普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 大学物理学

## 下　　册

吴百诗　主　编
罗春荣　马永庚　张孝林　副主编

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

## 内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，是吴百诗教授及参编学校数十年来大学物理课程教学经验的总结。全书以大众化教育形势下对人才培养的要求为出发点，针对当前学生的特点编写而成。本书在教学内容上进行了改革，虽然在体系上变化不大，但在内容选取、教学安排、讲法上等有一定的创新。考虑到对工科学生培养的特点，本书十分注意物理学与实际的联系，特别是与工程实际、科技前沿的联系，在例题和习题的选取上更是尽可能反映工程实际和科技新成就。

全书分3册出版，上册包括力学和热学，中册包括电磁学，下册包括波动、光学和近代物理。与本书配套有习题解答、电子教案等辅助用书。这套书可供高等学校工科各专业作为大学物理课程的教材或参考书使用，也可供其它专业的社会读者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理学.下册/吴百诗主编.—北京：高等教育出版社，2004.11
ISBN 7-04-015815-9

Ⅰ.大… Ⅱ.吴… Ⅲ.物理学—高等学校—教材 Ⅳ.O4

中国版本图书馆CIP数据核字（2004）第108828号

策划编辑 庞永江 责任编辑 陶 铮 封面设计 张申申 责任绘图 宗小梅
版式设计 王 莹 责任校对 朱惠芳 责任印制

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 http://www.hep.edu.cn
http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16
印 张 29.5
字 数 550 000
插 页 1

版 次 年 月第1版
印 次 年 月第 次印刷
定 价 30.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号：15815-00

# 目　录

## 第四篇　振动　波动　光学


第 12章　机械振动 …… 3
§12.1　简谐振动 …… 4
§12.2　简谐振动的实例分析 …… 20
§12.3　简谐振动的合成 …… 24
§12.4　阻尼振动和受迫振动简介 …… 34
* §12.5　二自由度线性振动简介 …… 40
本章小结 …… 43
习题 …… 44

第 13章　机械波 …… 53
§13.1　波的分类 …… 55
§13.2　横波和纵波 …… 56
§13.3　简谐波　波长和频率 …… 58
§13.4　波速 …… 71
§13.5　波面和波线　惠更斯原理 …… 75
§13.6　波的能量　能流密度 …… 79
§13.7　波的叠加原理　波的干涉 …… 84
§13.8　驻波 …… 89
§13.9　多普勒效应 …… 95
本章小结 …… 103
习题 …… 104

* 第 14章　几何光学 …… 113
§14.1　光的反射和折射 …… 115
§14.2　在球面界面上的反射和折射 …… 128
§14.3　薄透镜 …… 136
§14.4　球面反射镜的物像公式 …… 149
§14.5　球面像差和色散像差 …… 157
§14.6　光学仪器 …… 159
本章小结 …… 166

习题 …… 168

第 15章 波动光学 …… 175
§15.1 光是电磁波 …… 176
§15.2 光波的叠加 …… 186
§15.3 分波前干涉 空间相干性 …… 191
§15.4 光程与光程差 …… 202
§15.5 分振幅干涉 …… 206
§15.6 迈克耳孙干涉仪 时间相干性 …… 221
§15.7 光的衍射 惠更斯 -菲涅耳原理 …… 227
§15.8 夫琅禾费衍射 …… 230
§15.9 衍射光栅 光栅光谱 …… 242
§15.10 X射线在晶体上的衍射 …… 255
§15.11 光的偏振 线偏振光和自然光 …… 258
§15.12 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律 …… 260
§15.13 光在反射和折射时的偏振 布儒斯特定律 …… 264
§15.14 光的双折射 …… 267
§15.15 尼科耳棱镜 渥拉斯顿棱镜 波晶片 …… 271
§15.16 偏振光的干涉 人工双折射 …… 275
§15.17 旋光效应简介 …… 281
本章小结 …… 282
习题 …… 285

## 第五篇 近代物理

第 16章 量子物理基础 …… 295
§16.1 热辐射 普朗克能量子假设 …… 296
§16.2 光电效应 爱因斯坦光子假说 …… 302
§16.3 康普顿散射 …… 308
§16.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论 …… 314
§16.5 实物粒子的波粒二象性 不确定关系 …… 321
§16.6 波函数 一维定态薛定谔方程 …… 327
§16.7 氢原子的量子力学描述 …… 341
§16.8 电子自旋 四个量子数 …… 347
§16.9 原子的电子壳层结构 …… 350
§16.10 固体能带结构 …… 355
§16.11 激光 …… 370
本章小结 …… 381

习题 …… 384

* 第 17章　原子核和粒子物理简介 …… 391
§17.1 原子核的基本性质 …… 392
§17.2 原子核应用技术简介 …… 398
§17.3 粒子物理简介 …… 409
§17.4 强子结构的夸克模型 …… 419
本章小结 …… 423
习题 …… 424

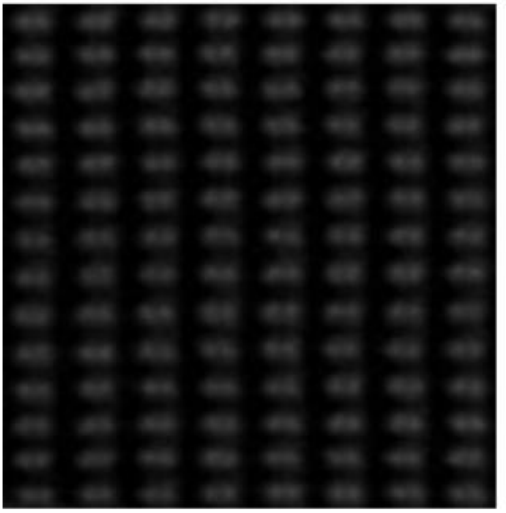
附录 I　量子力学基本知识 …… 428
附录 II　量子统计简介 …… 437
附录III　诺贝尔物理学奖全览 …… 444
附录IV　物理量的量纲和单位 …… 451
习题答案 …… 458

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 第15章 波动光学



⑴ 能够看见原子的电子显微镜



⑵ 显微镜下的原子世界

图片 ⑴ 是一台目前分辨本领最高的电子显微镜，用它可以看到原子．

图片 ⑵ 是用该显微镜观察到的以哑铃形状出现的硅原子图像，图像的分辨率达到了 0.6？．

在几何光学中,我们以光线为基础,揭示了光的传播和成像规律.但在那里引入的光线、光束、物点、像点和光学系统等概念还仅是一些关于光的表观抽象,采用的研究方法也仅是几何方法,并没有涉及光的内在属性.19世纪初,人们发现光有干涉、衍射和偏振等现象.例如,在日常生活中常可看到在太阳光的照耀下,肥皂泡或水面的油膜上会呈现出色彩绚丽的彩色条纹图样;又如,让点光源发出的光通过一直径可调的圆孔,在孔后适当位置放置一屏幕,逐渐缩小孔径,屏幕上会出现中央亮斑,周围为明暗相间的圆环形图样等等.这些现象表明光具有波动性,用几何光学理论是无法解释的.由此产生了以光是波动为基础的光学理论,这就是波动光学.19世纪60年代,迈克斯韦建立了光的电磁理论,光的干涉、衍射和偏振现象得到了全面说明.

光的干涉、衍射和偏振现象,在现代科学技术中的应用十分广泛,例如,长度的精密测量、光谱学的测量与分析、光测弹性研究、晶体结构分析等.随着激光技术的发展,全息照相技术、集成光学、光通信等新技术也先后建立起来,开拓了光学研究和应用的新领域.其中,在基础理论方面也包括了对波动光学的再认识和新内容,如傅里叶光学、相干光学和信息处理以及在强激光下的非线性光学效应等.

本章将从认识光是电磁波开始,通过光的干涉、衍射、偏振现象讨论光的波动性及其应用.

# §15.1 光是电磁波

## 15.1.1 光是一种电磁波

根据迈克斯韦电磁场理论,起初局限于空间某处的电磁场,由于电场和磁场的变化,会使电磁场以一定速度在空间传播,形成电磁波.

1888年,赫兹用实验证实了电磁波的存在,并证实了电磁波与光一样有衍射、折射和偏振等性质.继赫兹发现电磁波之后,大量实验结果表明,无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线和γ射线等,其内在本质都是电磁波.将电磁波按其频率(或波长)顺序排列起来,就构成了所谓的电磁波谱.图15.1是按频率和波长两种标度绘制的电磁波谱.

可见光通常指能刺激人的视觉的一种电磁波,它在电磁波谱中仅占很窄的一个频段,波长范围约为390~770 nm,频率范围约为$7.5\times10^{14}$~$3.9\times10^{14}$ Hz,表15.1列出了可见光七种颜色的波长和频率范围.不同波长的可见光给人们

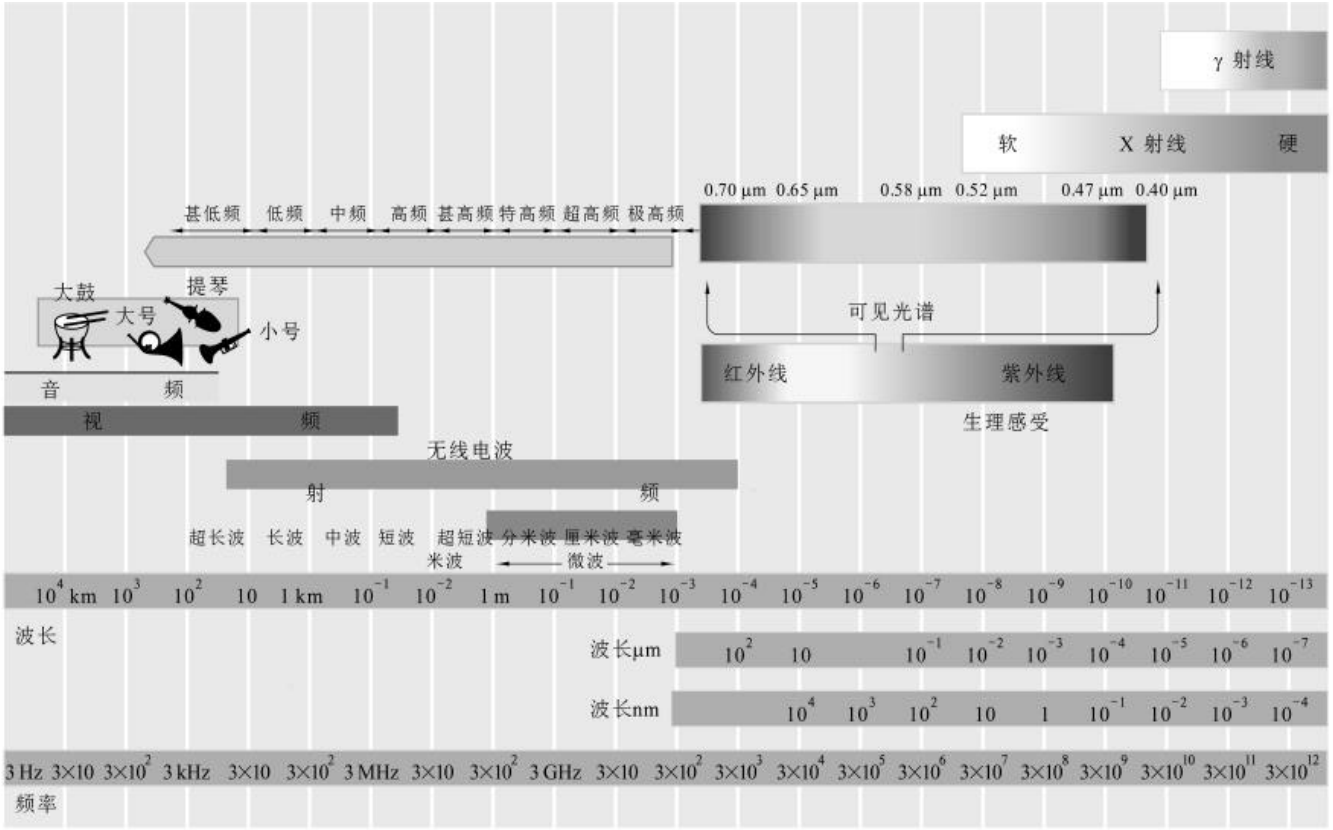

γ 射线
软
X 射线
硬
0.70 μm 0.65 μm
0.58 μm 0.52 μm
0.47 μm 0.40 μm
甚低频 低频 中频 高频 甚高频 特高频 超高频 极高频
大鼓
提琴
大号
小号
音
频
可见光谱
红外线
紫外线
视
频
生理感受
无线电波
射
频
超长波 长波 中波 短波 超短波 分米波 厘米波 毫米波
米波
微波
10^4 km 10^3 10^2 10 1 km 10^-1 10^-2 1 m 10^-1 10^-2 10^-3 10^-4 10^-5 10^-6 10^-7 10^-8 10^-9 10^-10 10^-11 10^-12 10^-13
波长
波长μm
10^2 10 10^-1 10^-2 10^-3 10^-4 10^-5 10^-6 10^-7
波长nm
10^4 10^3 10^2 10 1 10^-1 10^-2 10^-3 10^-4
3 Hz 3×10 3×10^2 3 kHz 3×10 3×10^2 3 MHz 3×10 3×10^2 3 GHz 3×10 3×10^2 3×10^3 3×10^4 3×10^5 3×10^6 3×10^7 3×10^8 3×10^9 3×10^10 3×10^11 3×10^12
频率

图 15.1

表 15.1 可见光七种颜色的波长和频率

| 光色 | 波长/nm | 频率/Hz | 中心波长/nm | 中心频率/Hz |
|---|---|---|---|---|
| 红 | 760～622 | $3.9\times10^{14}$～$4.8\times10^{14}$ | 660 | $4.5\times10^{14}$ |
| 橙 | 622～597 | $4.8\times10^{14}$～$5.0\times10^{14}$ | 610 | $4.9\times10^{14}$ |
| 黄 | 597～577 | $5.0\times10^{14}$～$5.4\times10^{14}$ | 570 | $5.3\times10^{14}$ |
| 绿 | 577～492 | $5.4\times10^{14}$～$6.1\times10^{14}$ | 540 | $5.5\times10^{14}$ |
| 青 | 492～470 | $6.1\times10^{14}$～$6.4\times10^{14}$ | 480 | $6.3\times10^{14}$ |
| 蓝 | 470～455 | $6.4\times10^{14}$～$6.6\times10^{14}$ | 460 | $6.5\times10^{14}$ |
| 紫 | 455～400 | $6.6\times10^{14}$～$7.5\times10^{14}$ | 430 | $7.0\times10^{14}$ |

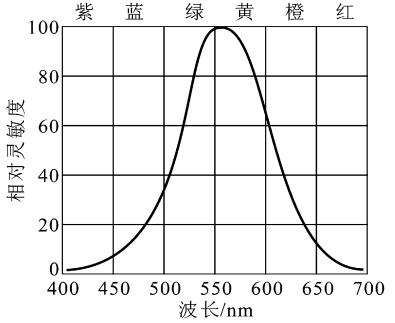



图 15.2

以不同颜色的感觉,而且人眼对不同波长的光的相对灵敏度也不同,例如,人眼对中心波长约为 555 nm的黄绿光最为灵敏. 图 15.2给出了人眼对可见光的相对灵敏度与波长的关系曲线. 实际上,可见光谱两端界限是不明确的,只要电磁波辐射足够强,人眼还是可以看见可见光谱界限以外一定范围的电磁波. 从可见光向两边扩展,波长比它长的电磁波称为红外线,其波长大约从 770 nm到十分之几毫米,是不可见的. 红外线的热效应特别显著,在生产生活中常利用红外线对物体“加热”.通过以热释电晶体为核心的热像变换设备,可拍摄物体的红外热像,制成夜视仪器.除此以外,还有红外通信、红外报警、文物鉴定和红外防伪等许多应用. 波长比可见光短的电磁波称为紫外线,其波长大约从 5 nm到400 nm,也是不可见的. 紫外线有显著的化学效应和荧光效应,由于它的能量能

够破坏细胞的生命物质,故用于医疗和杀菌等.

## 15.1.2 平面简谐电磁波的性质

在实际情况中,凡作加速运动的电荷或电荷系都是发射电磁波的波源,如振荡的电偶极子、原子或分子中电荷的振动、天线中振荡的电流、同步加速器中带电粒子作圆周运动等都会在其周围空间产生电磁波.由于任何形式的波都可以用频率不同的简谐波叠加来表示.因此,这里主要介绍平面简谐电磁波的基本性质.

对于存在于自由空间、频率为 $\omega$的平面简谐电磁波,其电场强度 $E$和磁场强度 $H$可分别表示为

$$E(r,t)=E_0\cos\omega\left(t-\frac{r}{u}\right) \tag{15.1a}$$

$$H(r,t)=H_0\cos\omega\left(t-\frac{r}{u}\right) \tag{15.1b}$$

由电磁场理论可知,它们并不是独立传播的,而是相互联系的.式中 $E_0$、$H_0$分别为电场强度 $E$和磁场强度 $H$的振幅矢量,$r$为坐标原点到电磁场中场点的矢径,$u$为电磁波在均匀介质中的传播速率.根据理论分析和实验结果,平面简谐电磁波的基本性质可概括为以下几点:

1. 电磁波是横波

设矢量 $e_n$为表征电磁波传播方向的单位矢量,电磁波的场矢量 $E$和 $H$垂直且均垂直于波的传播方向,即

$$E\perp H \tag{15.2}$$

$$E\perp e_n,\quad H\perp e_n \tag{15.3}$$

并且,$E\times H$的方向始终沿着 $e_n$的方向,三者形成右手螺旋关系,如图 15.3所示.一般来说,场矢量 $E$与 $e_n$构成的平面,称为 $E$的振动面;场矢量 $H$与 $e_n$构成的平面,称为 $H$的振动面,$E$和 $H$分别在各自振动面内振动.这个性质称为电磁波的偏振性.只有横波才具有偏振性,因此电磁波是横波.

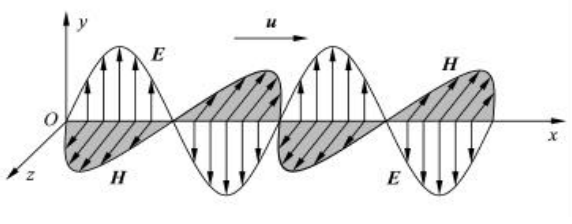



图 15.3

2. 矢量 E和 H同相位，E和 H的幅值成比例

电磁波的场矢量 E和 H在同一地点，同步变化．也就是说，它们具有相同的相位，并以相同速度在空间传播．在空间任一点处，E和 H的幅值之间的关系是

$$\varepsilon E_0 = \mu H_0 \tag{15.4}$$

式中 $\varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0$、$\mu=\mu_r\mu_0$分别是电磁波所处介质的介电常量和磁导率．从上式可知，在描述电磁波传播时，给定了电场强度即同时确定了磁场强度．

3. 电磁波的传播速率

根据迈克斯韦电磁场理论，电磁波在介质中的传播速率 u取决于所在介质的介电常量 ε和磁导率 μ，即

$$u=\frac{1}{\varepsilon\mu}=\frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r} \tag{15.5}$$

在真空中，由于 $\varepsilon_r=1$、$\mu_r=1$，可得电磁波在真空中的传播速率为

$$c=\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0} \tag{15.6}$$

由 $\varepsilon_0=8.9\times10^{-12}\ C^2\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}$，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\ Wb\cdot A^{-1}\cdot m^{-1}$可知，其数值为

$$c=2.997\,9\times10^8\ m\cdot s^{-1}$$

这个结果表明，任何波长的电磁波在真空中的传播速率都是相同的．1983年国际计量大会决定采用的真空中的光速为 $c=2.997\,924\,58\times10^8\ m\cdot s^{-1}$．

电磁波在真空中的速率 c与在该介质中的速率 u之比定义为该介质的折射率 n，即

$$n=\frac{c}{u}=\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \tag{15.7}$$

在非铁磁质中，$\mu_r\approx1$，此时

$$n=\sqrt{\varepsilon_r} \tag{15.8}$$

4. 电磁波的能量

电磁波的传播伴随着电磁场能量的传播．以电磁波形式传送能量的方式称为辐射，故电磁波所携带的能量通常也称为辐射能．在各向同性介质中，电磁能量的传播方向与波速方向是相同的．

在单位时间内，定义通过垂直于电磁波传播方向单位面积的辐射能为能流密度，用 S表示．参照波的能流密度定义

$$S=wu \tag{15.9}$$

式中 w为电磁场的能量密度，u为电磁波速，由电磁场理论可知，电磁场的总能

需要全本请访问 www.ertongbook.com

量密度为

$$w=\frac{1}{2}\varepsilon E^2+\frac{1}{2}\mu H^2$$

将其代入式 (15.9),并考虑到 $u=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ 和 $\sqrt{\varepsilon}E=\sqrt{\mu}H$,可得电磁波的能流密度

$$S=\frac{u}{2}\left(\varepsilon E^2+\mu H^2\right)=\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon\mu}}\left(\varepsilon E\sqrt{\mu}H+\sqrt{\mu}H\varepsilon E\right)=EH \tag{15.10}$$

由于电磁波的 E、H 和 u 构成右螺旋关系,且辐射能的方向与波速 u 方向一致,故电磁波的能流密度可写成矢量形式:

$$\boxed{\boldsymbol{S}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}} \tag{15.11}$$

通常称之为坡印廷矢量. 图 15.4给出 E、H 和 S之间的关系.

对于平面简谐电磁波,利用式 (15.1),式 (15.11) 可写成

$$S=E_0\times H_0\cos^2\omega\left(t-\frac{r}{u}\right)$$

显然,S的数值大小随时间作周期性变化. 当频率很高时,S随时间变化很快,其瞬时值一般无法测量. 因此,通常采用求平均值的办法来度量其大小. 设在一个周期 T内,电磁波的平均能流密度的大小可表示为

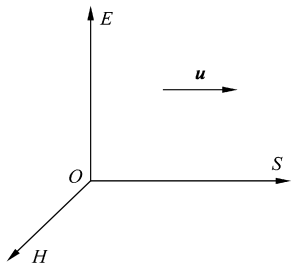


图 15.4

$$I=\langle S\rangle=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}EH\,dt$$

式中,符号〈 〉表示对时间求平均,则有

$$I=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}E_0H_0\cos^2\omega\left(t-\frac{r}{u}\right)dt=\frac{1}{2}E_0H_0=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}E_0^2 \tag{15.12}$$

通常将电磁波的平均能流密度 I称为电磁波的强度. 式 (15.12) 表明,电磁波的强度与电场矢量振幅的平方成正比.

需要指出的是,在实际应用中人们关注的主要是电磁波平均能流密度的相对大小,而不是它的绝对值. 因此,电磁波的强度也可直接表示为

$$I=\frac{1}{2}E_0^2 \tag{15.13}$$

**[例 15.1]** 在真空中有一点电磁波源,其辐射功率 $P_s=150\ \mathrm{W}$,试计算距波源 2.00 m 处,

(1) 电磁波的强度;

(2) 最大电场强度的数值;

(3) 最大磁感应强度的数值.

解 (1) 在均匀空间中,点电磁波源以球面波形式向外传播.以电磁波源为中心,半径为 $r$的球面积为 $4\pi r^2$,由题意可知,距波源 2.00 m处的电磁波强度为

$$I=\frac{P_s}{4\pi r^2}=\frac{150}{4\pi\times 2.00^2}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}=2.98\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

(2) 由式 (15.12) 可得,

$$I=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_0^2=\frac{1}{2}\frac{E_0^2}{c\mu_0}$$

则电磁波的最大电场强度 (电矢量振幅) 为

$$E_0=\sqrt{2c\mu_0 I}=\sqrt{2\times 3.00\times 10^8\times 4\pi\times 10^{-7}\times 2.98}\ \mathrm{V\cdot m^{-1}}=47.4\ \mathrm{V\cdot m^{-1}}$$

(3) 由 $B_0=\mu_0 H_0$和式 (15.4),可得最大磁感应强度 (磁矢量振幅) 为

$$B_0=\frac{E_0}{c}=\frac{47.4}{3.00\times 10^8}\ \mathrm{T}=1.58\times 10^{-7}\ \mathrm{T}$$

对电磁波传播来说,不论用电场强度或磁场强度来计算平均能流密度,都是一样的.由于对人的视觉或照相底片等感光器件引起光学效应的,主要是电磁波中的电场矢量 $E$,因此,人们一般选用电磁波的电场矢量为光矢量,并将电场矢量振动称为光振动.

## 15.1.3 光源和发光机理

**1. 光源和光谱**

任何发光的物体都可以称为光源.太阳、白炽灯、日光灯、水银灯、蜡烛等都是人们日常生活中熟悉的光源.如果将光源发出的光通过三棱镜或某些特定装置,使光波中不同频率的光分开,便形成光谱.光谱中每一波长 (或频率) 成分所对应的光线称为光谱线 (简称谱线),谱线所对应的一定频率宽度称为谱线宽度 (简称线宽).实验结果表明,不同物质发射的光具有各自特有的光谱结构,它反映这种物质内在的微观结构和化学成分.通过对光谱的研究,人们可以得到原子、分子等的能级结构、能级寿命、电子的组态、分子的几何形状、化学键的性质、反应动力学等多方面物质结构的知识.因此,光谱分析是研究各类物质微观结构和化学成分的重要手段,光谱学成为光学的一个分支学科.

按照光谱学的知识,一般可以将光源分为两大类:一类是线谱光源,即光谱是由许多分立的光谱线所组成的,如气体放电灯、钠光灯、水银灯等属于这类光源;另一类是连续谱光源,这类光源发射的光的频率是连续的,如白炽的固体和太阳等属于这类光源.表 15.2给出了若干元素的普通光源和激光器的典型谱线.

表 15.2 若干元素的普通光源和激光器的典型谱线

| 元　　素 | 谱线波长/nm | 颜　　色 |
|---|---|---|
| 钠 (Na) | 589.0, 589.6 | 黄 |
| 汞 (Hg) | 404.7, 407.8 | 紫 |
| | 435.8 | 蓝 |
| | 546.1 (最强) | 绿 |
| | 577.0, 579.1 | 黄 |
| 镉 (Cd) | 643.8 | 红 |
| 氪 (Kr) | 605.7 | 橙 |
| 氢 (H) | 410.2 | 紫 |
| | 434.0 | 蓝 |
| | 486.1 | 青绿 |
| | 656.3 | 橙红 |
| 氦氖激光器 | 632.8 | 红 |

任何物体的发光过程都伴随着物体内部能量的变化. 从微观上看,物体发光的基本单元——原子或分子可以有各种不同的能量状态,当原子或分子从高能态跃迁到低能态时,就会释放出能量. 如果这种能量以光的形式释放,物体就发光了. 当然,要维持物体持续发光,外界必须不断地给物体提供能量 (如电能、化学能、核能、热能,或光辐射能等). 通常,按照发光单元激发方式的不同,常见发光过程有以下四类:

(1) 热辐射

借助电磁波传递能量的方式称为热辐射,它具有连续的辐射能谱. 温度较低时,物体主要辐射红外线;温度较高时,物体可以发射可见光、紫外线等,只要不断给物体加热来维持其一定的温度,物体就会持续发光. 太阳、白炽灯等都属于热辐射发光光源.

(2) 电致发光

电能直接转换成光能的现象称为电致发光. 闪电、霓虹灯以及半导体 pn结的发光过程等都是电致发光. 在这个过程中,各种气体放电管内的发光是靠电场来补给能量的. 利用电致发光原理,制造的发光二极管等各种电致发光器件是用途十分广泛的显示光源.

(3) 光致发光

用光激发引起的发光现象称为光致发光. 最普遍的应用是日光灯,它是通

过灯管内气体放电产生的紫外线激发管壁上的荧光粉而发射可见光的，故这种发光称为荧光．有些物质在光的作用下，可以在一段时间内持续发光，这种发光也称为磷光．夜光表上常用的磷光物质发光就属于这一类．

⑷ 化学发光

由于化学反应而发光的现象称为化学发光．例如，在燃烧过程中，腐物中的磷在空气中缓慢氧化而发出的光就属于化学发光．萤火虫发光是特殊类型的化学发光过程，一般称为生物发光．

2. 原子的发光模型

通常情况下，光源中处于低能态的原子在吸收外界能量后，便跃迁到能量较高但极不稳定的激发态，当它们从高能态自发跃迁回低能态时，原子便会将一份数值为 $\Delta E=h\nu$（两能态之间的能量差）的能量以光的形式辐射出来．这种发光机理称为自发辐射．常见光源的发光机理一般都是自发辐射．

一般说来，各原子从高能态向低能态跃迁所产生的自发辐射是彼此独立、随机和间歇性的．同一瞬间不同原子辐射的光或同一原子先后辐射的光，其频率、振动方向和初相位不可能完全相同．另外，自发辐射过程的时间非常短，约为 $10^{-9}\sim10^{-8}$ s 因此，光源中每个原子每次辐射的光实际上是一个持续时间极短、长度有限的光波列，如图 15.5所示．设一光波列的长度为 $\Delta l$，它等于光速 $c$ 与发光时间 $\Delta t$ 的乘积，即

$$\Delta l=c\Delta t \tag{15.14}$$

由傅里叶频谱分析可知，一个有限长度的波动可以表示为许多不同频率、不同振幅的简谐波的叠加．如果用 $\Delta\lambda$ 描述某一光波的单色性，如图 15.6所示，显然，$\Delta\lambda$ 越小，分布曲线越窄，反映该光波中所含不同频率的单色波成分越少，光的单色性越好．利用傅里叶分析，可得光波列长度 $\Delta l$ 和其单色性 $\Delta\lambda$ 之间的关系

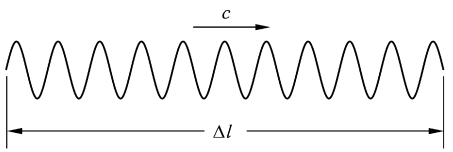



图 15.5

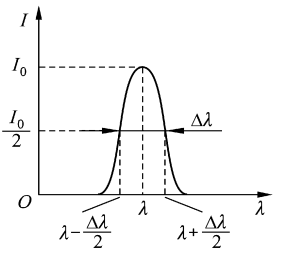



图 15.6

$$\Delta l=\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \tag{15.15}$$

$\Delta\lambda$ 越小，即光的单色性越好，则光波列的长度 $\Delta l$ 越长．对平面单色光来说，由

于光的单色性 $\Delta\lambda \to 0$,则波列长度 $\Delta l$ 趋于无限长. 但是,实际光源发出的光波列长度都是有限的,因此严格的单色光在实际中是不存在的. 也就是说,实际光波一般不是单一波长的光,而是包含若干波长的复色光. 通常为了获得单色性较好的光,常采用各种光谱分析装置从复色光中获取波长范围 $\Delta\lambda$ 很窄的准单色光.

同时,由于光源中原子自发辐射的随机性和独立性,各光波列的振动方向一般各不相同,相位也不相同,而且相位差不能保持恒定. 根据波的相干条件可知,一般两个以上的光源发出的光或同一光源不同时刻发出的光都是不相干的,它们相遇时不会发生干涉现象.

3. 用途广泛的新型光源

激光和同步辐射光是目前两种与常见光源具有不同的发光机理,并在科学技术、现代国防和国民经济建设中用途广泛的新型光源.

(1) 激光

激光是"受激辐射的光放大"的简称. 1960年美国加利福尼亚州休斯实验室的科学家梅曼发明了世界上第一台红宝石激光器,可以说是在人工制造光源历史上一次革命性变化. 激光很快成为一种性能优良、应用广泛的新型光源. 我们将在 §16.11 中对激光进行详细的介绍.

(2) 同步辐射光

同步加速器产生的辐射光,又称同步光,是 1947年美国纽约通用电气公司实验室首次发现的. 这种光具有强度大、方向性、偏振性和稳定性好、频率在从红外到软 X射线的范围内连续可调的特点. 同步辐射光的波长覆盖面大,配合单色仪,可得到单色性很好的光波,而且容易实现脉冲化,脉冲宽度可达到 0.1 ns或更小. 由于同步辐射光的优异性能,已成为性能良好的新型光源. 它的应用不仅遍及物理学、化学、生物学等基础科学,而且越来越广泛地用于材料、医学、药学、微量元素分析、微电子和精细机械技术等方面. 1990年初,我国在合肥建成同步辐射加速器. 1991年建成的北京正负电子对撞机 (BSRF) 可提供波长约从 $6\times10^{-2}\sim4\times10^{3}$ nm、辐射功率达 60 kW 的同步辐射光. 目前,同步辐射光源除了功率和相干性外,其它性质都超过了激光.




15.1 说光是电磁波有什么根据?

15.2 某无线电台发射的频率为 $650\times10^{3}$ Hz的电磁波,在空气中的波长是多少?在折射率为 n的介质中的波长是多少?

15.3 一电磁波沿 y轴的负方向传播,在某一时刻,电场指向 z轴的正半轴,大小为 100 V·m$^{-1}$,问此时磁场的大小和方向.

15.4 什么叫电磁波的能流密度?为什么引入平均能流密度的概念?平面简谐电磁波的平均能流密度是如何计算的?

15.5 太阳光照射到地球表面大气层外的辐射强度为 8.4 J·cm$^{-2}$·min$^{-1}$,试估算太阳光中电场和磁场的最大值.

15.6 巨蟹座星云距地球 6 500光年,被认为是由超新星爆炸产生的.公元 1054年,中国天文学家记录了当年的爆炸.这次爆炸实际上发生在大约距今多少年以前?

15.7 人的眼睛对什么光最灵敏?它的波长、频率、周期是多少?

# §15.2 光波的叠加

## 15.2.1 光波的叠加

在讨论机械波时曾经指出,几个波源产生的波,同时在一介质中传播,如果这几列波在空间某点处相遇,那么每一列波都将独立地保持自己原有的特性(频率、波长、振动方向等)传播,就像在各自的路径中,没有遇到其它波一样,即遵从波的独立传播原理.理论和实验证明,当两列或两列以上的光波在空间相遇时所表现的特性与机械波的特性一样,在共存空间内,各个光波的传播互不影响,也遵从波的独立传播原理.

在讨论机械波的叠加时曾经指出,在波的强度不是很大时,遵从波的叠加原理,在满足振动频率相同、振动方向相同和相位差恒定的相干条件时,将产生干涉现象.光波是电磁波,传播的是交变的电磁场,与机械波有着完全不同的物理本质.但是理论和实验研究表明,在光强不很大的情况下,光波的叠加也遵从波的叠加原理,即当两束以上光波在空间传播时,共存空间中的每一点都参与由各光波在该点引起的光振动,即空间任意一点的光振动是各光波在该点相遇引起光振动的矢量和:

$$\boldsymbol{E}(r,t)=\boldsymbol{E}_1(r,t)+\boldsymbol{E}_2(r,t)+\cdots+\boldsymbol{E}_n(r,t) \tag{15.16}$$

式中 r表示该空间点的位置.在两列满足振动频率相同、振动方向相同和相位差恒定的光波相遇时,与机械波一样,也会产生干涉现象,形成强度稳定分布的干涉图样.

下面,我们对光波的叠加进行较为详细的讨论.

设有两单色光波分别从点光源 $S_1$和 $S_2$发出,经过距离 $r_1$和 $r_2$,在真空中任一点 P相遇,如图 15.7(a)所示.两光波的光矢量分别为

需要全本请访问 www.ertongbook.com