

丁海铭 编著

旋光计量测试技术

XUANGUANG JILIANG
CESHI JISHU



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

旋光计量测试技术

丁海铭 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

旋光计量测试技术/丁海铭编著. —北京: 中国计量出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-5026-3041-6

I. 旋… II. 丁… III. 旋光仪—测量—技术 IV. TH744.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 083561 号

内 容 提 要

本书介绍了旋光计量测试的基础知识, 旋光测量仪器的工作原理、主要部件、检定校准及计量标准的建立, 常见旋光仪的使用方法、故障及维修, 旋光计量测试技术的应用及发展。

本书通俗易懂、实用性强, 可供仪器生产、使用、维修人员阅读参考, 也可为医药卫生、食品、化工等领域的分析工作者正确使用旋光仪及旋光糖量计提供指导, 同时也为计量检定人员正确进行旋光仪及旋光糖量计检定提供帮助。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*
787mm×1092mm 16 开本 印张 13.75 字数 332 千字

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

*
印数 1—2 000 定价: 36.00 元

前 言

旋光测定法以其简单便捷、高敏感度、非破坏性测量光学活性无机和有机化合物的优点,被广泛地应用于制糖、制药、石油、食品、化工等工业部门及有关高等院校和科研单位。正确了解和掌握旋光测定法,对于正确指导药物的研制生产及药理研究,食品生产过程的控制及确保产品质量,指导石油化工、香精、香料等生产具有重要意义。

旋光作为一种专一性的研究手段,被越来越多地与其他分析测试手段结合。旋光与分光光度计的联用,给旋光色散的研究开辟了新天地,使分子结构的区分、光学异构体的辨别有了良好的手段。与高效液相色谱法相联用,发展了高效液相色谱手性固定相法(HPLC-CSP),在对映体化合物的分离分析及制备方面具有无可替代的优势。伴随着分析联用技术的发展,传统的旋光测试技术必将得到更加广阔的发展空间。

从20世纪50年代初上海物理光学仪器厂生产出我国第一台旋光仪至今,我国的旋光仪生产技术得到了较大发展,目前我国生产的旋光仪器的部分性能甚至优于进口设备。我国的旋光测试技术也得到了广泛发展,旋光度国家基准也得到了完善,这一切都无疑对这项技术的进步提供了有力的保障。为了使大家能够更好地了解这项分析测试技术,掌握仪器的基本使用、维护、维修知识,并且对参加国家注册计量师的旋光测定计量人员提供专业指导,作者特编著此书。

由于旋光分析技术是一门跨学科的技术,特别是现在该技术的发展,要求从事本专业的人员对于分析化学、光学知识、电子测量技术、计算机技术、计量技术、不确定度等相关知识都要有所了解。本书编写过程中得到了上海物理光学仪器厂邵懿芳老师技术上的大力帮助,特别是本书第7章的编写,凝集了上海物理光学仪器厂众多技术人员的心血,谨此表示衷心的感谢。如果本书能够给准备进行或正在进行旋光类仪器检定的人员以及其他与旋光测定有关的人员带来帮助,作者将倍感荣幸。

由于作者学识和经验不足,书中错误、不妥之处在所难免,敬请广大读者及同行们批评指正。

编著者

2009年2月

目 录

第 1 章 光学基础知识	(1)
1.1 电磁波	(1)
1.2 光的研究与发展	(5)
1.3 光源及发光机理	(6)
1.4 光的电磁说	(8)
1.5 光的波粒二象性	(9)
1.6 自然光及其表示方法	(11)
1.7 偏振光及线偏振光	(11)
1.8 光的偏振的应用	(14)
第 2 章 旋光基础知识	(15)
2.1 旋光现象	(15)
2.2 产生偏振光的原理和方法	(15)
2.3 起偏和检偏	(27)
2.4 各种偏振态的光通过检偏器的现象	(28)
2.5 马吕斯定律	(29)
2.6 波片	(30)
2.7 椭圆偏振光的测量	(32)
第 3 章 旋光测量仪器的主要部件	(33)
3.1 旋光测量仪器的光源	(33)
3.2 旋光测量仪器的单色器	(50)
3.3 旋光测量仪器的法拉第调制器	(52)
3.4 旋光测量仪器的检测器件——光电倍增管	(56)
第 4 章 旋光测定基本概念及仪器的工作原理	(66)
4.1 旋光度、比旋光度	(66)
4.2 旋光仪的原理及测量技术的发展	(70)
4.3 变旋光作用	(71)
4.4 检糖计	(73)
4.5 圆盘旋光仪结构、工作原理	(74)
4.6 自动指示旋光仪结构、工作原理	(78)

4.7 旋光测试管	(80)
第 5 章 旋光仪的检定校准及计量标准的建立	(83)
5.1 旋光测量仪器的计量特性	(83)
5.2 旋光测量仪器的 ICUMSA 国际糖度标尺	(90)
5.3 旋光测量仪器的 OIML 国际建议	(93)
5.4 旋光测量仪器的量值传递系统	(99)
5.5 旋光测量仪器的国家计量检定规程	(103)
5.6 旋光测量仪器的计量标准器介绍	(111)
5.7 旋光测量仪器的不确定度分析	(116)
第 6 章 常见旋光仪的使用方法	(119)
6.1 目视旋光仪的使用方法及维护	(119)
6.2 国产度盘式自动指示旋光仪的使用方法及维护	(121)
6.3 国产投影式旋光仪的使用方法及维护	(124)
6.4 国产数字式旋光仪的使用方法及维护	(129)
第 7 章 常见旋光仪的故障及维修	(142)
7.1 国产旋光仪的发展	(142)
7.2 WXG-4 圆盘目视旋光仪的故障及维修	(144)
7.3 国产度盘式自动指示旋光仪的故障及维修	(146)
7.4 国产投影式旋光仪的故障及维修	(160)
7.5 国产数字式旋光仪的故障及维修	(177)
第 8 章 旋光计量测试技术应用	(197)
8.1 旋光测量的应用	(197)
8.2 圆二色谱	(200)
8.3 液相色谱-旋光联用技术的发展	(204)
8.4 制糖工业的旋光糖量分析	(208)
参考文献	(213)

第 1 章

光学基础知识

1.1 电磁波

1.1.1 电磁波的发现及应用发展

提起电磁波,我们不能不说说赫兹,他对人类最伟大的贡献是用实验证实了电磁波的存在。生于德国汉堡的赫兹,光年时代就对光学和力学实验产生了浓厚兴趣。19岁时考入德雷斯顿(Dresden)理工学院学工程,出于对自然科学的强烈探索欲望,次年就转入柏林大学,在物理学教授赫尔姆霍兹指导下学习。受赫尔姆霍兹的鼓励研究麦克斯韦电磁理论,当时的理论学说有麦克斯韦提出的电扰动可以产生辐射的电磁波,还有韦伯提出的电力与磁力可瞬时传送理论。哪个理论正确?强烈的求知欲使赫兹决定用实验来证明。赫兹根据电容器经由电火花隙会产生振荡原理,设计了一套电磁波发生器,赫兹将一感应线圈的两端接于产生器二铜棒上,铜棒点对点安放,中间仅仅留一个小缝隙。当感应线圈的电流突然中断时,感应高电压使电火花隙之间产生火花。瞬间后,电荷便经由电火花隙在锌板间振荡,频率高达数百万赫兹。由麦克斯韦理论,此火花应产生电磁波,于是赫兹设计了一简单的谐振环电磁波探测器检测此电磁波。他将铜线弯成圆形,线的两端点间留有小电火花隙。由于变化的电磁波在此线圈上产生感应电压,因此使电火花隙产生火花。探测器虽然距离振荡器 10m 远,实验中探测器的电火花隙间有小火花产生。赫兹在实验室远端的墙壁上覆有可反射电波的锌板,入射波与反射波重叠应产生驻波,他用探测器在距振荡器不同距离处侦测加以证实。赫兹由计算得出振荡器的频率及探测器测出驻波的波长,二者乘积即电磁波的传播速度。实验结果与麦克斯韦预测的一样,电磁波传播的速度等于光速。1887 年,赫兹的实验成功了,而麦克斯韦理论也因此得到进一步确认。赫兹在实验时曾指出,电磁波可以被反射、折射和如同可见光、热波一样被偏振。赫兹实验中采用的振荡器所发出的电磁波是平面偏振波,其电场平行于振荡器的导线,而磁场垂直于电场,且两者均垂直传播方向。1889 年在一次著名的演说中,赫兹明确指出,光是一种电磁现象。赫兹实验不仅证实麦克斯韦的电磁理论,更为无线电、电视和雷达的发展找到了途径。

自从电磁波发现以来,电磁波的应用得到了飞速的发展。1895 年俄国科学家波波夫发明了第一个无线电报系统。第一次以电磁波传递信息是 1896 年意大利的马可尼开始的。20 世纪无线电通讯更有了异常惊人的发展,1901 年,马可尼又成功地将讯号送到大西洋彼岸的美国。1914 年语音通信成为可能。1920 年商业无线电广播开始使用,20 世纪 30 年代发明了雷达,40 年代雷达和通信得到飞速发展。自 50 年代第一颗人造卫星上天,卫星通讯事业得到迅猛发展。如今电磁波已在通讯、遥感、空间控制、军事应用、科学研究等诸多方面得到广泛的应用。

实验证明,不仅无线电波是电磁波,光波、红外线、紫外线、X 射线、 γ 射线也都是电磁波。

所有这些电磁波仅在波长 λ (或频率 ν)上有所差别,而在本质上完全相同,且波长不同的电磁波在真空中的传播速度都是 $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\approx 3\times 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因为波的频率和波长满足关系式 $\nu\lambda=c$,所以频率不同的电磁波在真空中具有不同的波长。光波的频率比无线电波的频率要高很多,光波的波长比无线电波的波长短很多;而X射线和 γ 射线的频率则更高,波长则更短。目前人类通过各种方式已产生或观测到的电磁波的最低频率为 10^{-2}Hz ,其波长为地球半径的5000倍,而电磁波的最高频率为 10^{25}Hz ,它来自于宇宙的 γ 射线。

1.1.2 电磁波是横波

(1) 机械波的产生和传播

当物体作机械振动时,它的振动可以通过周围的媒质向外传播出去,即机械振动系统在介质中振动时使周围的介质也陆续地发生振动。这就是说,机械振动系统能够把振动向周围介质传播出去,从而形成机械波。

① 常见机械波现象

(a) 水面波

把一块石头投在静止的水面上,引起石子击水处水的振动,此处振动引起附近水的振动,附近水的振动又引起更远处水的振动,这样振动就向周围水面传播出去,形成水面波。

(b) 绳波

绳的一端固定,另一端用手拉紧并作垂直于绳子的振动,这端的振动引起邻近点振动,邻近点的振动又引起更远点的振动,这样振动就由绳的一端向另一端传播,形成了绳波。

(c) 声波

当音叉振动时,它的振动引起附近空气的振动,附近空气的振动又引起更远处空气的振动,这样振动就在空气中传播,形成了声波。

波动不是物质的传播而是振动状态的传播,介质中的各质元仅在它们各自的平衡位置附近振动,并没有随着振动的传播而移动过去。例如,在漂浮着树叶的静水里,当投入石子而引起水波时,树叶只在原位置附近上下振动,并不移动到别处去。波到哪里,哪里的介质就要发生振动,因而具有动能;同时由于介质元的变形,因而具有势能,因此波传到哪里,哪里就有机械能。这些机械能来自于波源。可见,波的传播过程即是振动的传播过程,又是能量传递过程。在不传递介质的情况下传递能量是波动的基本性质。

② 机械波产生的条件

机械波的产生,首先要有作机械振动的物体,它称为机械波的波源。例如,水面波波源是石头落水处的水;绳波波源是手拉绳的振动端;声波波源是音叉。其次,要有能够传播这种机械振动的介质。例如,水面波的传播介质是水;绳波的传播介质是绳;声波的传播介质是空气。

③ 横波与纵波

(a) 振动面:把通过波的传播方向并包含振动矢量在内的平面称为振动面。

(b) 横波:振动方向与波动传播方向垂直,波的振动方向对传播方向不具有对称性。如绳波。

(c) 纵波:纵波是通过波的传播方向所作的平面内的运动情况都是相同的,即质点的振动方向和传播方向平行,波的振动对传播方向具有对称性。

气体、液体内只能传播纵波,而固体内既能传播纵波又能传播横波。水面波是一种复杂的波,使振动质点回复到平衡位置的力不是一般弹性力,而是重力和表面张力。一般复杂的波可以分解成横波和纵波一起研究。

(2) 波长、波的周期和频率、波速

① 波长 λ : 同一波线上位相差为 2π 的二质点间的距离(即一完整波的长度)。

在横波情况下,波长可用相邻波峰或相邻波谷之间的距离表示。如图 1-1 所示。

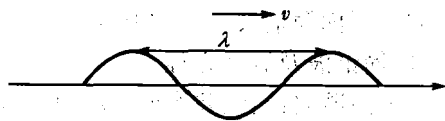


图 1-1 波长

在纵波情况下,波长可用相邻的密集部分中心或相邻的稀疏部分中心之间的距离表示。波长单位通常取 $m, cm, \mu m, nm, \text{\AA}^*$ 。

② 波的周期 T : 波前进一个波长距离所用的时间(或一个完整波形通过波线上某点所需要的时间)。波的频率 ν 为单位时间内前进的距离中包含的完整波形数目,可有 $\nu = 1/T$ 。

由波的形成过程可知,振源振动时,经过一个振动周期,波沿波线传出一个完整的波形,所以,波的传播周期(或频率)=波源的振动周期(或频率)。由此可知,波在不同的介质中其传播周期(或频率)不变。

③ 波速 v : 把一定振动状态(或相位)传播出去需要时间。单位时间内一定的振动相位所传播的距离称为波速(亦称相速),即波速描述了振动在介质中传播的方向和快慢程度。显然,波速的单位也是 $m \cdot s^{-1}$ 。可得 $v = \nu \lambda = \lambda/T$ 。

对弹性波而言,波的传播速度取决于介质的惯性和弹性,具体地说,就是取决于介质的质量密度和弹性模量,而与波源无关。

横波在固体中传播速度为:

$$v = \sqrt{\frac{N}{\rho}} \quad (1-1)$$

纵波速度为:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{液、气、固体中}) \quad (1-2)$$

对大多数金属, $B \approx Y$, 有

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (1-3)$$

式中: N ——固体切变弹性模量;

B ——介质的体积弹性模量;

Y ——杨氏弹性模量;

ρ ——介质质量密度。

在气体中,如果将气体视作理想气体,则声波的波速(称为声速)为:

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho} = \sqrt{\gamma R T / M}$$

式中: γ ——气体摩尔定压热容与摩尔定容热容之比值;

* $\text{\AA}$ 为非法定计量单位, $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ 。

p ——气体的压强；

R ——摩尔气体常量；

T ——热力学温度；

M ——气体的摩尔质量。

波动速度与质点振动速度是不同的物理量。

(3) 平面简谐波的波动方程

① 简谐波及波动方程

(a) 简谐波：当波源作谐振动时，介质中各点也都作谐振动，此时形成的波称为简谐波，又称余弦波或正弦波。

一般地说，介质中各质点振动是很复杂的，所以由此产生的波动也是很复杂的，但是可以证明，任何复杂的波都可以看作是由若干个简谐波迭加而成的。因此，讨论简谐波就有着特别重要的意义。

(b) 简谐波的波动方程：设任一质点坐标为 x ， t 时刻位移为 y ，则 $y=f(x,t)$ 即为波动方程。

② 波动方程建立

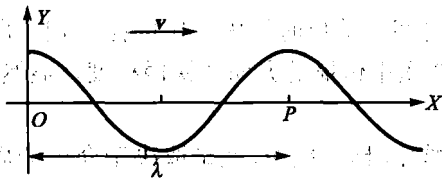


图 1-2 谐振动

如图 1-2 所示，谐振动沿 $+X$ 方向传播，与 X 轴垂直的平面均为同相面，任一个同相面上质点的振动状态可用该平面与 X 轴交点处的质点振动状态来描述，因此整个介质中质点的振动研究可简化成只研究 X 轴上质点的振动就行了，设原点处的质点振动方程为：

$$y_0 = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-4)$$

式中： A ——振幅；

ω ——角频率；

φ ——初相。

设振动传播过程中振幅不变（即介质是均匀无限大，无吸收的）为了找出波动过程中任一质点任意时刻的位移，在 OX 轴上任取一点 P ，坐标为 x ，显然，当振动从 O 处传播到 P 处时， P 处质点将重复 O 处质点振动。振动从 O 传播到 P 所用时间为 x/v ，所以， P 点在 t 时刻的位移与 O 点在 $(t-x/v)$ 时刻的位移相等，由此 t 时刻 P 处质点位移为：

$$y_P = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right]$$

同理，当波沿 $-X$ 方向传播时， t 时刻 P 处质点位移为：

$$y_P = A \cos \left[\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) + \varphi \right]$$

利用

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$v/\nu = \lambda \quad \left(\text{或} \frac{\nu}{v} = \frac{1}{\lambda} \right)$$

可以得到

$$y = A \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{v} \right) + \varphi \right] \quad (1-5)$$

$$y = A \cos \left[2\pi \left(\nu t \pm \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi \right] \quad (1-6)$$

$$y = A \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi \right] \quad (1-7)$$

此式称为平面简谐波方程。“-”表示波沿+X方向传播，“+”表示波沿-X方向传播。根据位相(或 $\omega=2\pi\nu$)关系,上式又可化为:

$$y = A \cos \left[\omega t + \varphi \pm \frac{2\pi}{\lambda} x \right] \quad (1-8)$$

③ 波动方程的物理意义

(a) x, t 均变化时, $y=y(x, t)$ 表示波线上各个质点在不同时刻的位移, $y=y(x, t)$ 为波动方程。

(b) $x=x_0$ 时, $y=y(x_0, t)$ 表示 x_0 处质点在任意 t 时刻位移。波动方程 $y=y(x, t)$ 变成了 x_0 处质点振动方程 $y=y(t)$ 。

(c) $t=t_0$ 时, $y=y(x, t_0)$ 表示 t_0 时刻波线上各个质点位移。波动方程 $y=y(x, t)$ 变成了 t 时刻的波形方程 $y=y(x)$ 。

(d) x, t 均一定, $y=y(x_0, t_0)$ 表示 t_0 时刻坐标为 x_0 处质点位移。

电磁波是变化的电场和变化的磁场的传播过程, 实验证明, 电磁波是横波。

1.2 光的研究与发展

光在我们的生活中无处不在, 例如太阳光、灯光、烛光等。人类对光的了解可分成四个阶段:

第一个阶段为 17 世纪中期, 人们迫切地了解“光的本性”, 进行了大量研究和探讨, 提出了微粒说和波动说。牛顿首先开始对光做有系统的研究, 他发现所谓的白光(white light)是由所有的色光(colored light)混合而成, 为了要解释这个现象, 牛顿创造了微粒学说。牛顿认为光由很小的微粒构成, 微粒以一定的速度从光源发出并射向空间, 并认为一束光就是一群光的微粒流, 这些微粒流进入人的眼睛, 便产生了光的感觉。微粒说能够简单、直观的解释光的直线传播、反射、折射等光学现象, 因此比较容易被人们所接受。但是, 用微粒学说还有好多现象无法解释, 于是惠更斯提出了光的波动说。惠更斯认为光是一种波动, 与水波、声波相似。光的波动说不仅能够解释微粒说所能阐明的光学现象而且能够说明微粒说不能阐明的光的干涉、衍射等光学现象, 因此光的波动说取代了微粒说。

第二个阶段为 19 世纪初, 杨氏(Thomas Young)利用波动理论成功地解释了大部分的光学现象如反射、折射和绕射等, 这其中包括 Malus 发现光的偏振现象。但是当时认为光是纵波, 无法解释光的偏振现象。1817 年, Young 认为光是横波, 偏振现象可以得到解释。Fresnel 承认光是横波, 解释了偏振光的干涉现象; Fresnel 还发现圆偏振光和椭圆偏振光, 建立了双折射理论。

第三个阶段是光的电磁论产生。在对电和磁利用的大量实践经验基础上, 建立了电磁波

的理论。1873年, 马克斯威尔发现光波是电磁波, 两者速度完全一样, 并且都不需要传播媒质, 其中它的电波和磁波是相依相存不能分开的, 电场(E)、磁场(H)与电磁波进行的方向(K)这三者呈相互垂直的关系(图 1-3)。并且原有的电磁波理论都可以很好地解释各种光现象。光的电磁论揭示了光的电磁本质, 使人们对光本性的认识大大提高了一步。

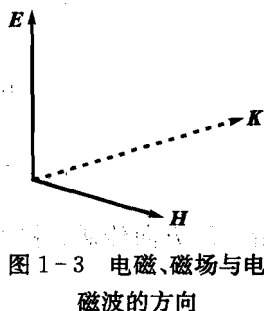


图 1-3 电磁、磁场与电磁波的方向

第四个阶段为光具有波粒二象性产生。对光的进一步认识发现电磁论无法解释很多新现象, 如光电效应、光化学作用等。20 世纪初, 爱因斯坦发现光的能量要用粒子学说才能解释, 它不同于牛顿时代的机械微粒, 而是有着崭新的内容, 这种光的粒子称作光子, 因而衍生出量子学, 即光同时具有波动及粒子两种特性的波粒二象性。

如今, 光的众多性质也被我们所熟知, 如光在同一种均匀介质中是沿直线传播的, 这是光的重要性质之一; 光遇到平面镜具有反射现象; 光在非同一种均匀介质中发生折射与全反射; 有两个振动情况总是相同的波源, 即相干波源可以产生光的干涉; 障碍物(或孔)的尺寸可以跟波长相比, 甚至比波长还小, 光线将可能偏离原来的传播方向, 发生明显衍射。

现代研究表明, 光波以 $30 \times 10^4 \text{ km/s}$ 的速度在真空中传播, 光在不同介质中的传播速度是不同的。虽然根据爱因斯坦的相对论, 理论上光速不可能超过 c , 但是随着科技的发展, 人们认识到了越来越多的现象, 1999~2001 年, 科学家们在极低的压强 (10^{-9} Pa) 和极低的温度 (10^{-9} K) 下, 得到一种物质的凝聚态, 光在其中的速度降低到 17 m/s , 甚至停止运动。也有报道称在实验中测得的光速达到 10^{11} m/s , 引起物理学界的争论。

1.3 光源及发光机理

1.3.1 光源种类

光源可以分成以下几类:

- (1) 冷光源: 利用化学能、电能或光能激发;
- (2) 热光源: 利用热能激发;
- (3) 磷光物质: 光源移去后仍能发光;
- (4) 荧光物质: 光源移去后, 停止发光。

1.3.2 普通光源(非激光光源)的发光机理

非激光光源的普通光源的发光机理是处于激发态的原子(或分子)的自发辐射, 原子发射的光波是一段频率一定、振动方向一定、有限长的光波(通常称为光波列), 见图 1-4。



图 1-4 普通光源的发光机理

1.3.3 单色光

波长在 380nm 到 780nm 之间的电磁波,能够被我们的眼睛感觉,称为可见光。不同波段的电磁波,刺激人眼睛引起颜色的感觉不同。表 1-1 为波段与视觉颜色的关系。

表 1-1 各种颜色的波长

波长范围/nm	颜色
760~630	红
630~600	橙
600~570	黄
570~500	绿
500~450	青
450~430	蓝
430~400	紫

人眼对各种不同波长的光有不同的灵敏度,对于相同光强度的不同颜色的可见光,人眼睛的视觉感受是不同的,波长为 555nm 的黄绿色光看上去最亮,黄光和青光较亮,而红光和紫光就很弱。也就是说,人眼睛对黄绿色光感觉最灵敏,对黄、青光也相当灵敏,而对红、紫光就不灵敏。视见函数曲线(图 1-5)可以表明这一点。视见函数曲线图中横坐标表示波长;纵坐标表示视见函数。视见函数最大值等于 1 时对应的波长为 555nm,在这个波长的两侧,曲线近乎对称地迅速下降,当波长为 700nm 时,对应的视见函数只有 0.0041;当波长为 400nm 时对应的视见函数只有 0.0004。

具有单一频率且恒定的一系列无限正弦(或余弦)光波称为单色光。任何光源所发出的光波都有一定的频率(或波长范围),在此范围内,各种频率(或波长)所对应的强度是不同的。波长所对应的波长范围越窄,光的单色性越好。

如图 1-6 所示,对一条谱线,最大光强 I_0 的一半处 ($I_0/2$) 的谱线的波长(或频率)的范围 $\Delta\lambda$ 称作该谱线的谱线宽度,谱线宽度是标志谱线单色性好坏的物理量。

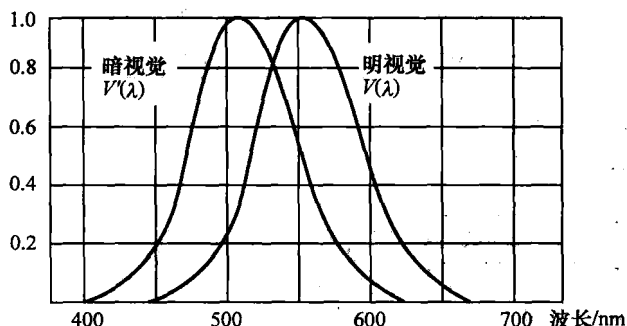


图 1-5 视见函数曲线

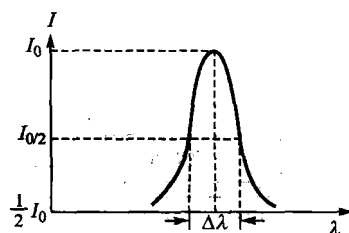


图 1-6 单色光谱线

1.4 光的电磁说

光的干涉和衍射现象无可怀疑地证明了光是一种波。到 19 世纪中期,光的波动说已经得到公认。但是光波的本质问题仍然没有解决。人们总是习惯于按照机械波的模型把光波看成是在某种弹性介质里传播的振动。到了 19 世纪 60 年代,英国物理学家麦克斯韦提出了电磁波的理论,认为变化的电场和变化的磁场联系在一起形成的统一的电磁场,能以波的形式从它产生的地方向四周传播,是电磁场中电场强度 E 和磁场强度 H 的周期性变化在空间的传播,并且从理论上得出了电磁波的传播速度跟实验测得的光速相同。在这个基础上,麦克斯韦提出光是一种电磁波。这就是光的电磁说。1888 年,赫兹用实验证实了电磁波的存在,并且证明了电磁波也跟光波一样具有反射、折射、干涉、衍射等性质。他还通过干涉实验测出了一定频率的电磁波的波长,算出了电磁波的波速,结果跟麦克斯韦关于电磁波的波速等于光速的预言符合得相当好,这就证明了麦克斯韦的光的电磁理论是正确的。电磁场本身就是一种物质,因此光(电磁波)的传播并不需要别的物质作为传播介质。

将电磁波按频率或波长的顺序排列起来就构成电磁波谱,见表 1-2。图 1-7 为电磁波谱图。

表 1-2 电磁波谱

电磁波谱	频率范围/Hz	空气中波长	作用类型
宇宙或 γ 射线	$>10^{20}$ (能量 MeV)	$<10^{-12}$ m	原子核
伦琴射线(X 射线)	$10^{20} \sim 10^{16}$	$10^{-3} \sim 10$ nm	内层电子跃迁
远紫外光	$10^{16} \sim 10^{15}$	$10 \sim 200$ nm	外层电子跃迁
紫外光	$10^{15} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$200 \sim 380$ nm	外层电子跃迁
可见光	$7.5 \times 10^{14} \sim 4.0 \times 10^{14}$	$380 \sim 780$ nm	外层价电子跃迁
近红外光	$4.0 \times 10^{14} \sim 1.2 \times 10^{14}$	$0.78 \sim 2.5$ μ m	分子振动,振动跃迁
红外光	$1.2 \times 10^{14} \sim 10^{11}$	$2.5 \sim 1000$ μ m	振动或转动跃迁
微波	$10^{11} \sim 10^8$	$0.3 \sim 10^{-3}$ m	分子转动;电子自旋;转动跃迁
无线电波	$10^8 \sim 10^5$	$0.3 \sim 1000$ m	原子核自旋,旋转跃迁
声波	$20000 \sim 30$	$15 \sim 10^6$ km	分子运动

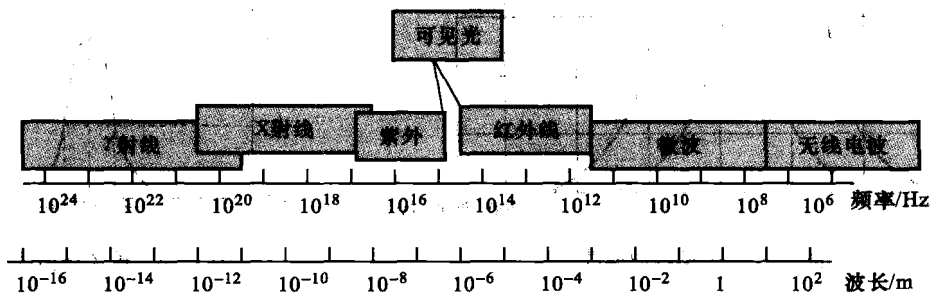


图 1-7 电磁波谱图

除可见光以外,相邻两个波段间都有重叠。随着科学技术的不断进步相信电磁波谱的两端还将不断扩展,电磁波的应用也将进一步扩展。

按照光的电磁理论,光波就是电磁波,电磁波是横波,所以光波也是横波,其电矢量 E 和磁矢量 H 互相垂直,且两者均垂直于光的传播方向。从视觉和感光材料的特性上看,引起视觉和化学反应的是光的电矢量,所以把电矢量 E 称作光矢量。用电矢量振动方向代表光的振动方向,将电矢量 E 和光的传播方向所构成的平面称为光振动面。

光是横波,并可用波长、波幅来表示。波长表示能量大小,波幅表示电磁波的强度。在光波中每一点都有一振动的电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H 。 E, H 及光波传播方向 K 的方向是互相垂直的,如图 1-8 所示。



图 1-8 光是横波

在除激光外的一般光源中,光源发射的光是由大量原子或分子辐射构成的,由于热运动和辐射的随机性,不可能把一个原子或分子所发射的光波分离出来,所有光矢量不可能保持一定的方向。原子中一次量子跃迁的持续发光时间的数量级为 10^{-8}s ,是一个有限长的正弦波列,波列长度为 $0.03\sim 3\text{m}$ 。一般来说,在 10^{-6}s 内各个方向光矢量的时间平均值相等,即大量原子或分子发射的光的振动面出现在各个方向的几率是相同的;同时每个分子或原子发射的光波是独立的,而且是以极快的不规则的次序取所有可能的方向,每个分子或原子发光是间歇的,不是连续的。平均地讲,在一切可能的方向上,都有光振动,并且没有一个方向比另外一个方向占优势,即在一切实在可能方向上光矢量振动又相等。普通光源中,各个原子的激发和辐射参差不齐,是一种随机过程,可用图 1-9 表示。

非相干光相遇叠加,如图 1-10,可以用下式表示:

$$I \propto E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})$$

其中 $\cos(\varphi_{20} - \varphi_{10}) = 0$, 所以:

$$I \propto E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 \quad (1-9)$$

或

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-10)$$

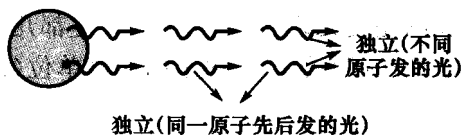


图 1-9 普通光源中各个原子的激发和辐射

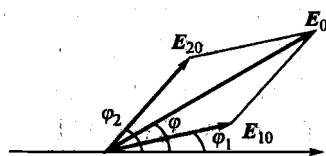


图 1-10 非相干光相遇叠加

1.5 光的波粒二象性

1.5.1 光的波粒二象性

现代研究知道,光是一种电磁波,它具有二象性,即波动性和微粒性。光的衍射、干涉、偏振等现象以无可辩驳的事实表明光是一种波,即其波动性,满足 $\nu = c/\lambda$, 波长 λ 越长的光,频率 ν 越低,波数越小。

(1) 康普顿效应

在研究电子对 X 射线的散射时发现,有些散射波的波长比入射波的波长略大。康普顿认为这是因为光子不仅有能量,也具有动量。光子与散射物外层电子弹性碰撞后光子沿 θ 角散射出去,能量被原来速度近似为 0 的电子夺去一部分,因而光子能量减小为 $h\nu$,因此散射光波长大于入射光波长。还有一部分光子与束缚得较紧密的内层电子相撞,反射能量没有损失,这就是保持 λ_0 不变的散射光。实验结果证明这个设想是正确的,这就是康普顿效应,它证明了光具有粒子性。

(2) 光电效应

光电效应由德国物理学家赫兹于 1887 年发现,对发展量子理论起了根本性作用,在光的照射下,使物体中的电子脱出,发射出来的电子叫做光电子。光电效应分为光电子发射、光电导效应和光生伏打效应,这类光致电变的现象被统称为光电效应(photoelectric effect)。前一种现象发生在物体表面,又称外光电效应,后两种现象发生在物体内部,称为内光电效应。

爱因斯坦的光子假设及其光电方程:

单个光子的能量:

$$E=h\nu \quad (1-11)$$

光电效应方程:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W \quad (1-12)$$

光波长小于某一临界值时方能发射电子,即极限波长,对应的光的频率叫做极限频率 ν_0 :

$$\nu_0 = W/h \quad (1-13)$$

临界值取决于金属材料,而发射电子的能量取决于光的波长而与光强度无关,即最大初动能与入射光的强度无关,大于最大初动能后,发射的电子数正比于入射光的强度,这一点无法用光的波动性解释。

还有一点与光的波动性相矛盾,即光电效应的瞬时性,弛豫时间小于 10^{-9} s,按波动性理论,如果入射光较弱,照射的时间要长一些,金属中的电子才能积累住足够的能量,飞出金属表面。可事实是,只要光的频率高于金属的极限频率,光的亮度无论强弱,光子的产生都几乎是瞬时的,不超过 10^{-9} s。正确的解释为:光必定是由与波长有关的严格规定的能量单位(即光子或光量子)所组成,这种解释是爱因斯坦提出的。

光电效应里,电子的射出方向不是完全定向的,只是大部分都垂直于金属表面射出,与光照方向无关,光是电磁波,但是光是高频震荡的正交电磁场,振幅很小,不会对电子射出方向产生影响。

光电效应和康普顿效应都用无可辩驳的事实表明光是一种粒子。光的发射和吸收主要表现为微粒性,满足 $E=h\nu$,其中, h 是普朗克(Plank)常数, $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。显然,光子能量 E 与相应光的波长 λ 成反比,而与频率 ν 成正比。

1.5.2 正确理解波粒二象性

波粒二象性中所说的波是一种概率波,对大量光子才有意义。波粒二象性中所说的粒子,是指其不连续性,是一份能量。

(1) 个别光子的作用效果往往表现为粒子性;大量光子的作用效果往往表现为波动性。

(2) ν 高的光子容易表现出粒子性; ν 低的光子容易表现出波动性。

(3) 在传播过程中往往表现出波动性; 在与物质发生作用时往往表现出粒子性。

(4) 从光子的能量 $E=h\nu$, 光子的动量表示式 $p=h/\lambda$ 也可以看出, 光的波动性和粒子性并不矛盾; 表示粒子性的粒子能量和动量的计算式中都含有表示波的特征的物理量——频率 ν 和波长 λ 。结合波速公式 $c=\lambda\nu$, 还可以得出 $E=pc$ 。

1.6 自然光及其表示方法

1.6.1 自然光

自然光是一切普通光源所发出的光, 如太阳光和灯光等。自然光在一切方向上都具有光振动, 而且是光在垂直传播方向的平面内的任何方向都有振幅相同的光振动, 即各个方向的光矢量振动相等, 自然光中 E 振动的轴对称分布如图 1-11 所示。

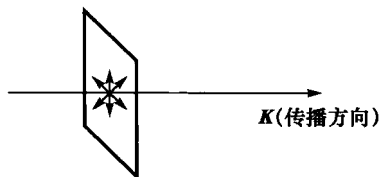


图 1-11 自然光

1.6.2 自然光表示方法

光波的振动方向与其前进方向互相垂直, 自然光有无数个与光的前进方向互相垂直的光波振动面。在任意时刻, 可以把各个光矢量分解成两个互相垂直的光矢量, $I_x = I_y = I/2$, 如图 1-12, 图 1-13 所示。为了简明表示光的传播, 常用和传播方向垂直的短线表示图面内的光振动, 而用点表示和图面垂直的光振动。对自然光, 短线和点均等分布, 以表示两者对应的振动相等和能量相等。

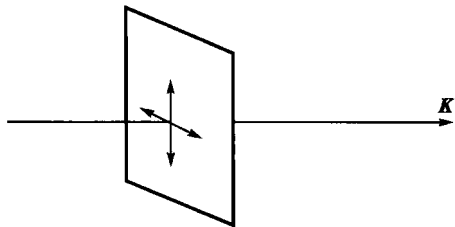


图 1-12 自然光

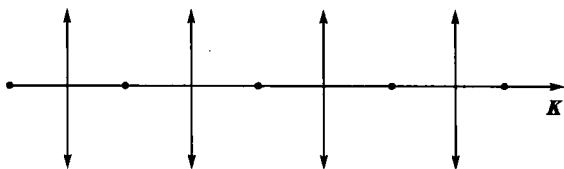


图 1-13 自然光

由于自然光中光矢量的振动的无规则性, 所以互相垂直的光矢量之间没有固定的位移差。自然界中除了从光源直接发出的光, 通常看到的绝大部分光都是偏振光。

1.7 偏振光及线偏振光

1.7.1 偏振光种类

偏振是振动方向对传播方向的不对称性, 是波的传播方向的一种空间取向的作用, 它是横波区别于其他纵波的一个最明显的标志, 只有横波才有偏振现象。按照光的偏振状态 (polarization state) 不同, 可分为五大类 (图 1-14):