

面向 21 世纪课程教材

新概念物理教程

光 学

赵凯华

高等教育出版社

内容简介

《新概念物理教程》是教育部‘面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划’的研究成果,是面向 21 世纪课程教材。作为《新概念物理教程》光学卷,与已出版的力学、热学、电磁学、量子物理各卷配套,组成一个完整的基础物理课程教材体系。本卷共分光和光的传播,几何光学成像,干涉,衍射,变换光学与全息照相,偏振,光与物质的相互作用、光的量子性等七章和两个附录。

本书可作为高等学校物理类专业的教材或参考书,特别适合物理学基础人材培养基地选用。对于其他理工科专业,本书也是教师备课时很好的参考书和优秀学生的辅助读物。

序

从教学顺序上看,本书是《新概念物理教程》中的第四卷,从写作顺序上看却是最后一本。我和钟锡华在 1982 年前编写过一套《光学》教材,^① 在全国一定范围内沿用至今。该书在当时参考了国外经典性光学教材^② 的相应部分,并从北京大学前辈和同事们那里吸取了营养(如沈克琦先生的讲稿,虞福春先生关于半波损问题的论述,陈熙谋先生关于干涉条纹定域问题的讨论)。教材^① 成书时新兴的现代变换光学已有了很大发展,该书及时地把一些基本思想和内容补充进去。这一点主要归功于钟锡华先生。钟锡华先生最近出版了一本新教材,^③ 总结了他 40 余年的教学实践和科学研究的学识和经验,在波动光学方面满怀激情地写出了自己清新流畅的风格。

本书作者审视了近年来光学的最新进展,如信息光学、统计光学、非线性光学等,它们或用的数学比较多,或技术性比较强,或需要一些排在“光学”课之后的量子物理知识,不大适合在本课中太多地介绍。本书作者认为,“光学”作为一门基础课,主要把传统的光学原理讲好,并不失为一条可行的路子。本书以教材①为本,但在波动光学的章节处理上恢复了更加传统的干涉、衍射、偏振三大块的编排。在变换光学、信息光学方面侧重于基本原理、基本概念的介绍,删去了一些较深的和较技术性的内容。

赵凯华

園遊原年 愿月

① 赵凯华、钟锡华,《光学》上、下册,北京 北京大学出版社,1985年。

② 云翳爰基译 匀援译 泽藻 云波有基藻译 楚犹译 酩酊醉舞至夜舞灵缘媛
酩酊刺 耘宰译 孕望基译 楚犹译 孕望自杜列译 灵苑媛
Г援援 андсберг, Оптика, Госиздат 援 灵缘媛

③ 钟锡华,《现代光学基础》,北京 北京大学出版社,1995年。

目 录

第一章 光和光的传播	员
光和光学	员
光的本性	员
光源与光谱	猿
光学研究对象、分支与应用	远
光的几何光学传播规律	远
几何光学三定律	远
全反射	怨
棱镜与色散	员
光路的可逆性原理	源
惠更斯原理	缘
波的几何描述	缘
惠更斯原理的表述	缘
对反射定律和折射定律的解释	苑
直线传播问题	愿
费马原理	怨
光程	怨
费马原理的表述	圆
由费马原理推导几何光学三定律	圆
光度学基本概念	圆
辐射能通量和光通量	圆
发光强度和亮度	缘
余弦发光体和定向发光体	苑
照度	苑
光度学单位的定义	愿
本章提要	獭
思考题	獭
习题	獭
第二章 几何光学成像	獭
成 像	獭
实像与虚像 实物与虚物	獭
物方和像方 物与像的共轭性	獭
物像之间的等光程性	獭
等光程面	獭
共轴球面组傍轴成像	獭

圆光在单个球面上的折射	源
圆轴上物点成像焦距、物像距公式	源
圆傍轴物点成像与横向放大率	源
圆逐次成像	源
圆拉格朗日 亥姆霍兹定理	源
异薄透镜	源
圆焦距公式	源
圆成像公式	源
圆密接透镜组	源
圆焦 面	源
圆作图法	源
圆透镜组成像	源
异理想光具组理论	源
圆理想成像与共线变换	源
圆共轴理想光具组的基点和基面	源
圆物像关系	源
圆理想光具组的联合	源
异光学仪器	源
圆投影仪器	源
圆照相机	源
圆眼 睛	源
圆放大镜和目镜	源
圆显微镜	源
圆望远镜	源
圆棱镜光谱仪	源
异光 阑	源
圆孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳	源
圆视场光阑 入射窗和出射窗	源
异像 差	源
圆像差概述	源
圆球面像差	源
圆彗形像差	源
圆正弦条件和齐明点	源
圆像散和像场弯曲	源
圆畸 变	源
圆色像差	源
圆小 结	源

摇 晃 像 的 亮 度、照 度 和 主 观 亮 度	愿 苑
摇 晃 像 的 亮 度	愿 苑
摇 晃 像 的 照 度	愿 苑
摇 晃 主 观 亮 度	愿 苑
摇 本 章 提 要	愿 苑
摇 思 考 题	愿 苑
摇 习 题	愿 苑
第 三 章 摇 干 涉	愿 苑
摇 晃 波 的 叠 加 与 干 涉	愿 苑
摇 晃 波 的 描 述	愿 苑
摇 晃 波 的 叠 加 原 理	愿 苑
摇 晃 两 个 点 波 源 的 干 涉	愿 苑
摇 晃 杨 氏 实 验 光 场 的 空 间 相 干 性	愿 苑
摇 晃 杨 氏 双 缝 干 涉 实 验	愿 苑
摇 晃 一 些 其 它 干 涉 装 置	愿 苑
摇 晃 干 涉 条 纹 的 移 动	愿 苑
摇 晃 普 通 光 源 发 光 微 观 机 制 的 特 点	愿 苑
摇 晃 光 源 宽 度 对 干 涉 条 纹 衬 比 度 的 影 响	愿 苑
摇 晃 光 场 的 空 间 相 干 性	愿 苑
摇 晃 薄 膜 干 涉 (一) —— 等 厚 条 纹	愿 苑
摇 晃 薄 膜 干 涉 概 述	愿 苑
摇 晃 薄 膜 表 面 的 等 厚 条 纹	愿 苑
摇 晃 劈 形 薄 膜 的 等 厚 条 纹	愿 苑
摇 晃 牛 顿 环	愿 苑
摇 晃 等 厚 干 涉 条 纹 的 观 测 方 法 及 倾 角 的 影 响	愿 苑
摇 晃 薄 膜 的 颜 色 增 透 膜 和 高 反 射 膜	愿 苑
摇 晃 薄 膜 干 涉 (二) —— 等 倾 条 纹	愿 苑
摇 晃 无 穷 远 的 等 倾 条 纹	愿 苑
摇 晃 观 察 等 倾 条 纹 时 扩 展 光 源 的 作 用	愿 苑
摇 晃 薄 膜 干 涉 的 定 域 问 题	愿 苑
摇 晃 迈 克 耳 孙 干 涉 仪 光 场 的 时 间 相 干 性	愿 苑
摇 晃 迈 克 耳 孙 干 涉 仪 的 结 构	愿 苑
摇 晃 干 涉 条 纹	愿 苑
摇 晃 光 源 的 非 单 色 性 对 干 涉 条 纹 的 影 响	愿 苑
摇 晃 傅 里 叶 变 换 光 谱 仪	愿 苑
摇 晃 精 密 测 长 与 长 度 的 自 然 基 准	愿 苑

摇摇缘近光场的时间相干性	页 园
摇摇缘近光场的相干性小结	页 园
摇 异援多光束干涉 法布里 原珀罗干涉仪	页 猿
摇摇远最多光束干涉的强度分布公式	页 猿
摇摇远圆法布里 原珀罗干涉仪的装置和条纹的半峰宽度	页 苑
摇摇远猿法布里 原珀罗干涉仪在光谱学中的应用	页 园
摇 本章提要	页 园
摇 思考题	页 缘
摇 习 题	页 苑
第四章 摇 衍 射	页 猿
摇 异援光的衍射现象和惠更斯 原菲涅耳原理	页 猿
摇摇员光的衍射现象	页 猿
摇摇员圆惠更斯 原菲涅耳原理	页 缘
摇摇员猿巴比涅原理	页 怨
摇摇员源衍射的分类	页 怨
摇 异圆菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	页 园
摇摇圆源实验现象	页 园
摇摇圆缘半波带法	页 员
摇摇圆缘矢量图解法	页 猿
摇摇圆源菲涅耳波带片	页 缘
摇 异圆夫琅禾费单缝衍射和矩孔衍射	页 怨
摇摇猿源实验装置和实验现象	页 怨
摇摇猿圆单缝衍射的强度公式	页 园
摇摇猿猿矩孔衍射的强度公式	页 猿
摇摇猿源单缝衍射因子的特点	页 源
摇摇猿缘几何光学的限度	页 愿
摇 异圆光学仪器的像分辨本领	页 怨
摇摇源源夫琅禾费圆孔衍射	页 怨
摇摇源圆望远镜的分辨本领	页 园
摇摇源猿球面波照明条件下像面接收的夫琅禾费衍射	页 园
摇摇源源显微镜的分辨本领	页 猿
摇 异圆多缝夫琅禾费衍射和光栅	页 缘
摇摇缘源实验装置和衍射图样	页 缘
摇摇缘圆晕缝衍射的振幅分布和强度分布	页 苑
摇摇缘猿缝间干涉因子的特点	页 怨
摇摇缘源单缝衍射因子的作用	页 园

摇缘缘黑白光栅和正弦光栅	圆园
摇异缘光栅光谱仪	圆缘
摇缘缘光栅的分光原理	圆缘
摇缘缘光栅的色散本领和色分辨本领	圆缘
摇缘缘量和自由光谱范围	圆愿
摇缘缘闪耀光栅	圆愿
摇缘缘棱镜光谱仪的色散本领和色分辨本领	圆员
摇异缘三维光栅 —— 载射线在晶体上的衍射	圆园
摇缘缘晶体点阵 载射线	圆园
摇缘缘载射线在晶体上的衍射 —— 布拉格条件	圆猿
摇缘缘劳埃相和德拜相	圆苑
摇本章提要	圆苑
摇思考题	圆园
摇习题	圆源
第五章 摇 变换光学与全息照相	圆怨
摇异缘衍射系统产生的波前变换	圆怨
摇缘缘从惠更斯 菲涅耳原理看衍射现象	圆怨
摇缘缘衍射系统的屏函数 振幅变换函数与相位变换函数	圆怨
摇缘缘平面波与球面波的波前函数	圆员
摇缘缘傍轴条件和远场条件	圆猿
摇缘缘透镜的相位变换函数	圆源
摇缘缘棱镜的相位变换函数	圆苑
摇异缘阿贝成像原理与相衬显微镜	圆愿
摇圆缘阿贝成像原理	圆愿
摇圆缘空间频谱	圆园
摇圆缘空间滤波与阿贝 原波特实验	圆园
摇圆缘相衬显微镜	圆缘
摇异缘傅里叶变换光学与光信息处理	圆苑
摇猿缘夫琅禾费衍射装置和衍射积分的标准形式	圆苑
摇猿缘傅里叶变换及其逆变换	圆怨
摇猿缘夫琅禾费衍射与傅里叶变换的关系	圆园
摇猿缘相干光图像处理的 源云系统	圆员
摇猿缘空间滤波实验举例	圆园
摇异缘全息照相	圆缘
摇源缘全息照相步骤	圆缘
摇源缘全息照相的特点	圆苑

摇摇源全息照相的基本原理 —— 无源空间边值定解	源苑
摇摇源源波前的全息记录	源愿
摇摇源源物光波前的重建	源怨
摇摇源近体全息	源员
摇摇源苑全息术的应用	源圆
摇 本章提要	源源
摇 思考题	源远
摇 习 题	源苑
第六章 摇 偏振	源园
摇 晃晃光的横波性与五种偏振态	源园
摇摇晃晃偏振现象与光的横波性	源园
摇摇晃晃偏振片	源员
摇摇晃晃自然光	源圆
摇摇晃晃线偏振光	源圆
摇摇晃晃部分偏振光	源猿
摇摇晃晃圆偏振光	源源
摇摇晃晃椭圆偏振光	源缘
摇 晃晃光在电介质表面的反射和折射 菲涅耳公式	源远
摇摇圆晃菲涅耳反射折射公式	源苑
摇摇圆晃反射率和透射率	源愿
摇摇圆晃斯托克斯的倒逆关系	源员
摇摇圆晃相位关系与半波损失问题	源圆
摇摇圆晃反射、折射时的偏振现象	源缘
摇摇圆晃从电磁理论推导光的反射、折射定律和菲涅耳公式	源远
摇摇圆晃全反射与隐失波	源愿
摇 晃晃双折射	源怨
摇摇晃晃双折射现象和基本规律	源怨
摇摇晃晃单轴晶体中的波面	源员
摇摇晃晃晶体的惠更斯作图法	源圆
摇摇晃晃法向速度与射线速度 法向面与射线面	源源
摇摇晃晃折射率椭球	源苑
摇摇晃晃双轴晶体	源愿
摇 晃晃晶体光学器件 圆偏振光和椭圆偏振光的获得与检验	源园
摇摇源晃晶体偏振器	源园
摇摇源晃波晶片 —— 相位延迟片	源员
摇摇源晃垂直振动的合成	源猿

摇摇源圆偏振光和椭圆偏振光的获得	猿猿
摇摇源圆偏振光和椭圆偏振光通过检偏器后强度的变化	猿苑
摇摇源圆通过波晶片后光束偏振状态的变化	猿苑
摇摇源圆偏振光和椭圆偏振光的检验	猿怨
摇摇源圆偏振光的干涉及其应用	猿园
摇摇源圆偏振器间的波晶片	猿园
摇摇源圆色偏振	猿猿
摇摇源圆偏振光的干涉条纹	猿源
摇摇源圆光测弹性术	猿源
摇摇源圆克尔效应与泡克尔斯效应	猿远
摇摇源圆会聚偏振光的干涉	猿苑
摇摇源圆旋光	猿愿
摇摇源圆石英的旋光现象	猿愿
摇摇源圆菲涅耳对旋光性的解释	猿园
摇摇源圆旋光晶体内的波面	猿园
摇摇源圆量糖术	猿猿
摇摇源圆磁致旋光——法拉第旋转	猿缘
摇摇本章提要	猿苑
摇摇思考题	猿怨
摇摇习题	猿猿
第七章 摇摇光与物质的相互作用 光的量子性	猿怨
摇摇源圆光的吸收	猿怨
摇摇源圆光的线性吸收规律	猿怨
摇摇源圆复数折射率的意义	猿园
摇摇源圆光的吸收与波长的关系	猿园
摇摇源圆吸收光谱	猿员
摇摇源圆光的色散	猿猿
摇摇源圆正常色散	猿猿
摇摇源圆反常色散	猿源
摇摇源圆一种物质的全部色散曲线	猿缘
摇摇源圆相速与群速	猿缘
摇摇源圆光辐射的理论	猿愿
摇摇源圆光的发射、吸收与色散的经典理论	猿愿
摇摇源圆辐射阻尼	猿员
摇摇源圆辐射的量子图像	猿园
摇摇源圆谱线的自然宽度及谱线增宽	猿远

第 1 章 光的散射	1
1.1 瑞利散射与介质不均匀尺度的关系	1
1.2 瑞利散射和米氏散射	1
1.3 散射光强的角分布与偏振状态	1
1.4 拉曼散射和布里渊散射	1
第 2 章 激光	2
2.1 激光概述	2
2.2 粒子数布居反转与光放大	2
2.3 激活介质中布居反转的实现	2
2.4 增益系数	2
2.5 激光器中共振腔的作用	2
2.6 增益的阈值条件	2
2.7 激光器对频率的选择	2
2.8 激光光束的特性	2
第 3 章 光的波粒二象性	3
3.1 单光子实验	3
3.2 探测光子时概率波的坍缩	3
第 4 章 本章提要	4
第 5 章 思考题	5
第 6 章 习 题	6
附录 A 傅里叶变换 波包的速度	A
A.1 周期函数的傅里叶级数展开	A
A.2 傅里叶积分变换	A
A.3 空间频谱	A
A.4 波包的群速	A
A.5 波包的能量速度	A
附录 B 物理常量	B
习题答案	习题答案
索 引	索引

第一章 光和光的传播

光和光学

光的本性

光是一种重要的自然现象。我们所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象,是因为眼睛接收物体发射、反射或散射的光。据统计,人类感官收到外部世界的总信息量中,至少有 80% 以上是通过眼睛的。由于光与人类生活和社会实践的密切联系,光学也和天文学、几何学、力学一样,是一门最早发展起来的学科。然而,在很长一个历史时期里,人类的光学知识仅限于一些现象和简单规律的描述。对光的本性的认真探讨,应该说是从 17 世纪开始的,当时有两个学说并立。一方面,以牛顿为代表的一些人提出了微粒理论,认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流。这个学说直接说明了光的直线传播定律,并能对光的反射和折射作一定的解释(见 1.1 节)。但是,用微粒说研究光的折射定律时,得出了光在水中的速度比空气中大的错误结论。不过这一点在当时的科学技术条件下还不能通过实验测定来鉴别。光的微粒理论差不多统治了 17 和 18 两个世纪。另一方面,和牛顿同时代的惠更斯(C. Huygens)提出了光的波动理论,认为光是在一种特殊弹性介质中传播的机械波。这理论也解释了光的反射和折射等现象(见 1.2 节)。然而惠更斯认为光是纵波,他的理论是很不完善的。18 世纪初,托马斯·杨(Thomas Young)和菲涅耳(A. J. Fresnel)等人的实验和理论工作把光的波动理论大大推向前进,解释了光的干涉、衍射现象,初步测定了光的波长,并根据光的偏振现象确认光是横波(有关光的波动理论,参见第三、四、五各章)。用光的波动理论研究光的折射,得出的结论是光在水中的速度应小于它在空气中的速度,这一点在 1849 年傅科(J. B. L. Foucault)的实验所证实。因此,19 世纪中叶,光的波动说战胜了微粒说,在比较坚实的基础上确立起来。

惠更斯-菲涅耳旧波动理论的弱点,和微粒理论一样,在于它们都带有机械论的色彩,把光现象看成某种机械运动过程。认为光是一种弹性波,就必须臆想一种特殊的弹性介质[历史上叫做‘以太(aether)’]充满空间。为了不与观测事实抵触,还必须赋予以太极其矛盾的属性:密度极小和弹性模量极大。这不仅在实验上无法得到证实,理论上也显得荒唐。重要的突破发生在 19 世纪 70 年代。麦克斯韦(J. C. Maxwell)在前人的基础上,建

立起他著名的电磁理论。这个理论预言了电磁波的存在,并指出电磁波的速度与光速相同。因此麦克斯韦确信光是一种电磁现象,即波长较短的电磁波。1887年赫兹(H. R. Hertz)实验发现了波长较长的电磁波——无线电波,它有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的性质。后来的科学实验又证明,红外线、紫外线和X射线等也都是电磁波,它们彼此的区别只是波长不同而已。光的电磁理论以大量无可辩驳的事实赢得了普通的公认。

以上是经典物理学中光的微粒说与波动说之争的简短回顾,其中讨论的主要是光的传播,很少涉及光的发射和吸收。那时期光和物质的相互作用问题还没有怎么研究过,许多现象尚未发现。

19世纪末、20世纪初是物理学发生伟大革命的时代。从牛顿力学到麦克斯韦的电磁理论,经典物理学形成一套严整的理论体系。当时绝大部分物理学家深信,物理学中各种基本问题在原则上都已得到完美的解决,它的理论体系囊括了一切物理现象的基本规律,剩下的似乎只是解微分方程和具体应用的问题了。然而,正当人们欢庆这宏伟的经典物理学大厦落成的时候,一个个使经典物理学理论陷入窘境的惊人发现接踵而来。1887年迈克耳孙(A. A. Michelson)和莫雷(E. W. Morley)利用光的干涉效应,试图探测地球在“以太”中的绝对运动。他们得到否定的结果,从而动摇了作为光波(电磁波)载体的“以太”假说,以“静止以太”为背景的绝对时空观遇到了根本性的困难。随后瑞利(J. W. S. Rayleigh)和金斯(J. H. Jeans)根据经典统计力学和电磁波理论,导出黑体辐射公式,该公式要求辐射能量随频率的增长而趋于无穷大。当时物理学界的权威开耳文爵士(Lord Kelvin)把光以太和能均分定理的困难比喻作笼罩在物理学晴朗天空中的两朵乌云。从后来物理学的发展看来,这两朵“乌云”正预示着近代物理学两个革命性的重大理论——相对论和量子论的诞生。有趣的是,这两个问题恰好都与光学有关。

现在让我们回到光的本性问题上。为了解决黑体辐射理论中的矛盾,1900年普朗克(M. Planck)提出了量子假说,认为各种频率的电磁波(包括光),只能像微粒似地以一定最小份额的能量(称为能量子)发生。这是一个光的发射问题。另一个显示光的微粒性的重要发现是光电效应,即光照射在金属表面上可使电子逸出,逸出电子的能量与光的强度无关,但与光的频率有关,这是一个光的吸收问题。1905年爱因斯坦发展了光的量子理论,成功地解释了这个效应。光究竟是微粒还是波动?这个古老的争论重新摆在了我们的面前。

其实,“粒子”和“波动”都是经典物理的概念。近代科学实践证明,光

是个十分复杂的客体。对于它的本性问题,只能用它所表现的性质和规律来回答。光的某些方面的行为像经典的“波动”,另一些方面的行为却像经典的“粒子”。这就是所谓“光的波粒二象性”。任何经典的概念都不能完全概括光的本性。

员圆光源与光谱

任何发光的物体都可叫做光源。太阳、腊烛的火焰、钨丝白炽灯、日光灯、水银灯,都是我们日常生活中熟悉的光源。光源不仅用来照明,在实验室中为了各种科学研究课题的需要,人们常使用形式多样的特殊光源,如各种电弧和气体辉光放电管等。员苑年发明的激光器,则是一种与所有过去的光源性质不同的崭新光源。光既然是一种电磁辐射,就要有某种能量的补给来维持其发射,按能量补给的方式不同,光的发射大致可分为以下两大类。

(员 热辐射

不断给物体加热来维持一定的温度,物体就会持续地发射光,包括红外线、紫外线等不可见的光。在一定温度下处于热平衡状态下物体的辐射,叫做热辐射或温度辐射。太阳、白炽灯中光的发射属于此类。

(圆 光的非热发射

各种气体放电管(如日光灯、水银灯)管内的发光过程是靠电场来补给能量的,这过程叫做电致发光。某些物质在放射线、X射线、紫外线、可见光或电子束的照射或轰击下,可以发出可见光来。这一过程叫做荧光。日光灯管壁上的荧光物质、示波管或电视显像管中的荧光屏的发光属于此类。有的物质在上述各种射线的辐照之后,可以在一段时间内持续发光,这种过程叫做磷光,夜光表上的磷光物质的发光属于此类。由于化学反应而发光的过程,叫做化学发光,腐物中的磷在空气中缓慢氧化发出的光(如有时在坟地上出现的“鬼火”)属于这一类。生物体(如萤火虫)的发光叫做生物发光,它是特殊类型的化学发光过程。应当指出,能量形式可以相互转化,上述光的各种发射过程不能截然分开,同一光源中光的发射过程也往往不是单一的。在各种波长 λ 的电磁波中,能为人类的眼睛所感受的,只是 $\lambda = 380 \sim 760$ nm 的狭小范围。这波段内的电磁波叫做可见光。在可见光范围内不同波长的光引起不同的颜色感觉。大致说来,波长与颜色的对应关系见下表:

380	400	450	500	550	600	650	700	760	nm
红	橙	黄	绿	青	蓝	紫			

由于颜色是随波长连续变化的,上述各种颜色的分界线带有人为约定的性质。

在电磁波谱中与可见光波段衔接的,短波一侧是紫外线[(380~400) nm

左右],长波一侧是红外线(苑园nm ~ 十分之几mm)。红外的波段很宽,为了方便,人们还常把它进一步分为近红外、中红外和远红外几段。习惯上红外线的波长用微米(μm)作单位,波长小于(员~ 圆 μm 的叫近红外,数量级大于 μm 的叫远红外,二者之间便是中红外。下面我们谈到“光”,常广义地把可见光以外波段的电磁辐射(特别是红外线和紫外线)包括在内。任何波长的电磁波在真空中的传播速度都是相同的,通常用 c 表示,其数值为

$$c = \text{圆} \times \text{苑} \times \text{苑} \times \text{苑} \text{ m/s} \approx \text{猿} \times \text{苑} \times \text{苑} \text{ m/s}$$

因此从波长 λ 立即可以换算出频率 ν 来:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (\text{员员})$$

例如,波长范围为(源园~ 苑园 nm)的可见光,对应的频率范围是(苑缘~ 猿怨 $\times 10^{14}$ Hz)

通常说光的强度(简称光强),是指单位面积上的平均光功率,或者说,光的平均能流密度。作为电磁波,这应由坡印亭矢量 $S = E \times H$ 确定。①因电磁波中 $E \perp H$,且 $\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H$,坡印亭矢量的瞬时值为

$$S = |E \times H| = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} E^2. \quad (\text{员圆})$$

式中 ε 和 μ 分别是相对介电常量和相对磁导率, ε_0 和 μ_0 分别是真空介电常量和真空磁导率。在光频段,所有磁化机制都不起作用, $\mu \approx 1$ 从而光学折射率 $n = \sqrt{\varepsilon \mu} \approx \sqrt{\varepsilon}$,故

$$S = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} n E^2 = \frac{n}{c \mu_0} E^2. \quad (\text{员猿})$$

这里用到 $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ 的关系式。对于简谐振动,平均值 $\overline{E^2} = \frac{1}{2} E_0^2$,其中 E_0 为振幅,故光的强度为

$$I = \overline{S} = \frac{n}{2 \mu_0} E_0^2 \quad (\text{员源})$$

在同一种介质里只关心光强的相对分布时,上式中的比例系数不重要,人们往往把光的(相对)强度就写成振幅的平方:

$$I = E_0^2 \quad (\text{员缘})$$

但在比较两种介质里的光强时,则应注意到,比例系数中还有一个与介质有关的量——折射率 n 。

单一波长的光叫单色光,否则是非单色光。

如果我们用棱镜或其它分光仪器对各种普通光源发出的光进行分析,

① 参见《新概念物理教程·电磁学》第六章 猿猿节。

就会发现它们大都不是单色光。令 dI_λ 代表波长在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 之间光的强度，

$$i(\lambda) = \frac{dI_\lambda}{d\lambda} \quad (\text{员远})$$

代表单位波长区间的光强，非单色光的 $i(\lambda)$ 按波长的分布，叫做光谱， $i(\lambda)$ 叫做谱密度，总光强 I 与谱密度的关系是

$$I = \int_{\lambda_{\text{越园}}}^{\lambda_{\text{越肆}}} dI_\lambda = \int_{\text{园}}^{\text{肆}} i(\lambda) d\lambda. \quad (\text{员苑})$$

不同的光源有不同的光谱，例如热辐射光源光谱的特点如图 员- 员所示，光强在很大的波长范围内连续分布。这种光谱叫连续光谱。气体（或金属蒸气）放电发射光谱的特点如图 员- 圆所示，光强集中在一些离散的波长值 $\lambda_{\text{员}}, \lambda_{\text{圆}}, \lambda_{\text{猿}} \dots$ 附近形成一条条谱线。这种光谱叫线光谱。不同化学成分的

物质各有自己的特征谱线。每条谱线只是近似的单色光，它们的光强分布有一定的波长范围 $\Delta\lambda$ ，这 $\Delta\lambda$ 称为谱线宽度。 $\Delta\lambda$ 愈小，表示光的单色性愈好。激光器的谱线宽度可以做得比普通光源小得多，单色性好正是激光的几个基本优点之一。若干元素的普通光源和激光器的典型谱线列于表 员- 员

表 员- 员 典型谱线

元 摇 素	谱线波长 /nm	颜 摇 色	元 摇 素	谱线波长 /nm	颜 摇 色
钠 (Na)	缘怨园 缘怨远	黄 (D 双线)	氢 (H)	源园圆	紫
汞 (Hg)	源苑苑 源苑愿	紫		源源园	蓝
	源缘愿	蓝		源远员	青绿 (F 线)
	缘远员 (最强)	绿		远猿猿	橙红 (C 线)
	缘苑园 缘怨员	黄	氦氖激光器	远圆愿	红
镉 (Cd)	远源愿	红	氦离子激光器	源愿园	青
氪 (Kr)	远缘苑	橙		缘源缘	绿

太阳光谱除了一些暗线外，基本上是连续谱，它所发出的各种波长的可见光混合起来，给人的感觉是白色。光学中所谓白光，经常指具有和太阳连续光谱相近的多色混合光。❶

❶ 两种互补色（如橙和蓝，黄和靛青）的光，或三种颜色（如红、绿、蓝）的光按适当比例混合，也可给人的视觉造成白色的感觉。但用它们来照明各种颜色的物体时，看起来就和日光照明不同了，其原因在于它们的光谱和日光光谱不同。从物理学的角度来研究问题，则不仅要看生理效果，还要看光谱分布。

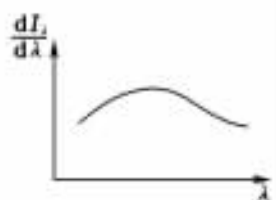


图 员- 员 连续光谱

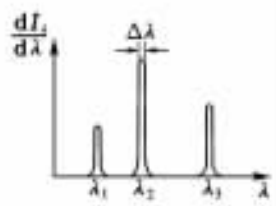


图 员- 圆 线光谱

员猿光学的研究对象、分支与应用

光学是研究光的传播以及它和物质相互作用问题的学科。光学除了是物理学中一门重要的基础学科外,它也是一门应用性很强的学科。光学的研究对象早已不限于可见光。在长期的发展过程中,光学里形成一套行之有效的特殊方法和仪器设备,它们可用之于日益宽广的电磁波段。光学与其它同电磁波打交道的学科(如无线电物理、原子和原子核物理)之间的界限,与其说是按波段,还不如说是按研究手段来划分。并且随着科学的发展,各学科相互交叠和渗透,其间界限愈来愈模糊了。

若不涉及光的发射和吸收等与物质相互作用过程的微观机制,光学在传统上分为两大部分:当光的波长可视为极短,从而其波动效应不明显时,人们把光的能量看成是沿着一根根光线传播的,它们遵从直进、反射、折射等定律,这便是几何光学。研究光的波动性(干涉、衍射、偏振)的学科,称为物理光学(或波动光学)。光和物质相互作用的问题,通常是在分子或原子的尺度上研究的。在这领域内有时可用经典理论,有时则需用量子理论。对于这类原不属于传统光学的内容,有人冠之以“分子光学”和“量子光学”等名称,也有人把它们仍归于物理光学之内。

光学的应用十分广泛。几何光学本来就是为设计各种光学仪器而发展起来的专门学科。随着科学技术的进步,物理光学也愈来愈显示出它的威力。例如,光的干涉目前仍是精密测量中无可替代的手段,衍射光栅则是重要的分光仪器。光谱在人类认识物质的微观结构(如原子结构、分子结构等)方面曾起了关键性的作用,现在它不仅是化学分析中的先进方法,还为天文学家提供了关于星体的化学成分、温度、磁场、速度等大量信息。近 溯多年来,人们把数学、信息论与光的衍射结合起来,发展起一门新的学科——傅里叶光学,已被应用到信息处理、像质评价、光学计算等技术中。激光的发明,可以说是光学发展史上的一个革命性的里程碑。由于激光具有强度大、单色性好、方向性强等一系列独特的性能,自从它问世以来,很快就被运用到材料加工、精密测量、通讯、全息检测、医疗、农业等极为广泛的技术领域,取得了优异的成绩。此外,激光还为同位素分离、催化、信息处理、受控核聚变,以及军事上的应用,取得了光辉的成果。

§ 圆 光的几何光学传播规律

圆员几何光学三定律

几何光学是以下列三个实验定律为基础建立起来的,它是各种光学仪