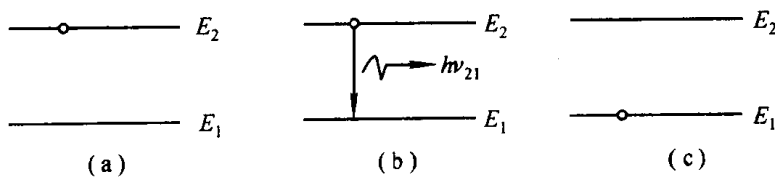


图 2.2-2 光与物质作用的自发辐射过程

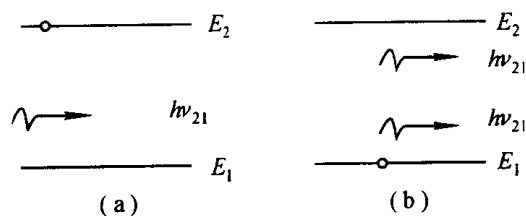


图 2.2-3 光与物质作用的受激辐射过程

激光器主要由三个部分组成:工作物质、谐振腔、泵浦源,如图 2.2-4 所示,其中工作物质主要是提供粒子数反转常用的有三能级系统和四能级系统。

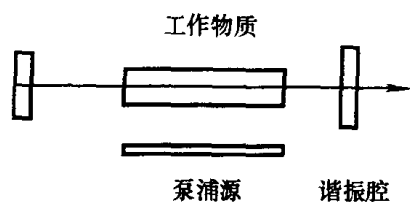


图 2.2-4 激光器示意图

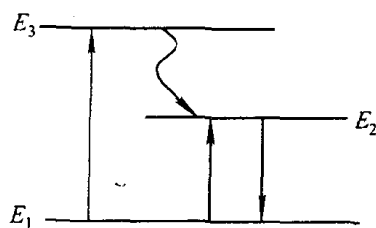


图 2.2-5 三能级系统示意图

图 2.2-5 为三能级系统示意图。泵浦过程使粒子从基态 E_1 抽运到激发态 E_3 , E_3 上的粒子通过无辐射跃迁(该过程中粒子从高能级跃迁到低能级时能量转变为热能或晶格振动能但不辐射光子)迅速转移到亚稳态 E_2 上, E_2 是一个寿命较长的能级,这样处于 E_2 上的粒子不断积累, E_1 上的粒子又由于抽运过程而减少,从而实现 E_2 与 E_1 两能级间的粒子数反转。

四能级系统如图 2.2-6 所示。泵浦过程将粒子从 E_1 抽运到 E_4 , E_4 上的粒子通过无辐射跃迁很快转移到 E_3 , E_3 也是一个寿命较长的能级, E_2 上通常没有粒子,这样就实现了 E_3 与 E_2 间的粒子数反转。

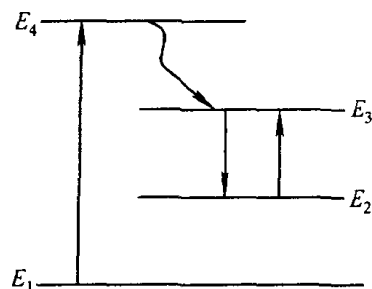


图 2.2-6 四能级系统示意图

对三能级、四能级系统的比较发现,三能级系统中,下能级 E_1 是基态,通常粒子几乎全部处于该能级,必须将一半以上的粒子激发到高能级才能实现粒子数反转,因此四能级系统优于三能级系统。

实现了粒子数反转的工作物质还不能产生激光,必须有提供光学正反馈的谐振腔才能产生激光。处于激发态的粒子由于不稳定性而自发辐射到基态,自发辐射产生的光子各个方向都有,其中偏离轴向的光子很快就逸出腔外。只有沿轴向的光子,部分通过输出镜透射输出,部分被反射回工作物质,在两个反射镜间往返多次被放大,形成受激辐射的光放大即产生激光。

实验中常用的固体激光器为 YAG 激光器。YAG 激光器是以 YAG 晶体作为工作物质的一种激光器, YAG 也称掺钕钇铝石榴石晶体。它是将三价稀土离子 Nd^{3+} 掺入钇铝石榴石晶体而成。钇铝石榴石的化学式为 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 钕离子的浓度一般为 $1.38 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。YAG 为四能级系统, YAG 中 Nd^{3+} 能级图如图 2.2-7 所示。