



激光技术

国际物理奥赛 IdPhO2020

理论第三题

刘 军¹ 宋 峰²

(1. 石家庄二中 051430; 2. 南开大学物理科学学院 300071)

解题时,可使用下列物理常数的值:

真空中的光速 $c = 3.00 \cdot 10^8$ m/s,

约化普朗克常数 $\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34}$ J·s,

库仑定律中的常数和介电常数

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2},$$

基本电荷电量 $e = 1.60 \cdot 10^{-19}$ C。

A 部分: 经典超辐射模型

激光器是相干光辐射光源。大量原子在外部作用(泵浦)下跃迁到激发态,进而发射出具有相同相位和偏振的光子,激光辐射就形成了。激光辐射理论是以量子力学为基础的,但是这种现象的某些方面可以借助经典电动力学来理解。

首先考虑单个原子发射光子的情况。根据经典电动力学,一个原子可以看作是一个电偶极发射体。在这个模型中,一个电偶极子与原子相关联,原子由一个静止的带正电荷 $+q$ 的原子核、核外带负电荷 $-q$ 的电子组成,电子绕核做简谐振动(负电荷位于电子云的电荷分布中心)。

原子的偶极矩根据规律 $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_m \cos(\omega t + \varphi)$ 变化。循环振荡频率 ω 与发射光子的能量 E ,由普朗克关系 $E = \hbar\omega$ 给出。这里,光子的频率 ω 指角频率。一个具有可变偶极矩的经典系统的辐射功率 $P(t)$ 由公式(1)决定。

$$P = \frac{2k}{3c^2} \left\langle \left(\frac{d^2 \mathbf{p}}{dt^2} \right)^2 \right\rangle, \quad (1)$$

其中,角括号代表一个振荡周期的平均值。

A.1 原子发出的波长为 $\lambda_0 = 300$ nm。利用经典模型,估计原子的发射时间 τ (即原子辐射一个光子能量所用的时间)。这个时间与原子辐射一个光子的特征时间在数量级上吻合。所有的辐射都是由距离原子核约 $a_0 = 0.1$ nm 的一个电子产生的。请用物理常量 λ_0 和 a_0 来表示你的答案。

假设在一定体积内, N 个原子通过短时间泵浦的作用转变为激发态。已知一个原子在特征时间 τ 内发射一个角频率为 ω 的光子。

A.2 请根据自发辐射模型,即不同原子的偶极子方向及其振荡相位是随机变化的。给出所有 N 个原子的自发电磁辐射功率 W_s , 答案用 N 、 ω 和 τ 来表示。

A.4 估算所有 N 个原子在超辐射模式下的电磁辐射功率 W_r , 即所有原子在受激状态下的原子偶极子方向及其振荡相位相同时的辐射功率。答案用 N 、 ω 和 τ 为单位来表示。

A.5 估计超辐射模式下原子系统辐射脉冲的持续时间。用与上一问相同的物理量表示你的答案。

B 部分: 非线性光学和脉冲压缩

对已经产生的激光脉冲的宽度进行压缩,可以

得到持续时间更短的脉冲。脉冲持续时间 Δt 和脉冲的光谱宽度 $\Delta\omega$ 满足不等式 $\Delta\omega\Delta t \geq 2\pi$ 。在超辐射模式下产生的激光脉冲,在给定的光谱宽度下, $\Delta t_0 \approx \frac{2\pi}{\Delta\omega_0}$ 为脉冲的最短持续时间。因此,脉冲持续时间可以分两个阶段压缩:首先,增加脉冲的光谱宽度(不改变持续时间),然后在时间上对脉冲进行压缩。

解决第一个问题的最流行方法之一是脉冲啾啾(来自英文“chirp”)。这种方法的原理是利用介质的非线性光学效应,即介质的折射率 n 对电场强度振幅 E_m 的依赖性。这种依赖关系的数学表达式为 $n = n_0 + n_2 E_m^2$,其中 n_0, n_2 是取决于物质性质的常数。非线性效应很小,例如,在光照强度 $I_1 = 10^9 \text{ W/cm}^2$ 下的石英中,折射率只增加 $n_2 E_m^2 \approx 3.2 \cdot 10^{-7}$ 。介质中的电磁波强度由公式 $I = \frac{\epsilon_0 n_0 c}{2} E_m^2$ 决定。

如图1所示,考虑一个持续时间为 Δt_0 的脉冲,有很小的光谱宽度 $\Delta\omega_0 \approx \frac{2\pi}{\Delta t_0}$,其中心频率为 ω_0 。图1显示了这种脉冲中电场强度对时间的近似依赖关系。脉冲边缘的波峰运动速度是相同的,在中央部分由于非线性的影响而减小。由于这个原因,脉冲的总持续时间没有变化,在脉冲的“后部”频率增加,而脉冲“前部”的频率减少。这种脉冲称为“啾啾”。

B.1 设两波最大值的振幅分别等于 E_{m1} 和 E_{m2} 。

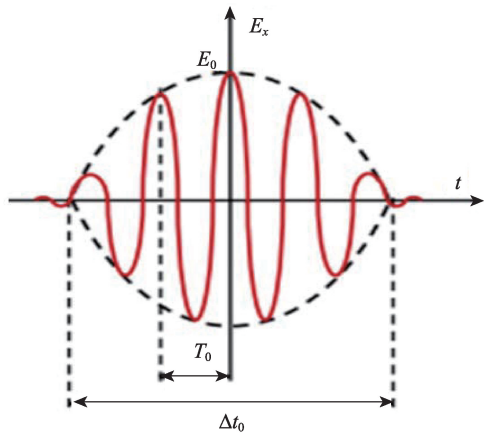


图1

求它们的传播速度之差 Δv 。用 $n_0, n_2, c, E_{m1}, E_{m2}$ 来表示你的答案。

B.2 在真空中波长为 $\lambda_0 = 300 \text{ nm}$,最大强度为 $I_0 = 3 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的光脉冲沿石英光纤的轴线传播。将波的电场强度的平方依赖于时间的包络线 $E_m^2(t)$ 看作是一条抛物线。请确定光纤的长度 s ,使得光脉冲在通过光纤期间,脉冲的光谱宽度增加 $K=200$ 倍。答案用 K, λ_0, n_2, E_m 表示,并计算出数值(单位为米,四舍五入为整数值)。

为了在时间上压缩一个啾啾脉冲,可以让它通过一个介质,在这个介质中,波的群速取决于频率。在平均频率 ω_0 附近,对所考虑的介质,波矢对频率的依赖关系可以表示为 $k(\omega) = k_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\beta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2$ 。对于所用介质取 $|\beta_2| = 20 \text{ fs}^2/\text{mm}$ 。

B.3 按上述方案进行的脉冲压缩,在该介质中要想在时间上压缩该脉冲,请确定 β_2 的符号。在答案中用“+”或“-”表示。在下面的内容中,请使用所确定的 β_2 。

B.4 从B.2发出的脉冲,其持续时间 $\Delta t_0 = 10 \text{ ps}$,初始光谱宽度 $\Delta\omega_0 \approx \frac{2\pi}{\Delta t_0}$ (加啾啾前),在上面的介质中需要传播多大距离以达到加啾啾后的最小持续时间,光谱展宽倍数为 $K=200$ 。用物理常数 $K, \Delta t_0, \beta_1$ 和 β_2 来表示你的答案,并计算出以米为单位的数值,四舍五入为整数。

B.5 足够高强度光束下,介质的非线性效应将抵消衍射导致的光束发散。估算光脉冲的最小功率 W_c 的表达式。假设通道截面上的强度分布近似均匀。求在真空中波长为 $\lambda_0 = 300 \text{ nm}$ 的脉冲,在石英中传播的该功率的数值。系数 $n_0 = 1.47$ 。

C 部分: 系外行星

在天文学中,对发光物体的观测是长时间进行的。这使得研究其发射光谱的变化成为可能。光谱测量可以探测围绕其他恒星运行的行星——“系外行星”。系外行星自己不发光,所以必须研究其

恒星的辐射光谱。如果一颗系外行星对地球的方向几乎是在其轨道平面上,那么根据系外行星在通过恒星盘的瞬间,地球上测到的恒星亮度会降低,据此就可以发现这颗系外行星。但是,如果轨道平面相对于地球的方向是倾斜的,这种方法不起作用。

C.1 提出一种方法,通过研究恒星在光学波段内的光谱,可以探测到轨道相对于视线有明显倾斜的系外行星。请说出你的方法所依据的物理现象。

C.2 让一颗质量为 m 的系外行星围绕一颗质量为 M 的恒星在半径为 R 的圆形轨道上公转,公转周期为 T ,这颗行星的轨道平面与地球方向成一个角 θ 。以你在 C.1 中提出的方法探测这颗系外行星,所需的相对频率测量精度 $\frac{\Delta\omega}{\omega}$ 为多少? 答案用基本常数 R 、 T 、 θ 、 m 和 M 来表达。

C.3 设系外行星和其他行星的质量分别等于地球和太阳的质量,圆轨道半径与地球到太阳的距离 ($R \approx 1.5 \cdot 10^{11} \text{m}$) 相等,角度 $\theta = 60^\circ$,太阳的质量是地球质量的 33 万倍,地球绕太阳公转的周期为 1 年。求出一个整数 n ,使 10^{-n} 是你的方法所要求的相对频率精度。使用超短(飞秒)激光脉冲,在光波段(10^{15}Hz)频率测量精度约为 10 Hz。这个精度是否足以确认发现一颗系外行星?

背景知识介绍

1. **激光**。1960 年世界上第一台激光器诞生,现在,激光在各行各业发挥了积极的作用,如激光焊接、切割、打孔、熔敷、电视、清洗、美容、制导、通信,等等,极大地提高了生产力,改善了人们的生活。激光的英文是 Laser,是“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的第一个字母的缩写。直译过来就是“受激辐射的光放大”,最早音译为“镭射”,后来经钱学森提议,将之译为“激光”。激光的理论基础是爱因斯坦提出的受激辐射。所谓受激辐射,是建立在量子概念基础上的。位于高能态的微观粒子(如原子、分子等),在外来辐射场的作用下,向低能态跃迁时,辐射光子。外来

辐射场的光子能量恰好等于两能级态的能量差。如图 2 所示。受激辐射发出的光子和外来光子的频率、位相、传播方向以及偏振状态全相同。再经过谐振腔放大后,输出激光。

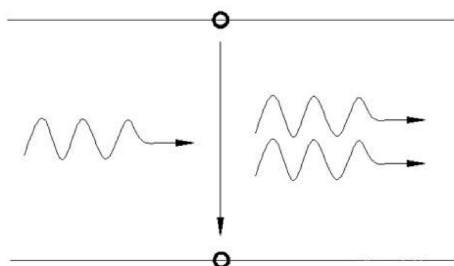


图 2

2. **啁啾(Chirp)**是指频率随时间而改变(增加或减少)的信号,如图 3 所示。其名称来源于这种信号听起来类似鸟鸣的啾声。在大自然中常常可以遇到啁啾信号,例如鸟叫声、音乐的滑音、动物发声的声音(青蛙、鲸鱼)以及人类语音,通常会使用正弦、余弦的模型去表示,而这样的模型去做叠加即可模拟出许多大自然的讯号。啁啾信号可以同时保留连续信号和脉冲的特性,因此可以被应用在雷达和声纳探测上。

一个光脉冲的啁啾,就是光的瞬时频率随时间的变化而变化的特性。脉冲在光介质(比如光纤)中传播后,由于色散和非线性效应(如由克尔效应引起的自相位调制)的影响,会具有啁啾。对于给定的光谱,当脉冲没有啁啾(无啁啾脉冲)时,则具有最小的脉冲脉宽。

3. **锁模**是常用的一种激光技术,可以产生极短时间的激光脉冲,其脉冲持续时间通常在皮秒(10^{-12} 秒)甚至飞秒(10^{-15} 秒)。该技术的理论基础是在激

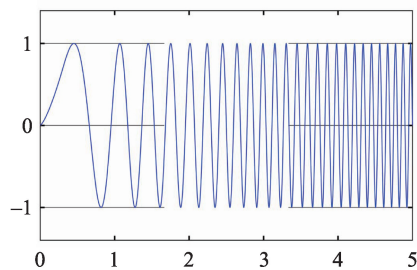


图 3

光共振腔中的不同模式间引入固定的相位关系,这样产生的激光被称为锁相激光或锁模激光。这些模式之间的干涉会使激光产生一系列的很窄的脉冲。

我国在超短脉冲技术方面位于世界前列、北京大学、上海光机所等单位,已获得了数百阿秒(10^{-18} s)的激光脉冲。

4. 非线性光学主要用来研究非线性的光学现象和理论。介质产生的极化强度决定于入射光的电场强度,其作用可用多项式展开成多阶形式。在通常的弱光条件下,高阶项因为系数很小而可以忽略,此时可近似看成一种线性关系。但是在强激光场作用下,极化强度的高阶项强度不可被忽略,非线性作用出现,从而可以实现光和光之间的相互作用。入射光的强度越高,高阶非线性效应越明显。

5. 系外行星探测法。在题目中已经介绍了一种用于勘探系外行星的方法。还有其他一些系外行星探测法。脉冲星计时法:脉冲星发射出的辐射因为自转而非常有规律,以脉冲星辐射的脉冲时间为基础,可以计算并推导出轨道参数。微重力透

镜:在一定条件下,恒星的重力场可以像透镜一样,将遥远背景恒星的光线放大。在过去的十年中,已经观察到数千次的此类现象。如果作为前景的恒星拥有行星,那么也可以探测到行星重力场贡献的透镜效应。极化测定术:来自恒星的光线应该非极化的,也就是说光波振动的方向是随机的。但是,当星光被行星的大气层反射时,光波与大气层的分子作用使它们被偏极化。通过光线中的偏振光(大约百万分之一),可以搜寻系外行星。凌日法:如果一颗行星从母恒星盘面的前方横越时,将可以观察到恒星的视觉亮度会略为下降一些,而这颗恒星变暗的数量取决于行星相对于恒星的大小。据此可以探测行星。

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专栏的有奖竞答活动,并在答案公布前将您的解答发送至 aosai@ihep.ac.cn 邮箱。对于参与并答对每期题目的前20名读者,编辑部将赠阅1年《现代物理知识》杂志。

封面说明

我国研制出世界首款人造眼球

现在全世界有上亿人视力残疾,而我国视力残疾人数就有1200万,他们中很多人生活在黑暗中,不能像正常人那样享受明媚的阳光、感受多彩的生活。而最近的一则消息给视力残疾者带来了曙光,这就是我国研制的世界上首款“人造眼球”。这款人造眼球采用高仿真技术,不但大小、形状与结构和人的真眼高度相似,在清晰度、光灵敏度 and 光强度响应速度上都胜人眼一筹。这款人造眼球之所以表现不俗,是因为研究人员在人造视网膜中采用了先进的纳米传感器

技术,这使得这款人造眼球比人的真眼表现还要出色。这个项目是由中国香港科技大学范志勇教授领导的科研团队研制的,据介绍,随着先进科学技术的不断加入,人造眼球的功效将得到进一步完善和提升,未来装上人造眼球的盲人不仅会重见光明,甚至还会有着比常人更加宽广清晰的视觉,甚至可以实现消除人眼的视觉盲点。人造眼球在医学上有着非常广泛的应用前景,具有深远的现实意义。(博文)