



OPTICAL SENSORS AND LIGHT MEASUREMENT

光學感測與測量

安毓英 曾小東 編著

內容簡介

本書以光纖感測技術與雷射感測技術為重點內容。第1章～第3章介紹了光電子學方面的基礎內容。將光波的性質及基本參數與光學感測的基本原理相結合、將光學上的基礎內容與光學的最新進展結合，為學習光學感測技術提供了必要的基礎知識，也為靈活運用這些基本知識進而構思光學感測與測量方法提供了理論準備。第4章討論了光電檢測技術的基本原理。第5章討論光纖感測技術，重點是光纖感測器的基本概念、光調製技術原理，以及信號檢測處理方法。第6章精選了一些光學感測與測量方面的最新進展情況。

本書可作為工學院電子系或研究所使用的教科書或參考書。

前 言

光學感測與測量是一門內容十分廣泛的技術領域，本書以光電檢測技術、光纖感測技術與雷射感測技術為重點內容。對於以電子技術為主的測控工程與儀器主修的大專院校學生，本書將幫助他們完成從無線電波段向光波段拓展的任務，在內容安排上進行了精心設計。

第1章～第3章，介紹了光電學方面的基礎內容，一方面將光波的性質及基本參數與光學感測的基本原理相結合；另一方面將光學上的基礎內容與光學的最新進展有效地結合起來。例如，光的繞射與傅立葉光學概念相結合，光的干涉與全像技術相結合，光的反射與光纖技術相結合等等；同時有選擇地介紹一些有實用意義的基本知識，如：紅外輻射、雷射特性、光的調製等等。這些內容為學習光學感測技術提供了必要的基本知識，也為靈活運用這些基本知識進而構思光學感測與測量方法提供了創造思維的基本理論準備。

第4章討論了光電檢測技術，重點介紹了各種光電探測器的工作原理、性能參數、雜訊特性、工作電路，以及直接探測和光外差探測的技術原理。

第5章討論光纖感測技術，重點是光纖感測器的基本概念、光纖中光調製技術原理、信號檢測處理方法，以及分佈式光纖感測器。在本章中我們也介紹了光纖溫度感測器方面的科學研究成果。

第6章精選了光學感測領域的一些最新進展。例如：全像術、莫爾法、散斑法，以及雷射多普勒技術等等。

本書編寫過程中盡量避免繁難的數學推導，強調物理概念闡述，亦適合於同學自學。

編者

目 錄

CHAPTER 1 光學感測的基礎知識——光的性質及其描述

	1
第一節 光的古典本質是光頻電磁波	3
第二節 光的量子本質是光子	8
第三節 單色平面波和球面波	12
第四節 單色波的干涉和光的同調性、全像術	30
第五節 光的繞射和傅立葉光學	48
第六節 光的反射和光纖傳輸原理	55
第七節 光的吸收和散射	64
第八節 輻射度量學和光度學	72
第九節 起偏器、檢偏器、波片	81
第十節 光調製器	88
習題思考題	105

CHAPTER 2 物體的熱輻射 107

第一節 絕對黑體及其輻射定律	109
第二節 黑體輻射的簡易計算	116
第三節 實際物體的熱輻射	123
習題思考題	132

CHAPTER 3 雷射原理及常用雷射器 133

第一節 雷射基礎	136
第二節 雷射的應用特點	149
第三節 常用的固體和氣體雷射器	155

第四節 半導體雷射器和發光二極體	160
習題思考題	175

CHAPTER 4 光電檢測 177

第一節 光電探測器的物理效應	179
第二節 光電探測器的性能參數	190
第三節 光電探測器的雜訊	196
第四節 光電導探測器——光敏電阻	203
第五節 pn 結光伏探測器的工作模式	213
第六節 矽光電池——太陽電池	217
第七節 光電二極體	229
第八節 光熱探測器	246
第九節 直接探測系統的性能分析	252
第十節 前置放大器的噪音特性	257
第十一節 週期性微弱光信號的相關探測——鎖相放大器	262
第十二節 光頻外差探測的基本原理	268
習題思考題	281

CHAPTER 5 光纖感測技術 283

第一節 概述	285
第二節 光纖的傳輸特性	291
第三節 單模光纖的偏振與雙折射	312
第四節 光纖的光波調製技術	318
第五節 光纖溫度感測器	336
第六節 光纖壓力感測器	355
第七節 光纖流量流速感測器	365
第八節 光纖位移感測器	370
第九節 光纖電磁參數感測器	384
第十節 光纖陀螺	395

第十一節 分佈式和複用式光纖感測器	406
第十二節 光纖連接耦合技術	419
習題思考題	427

CHAPTER 6 光學感測技術 429

第一節 雷射繞射法	431
第二節 雷射掃描法	446
第三節 全像術法	460
第四節 莫爾法	469
第五節 散斑法	479
第六節 雷射測距	492
第七節 雷射都卜勒測速技術	498
習題思考題	506

Chapter 1

光學感測的基礎知識

——光的性質及其描述

眾所周知，光學感測與測量技術是光電子技術的重要分支之一。所謂光學感測與測量，是指以光波為手段感知提取、轉換傳輸，以及標定測量各種待測信號的技術。因此，在討論光學感測與測量的具體原理之前，首先必須認識作為信號載體的光波的性質和特點。

本章將簡要討論光的主要性質及其描述方法。在這些基礎知識的討論中，我們不但要注意光學技術的最新進展，更要特別留意深入理解光作為信號載體所具有的基本功能，以及怎樣靈活應用光的這些基本功能來達到提取、傳送信號的目的。

第一節 光的古典本質是光頻電磁波

19 世紀 60 年代，馬克士威（Max Well）建立了古典電磁理論，把光學現象和電磁現象聯繫起來，指出光也是一種電磁波，即光頻範圍內的電磁波，從而產生了光的電磁理論。光的電磁理論是光電學的重要基礎之一。

馬克士威電磁理論的出發點是反映電磁場普遍規律的方程組

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1-1)$$

及物質方程

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1.1-2)$$

式中 $\mathbf{E}$ 是電場強度向量， $\mathbf{D}$ 是電位移強度向量， $\mathbf{H}$ 是磁場強度向量， $\mathbf{B}$ 是磁感

應強度向量， ρ 是自由電荷密度， $\mathbf{J}$ 是自由電荷電流密度， ε 為電介常數（亦稱電容率）， μ 為磁導率， σ 為電導率。 ε_0 和 μ_0 則為真空中的電介常數和磁導率，而且

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= 8.8542 \times 10^{-12} \quad \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2 \text{ (F/m)} \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2 \text{ (H/m)}\end{aligned}$$

在絕大多數的光學問題中，遇到的物質是電介質，於是 $\rho=0$ ， $\mathbf{J}=0$ ， $\mu_r=1$ 。方程組（1.1-1）式和（1.1-2）式簡化為

$$\left. \begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0\end{aligned} \right\} \quad (1.1-3)$$

和

$$\left. \begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H}\end{aligned} \right\} \quad (1.1-4)$$

式中算符

$$\nabla = \mathbf{x}_0 \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{y}_0 \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{z}_0 \frac{\partial}{\partial z}$$

稱為罕米吞（Hamilton）算符， $\mathbf{x}_0$ 、 $\mathbf{y}_0$ 、 $\mathbf{z}_0$ 分別為 x 、 y 、 z 座標軸的單位向量。

從方程（1.1-3）和（1.1-4）式出發，經過標準的向量運算程序可以得到電磁場運動方程

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} - \varepsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1-5)$$

式中算符

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

稱為拉卜拉士算符。與我們熟悉的機械波、聲波波動方程式

$$\nabla^2 (\quad) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\quad) = 0$$

相比較，(1.1-5)式實質上是電磁波動方程，而且電磁波的傳播速度應為

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu_0}} \quad (1.1-6)$$

在真空中， $\varepsilon = \varepsilon_0$ ，並用符號 c 代替 v ，即

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (1.1-7)$$

代入 μ_0 、 ε_0 的值，

$$c = 2.99794 \times 10^8 \text{ m/s}$$

這個數值與實驗中測定的真空中光速的數值非常接近。馬克士威曾以此作為重要依據提出光的電磁理論，並預言光是光頻電磁波。我國國家標準 GB3102.6-82 中取

$c = (2.99793458 \pm 0.00000012) \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

顯然， v 和 c 的關係是

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \equiv \frac{c}{n} \tag{1.1-8}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \tag{1.1-9}$$

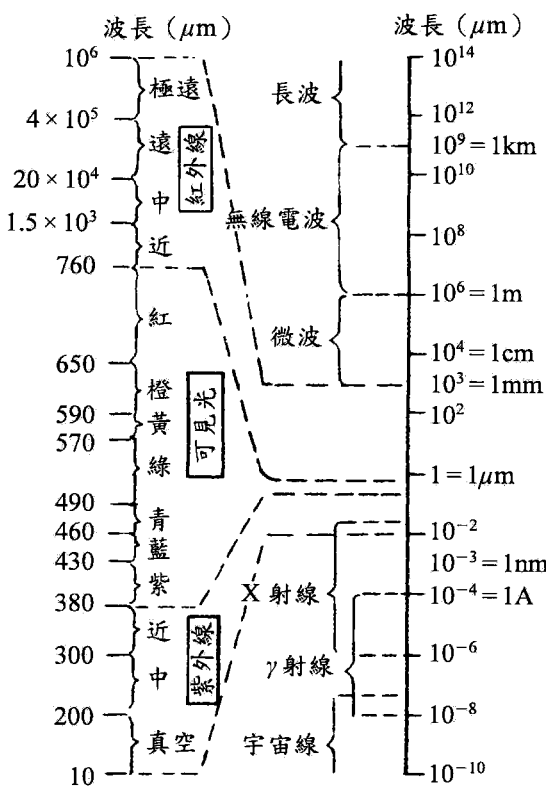


圖 1.1 電磁頻譜圖

稱為介質折射率，因為 $\epsilon_r > 1$ ，所以總有 $v < c$ ，即介質中的光速總是小於真空中的光速。詳細的研究發現，如果 n 為實數，對應於我們常說的透明介質；如果 n 為複數， $n = n' + ik$ ，對應於非透明介質，虛部描述介質對光的吸收損耗。

通常介質折射率 n 是頻率的函數，即 $n=n(\omega)$ ，表明不同頻率的電磁波具有不同的傳播速度，稱為介質的色散效應。

現在已經知道，無線電波、光波、X 射線、 γ 射線都是電磁波，本質上完全相同，只是頻率或波長不同而已。我們按照波長或頻率把這些電磁波排列成譜，稱為電磁頻譜，如圖 1.1 所示。

注意到下面的換算因素

單位	符號	換算因素
微米	μm	10^{-6}m
奈米	nm	10^{-9}m

通常所說的光頻範圍頻譜，包括紫外線、可見光和紅外線，波長範圍約從 $10\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$ 。從圖 1.1，可見光和紫外線又可細分如下：

$$\text{紅外線 (1 mm} \sim 0.76 \mu\text{m)} \left\{ \begin{array}{ll} \text{遠紅外} & 1\text{ mm} \sim 20 \mu\text{m} \\ \text{中紅外} & 20 \sim 1.5 \mu\text{m} \\ \text{近紅外} & 1.5 \sim 0.76 \mu\text{m} \end{array} \right.$$

$$\text{可見光 (760} \sim 380 \text{ nm)} \left\{ \begin{array}{ll} \text{紅色} & 760 \sim 650 \text{ nm} \\ \text{橙色} & 650 \sim 590 \text{ nm} \\ \text{黃色} & 590 \sim 570 \text{ nm} \\ \text{綠色} & 570 \sim 490 \text{ nm} \\ \text{青色} & 490 \sim 460 \text{ nm} \\ \text{藍色} & 460 \sim 430 \text{ nm} \\ \text{紫色} & 430 \sim 380 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{紫外光 (400} \sim 10 \text{ nm)} \left\{ \begin{array}{ll} \text{近紫外} & 380 \sim 300 \text{ nm} \\ \text{中紫外} & 300 \sim 200 \text{ nm} \\ \text{真空紫外} & 200 \sim 10 \text{ nm} \end{array} \right.$$

光波長 λ_0 ，光頻率 ν 和光速 c 之間的基本關係是

$$c = \lambda_0 \nu \quad (1.1-10)$$

這個關係適用於真空情況。在介質中，

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{1}{n} \left(\frac{c}{\nu} \right) = \frac{\lambda_0}{n} \quad (1.1-11)$$

頻率不變，波長變短。

第二節 光的量子本質是光子

馬克士威的電磁理論在處理有關光的傳播問題而獲得巨大成功的時候，人們曾誤認為這個理論可解決所有問題。但當人們用這個理論解決光與物質相互作用（例如：黑體輻射問題，下一章要專門討論）的問題時，例如：解釋光電效應時，卻完全失敗了。這個無情的事實表明，在一定的範圍和條件下，認為光是光頻電磁波才是正確的；當這個範圍和條件不成立時，仍然認為光是電磁波就不正確了。

20 世紀初，愛因斯坦（Einstein）建立了光的量子理論，認為光不僅是一種電磁波動，而且是一種粒子，即光是由一份一份的光量子——光子組成的，光是以速度 c 運動的光子流。

光子亦可理解為電磁場能量子，和其他基本粒子一樣，具有能量、動量和質量。它的粒子屬性（能量、動量和質量等）和波動屬性（頻率、波長、偏振等）有著內在的密切聯繫，並可簡要歸納如下：

1. 光子的能量 E

光子的能量 E 與光波的頻率 ν 相對應，即

$$E = h\nu \text{ (J)} \quad (1.2-1)$$

式中 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒 (J·s)，稱為蒲朗克常數。該式表明，頻率 ν 愈高，相應的光子能量就愈大。比較 $\nu_1 = 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ($\lambda_1 = 1 \mu\text{m}$)， $\nu_2 = 3 \times 10^{10}$

Hz ($\lambda_2 = 1 \text{ cm}$) 相應的光子能量，將相差 1 萬倍。由此我們就不難理解為什麼在無線電波中不強調量子性，而在光波段卻很強調量子性？在無線電波段，由於電磁場量子的能量很小，從而有限能量所包含的量子數就很巨大，在巨大的量子數中多一個少一個影響不大，因而量子性就不明顯，主要表現為波動性；相反地，在光波段，光子能量變得很大，相應能量所包含的光子數目就變少，這時多一個少一個光子影響就大了，表現出明顯的量子性。

考慮到能量單位焦耳與電子伏 (eV) 的換算關係

$$1 \text{ J} = 0.6242 \times 10^{19} \text{ eV}$$

光子能量 E 又可表示為

$$E = 0.6242 \times 10^{19} h \nu \text{ (eV)} \quad (1.2-2)$$

按照光波頻率和光子能量大小，電磁波譜又可有另一種表示，如表 1.1 所示。

表 1.1 用光子 (量子) 能量區分的電磁波譜

輻射類型	頻率 (Hz)	波 長	量子能量 (eV)
波區 { 無線電波 微 波	$< 10^9$ $10^9 \sim 10^{12}$	$> 300 \text{ mm}$ $300 \sim 1 \text{ mm}$	< 0.000004 $0.000004 \sim 0.004$
區 { 紅外線 可見光 紫外線	$10^{12} \sim 4.3 \times 10^{14}$ $4.3 \times 10^{14} \sim 5.7 \times 10^{14}$ $5.7 \times 10^{14} \sim 10^{16}$	$1000 \sim 0.76 \mu\text{m}$ $0.76 \sim 0.38 \mu\text{m}$ $0.38 \sim 0.01 \mu\text{m}$	$0.004 \sim 1.7$ $1.7 \sim 2.3$ $2.3 \sim 40$
射線區 { X 射線 γ 射線	$10^{16} \sim 10^{19}$ $> 10^{19}$	$10 \sim 0.03 \text{ nm}$ $< 0.03 \text{ nm}$	$40 \sim 4000$ > 40000

2. 光子的質量 m

愛因斯坦相對論有兩個有名公式

$$E = m c^2 \quad (1.2-3)$$

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (1.2-4)$$

由 (1.2-3) 式可知，光子的運動質量

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \nu}{c^2} \quad (1.2-5)$$

不同頻率的光子質量不同，頻率愈高，質量愈大。從 (1.2-4) 式可見，要使 m 保持有限，光子靜止質量 m_0 必須為 0。這和光子以 c 速度運動的前提是一致的，因為不可能有靜止的光子存在。

3. 光子的動量 P

有質量 m 和運動速度 c 的粒子一定有動量，光子的動量

$$P = |\mathbf{P}| = m c = \frac{h \nu}{c^2} \cdot c = \frac{h \nu}{c} \quad (1.2-6)$$

利用 (1.1-10) 式，光子動量又可表示為

$$P = \frac{h}{\lambda_0} \quad (1.2-7)$$

說明光的波長愈短，光子的動量愈大，計入光子的運動方向，光子動量的向量形式為

$$\mathbf{P} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot \mathbf{n}_0 = \hbar \mathbf{k}$$

式中 $\hbar \equiv h/2\pi$ ， $k = |\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda_0$ ，在波動光學裡稱為單色波的波數，而 $\mathbf{k} = k \mathbf{n}_0$ 則稱為單色波的波向量，表示波在前進方向上，單位距離產生的相位變化， $\mathbf{n}_0$ 是

前進方向的單位向量。顯然，頻率愈高或波長愈短的光波，其波數 k 愈大，相應的光子的動量愈大（關於波向量的詳細討論，將在下一節進行）。

4. 光子具有兩種可能的獨立偏振態，有時稱為兩種內在自由度，對應於光波場振幅向量的兩個獨立偏振方向

5. 光子簡併度 $\bar{n}$

與其他古典粒子一樣，光子的運動狀態完全由其座標 (x, y, z) 和動量 (P_x, P_y, P_z) 確定。但光子作為微觀粒子，與古典粒子的根本區別在於：光子的運動受量子力學的測不準關係制約。位置測得越準確，動量就越測不準。如果限制光子三維運動，測不準關係為

$$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z \leq h^3$$

描述三維運動粒子運動狀態的空間稱為六維相空間。在六維相空間中，一個光子狀態所占有的相空間單元為 h^3 ，稱為相格。相格是相空間中用任何實驗所能區分的最小尺度。光子的某一運動狀態只能定域在一個相格中，但不能確定它在相格內部的對應位置，因此，處於同一相格內的光子具有相同的運動狀態，或者說，同一相格中的光子是不可區分的。

同一相格中（同一運動狀態中）的光子平均數 $\bar{n}$ 目定義為光子簡併度。光子簡併度 $\bar{n}$ 是表示光特徵的一個重要物理量。我們通常所接觸的光源所發出的光，其光子簡併度 $\bar{n} \ll 1$ ，而雷射所發出的光，其光子簡併度 $\bar{n} \gg 1$ 。這說明：普通光源在很寬的頻率範圍，以及全空間方位上發光，因而光分佈在大量的光子狀態中，即使總的光能量比較大，但平均到一個光子狀態中的光子數目卻微乎其微了。相反地，雷射器只在特定的方向和特定的頻率上發光，因而光子分佈在少數甚至單一的光子狀態中，所以，即使總的光能量不比普通光源大，但平均到一個光子狀態中的光子數目卻很巨大了。以後我們會知道，雷射正是以這一特性把光學和無線電波電子學緊密地聯繫到一起，產生了現代光電學這一新興學科。因為無線電也是量子（電磁場量子）簡併度 $\bar{n} \gg 1$ 的，而一個電火花所發射的輻射卻是 $\bar{n} \ll 1$ 的。