

雷射原理教程

沈 柯 著



亞東書局印行

雷射原理教程

沈 柯著

亞東書局印行

雷射原理教程

著 者— 沈柯

出版及

發行者—亞東書局

台北市新生南路三段 96 — 1 號 2 樓

電話：3621130 、3622606

登記證—行政院新聞局局版台業字第 0768 號

版 次—中華民國七十九年三月一版

總經銷—學英文化事業有限公司

台北縣新店市民權路 130 巷 6 號

電話：912-7307

定 價—新台幣 貳佰肆拾元整

版權所有・禁止翻印

內容簡介

本書為大專院校統編教材。系統介紹雷射裝置的一般原理和雷射的基本特性，全書共十章，每章後列有若干思考題和習題，可供80講課學時用。

本書在內容編排和理論處理方法上，注意物理概念的闡述，由淺入深，在取材上注重雷射技術的最近進展。可作為光電子技術、雷射技術、光電子物理、應用光學、應用物理等科系的雷射原理、雷射物理課的教材。也可供從事雷射工作的科技研究人員、以及大專院校教師的研究生參考。

前言

本教材講授雷射的一般原理，前兩章系統講授在雷射科學中常用的基本概念；第三、第四章講授雷射裝置的一般原理和的基本性質；第五章主要介紹雷射的半古典理論；第六、七、八章討論調 Q 雷射裝置、鎖模雷射裝置和雷射放大器的基本原理；在第八章後半部分討論超短雷射脈衝傳播的規律，並引入光學獨立波；第九章講授雷射裝置不穩定性和混沌態；第十章介紹雷射技術本身關係十分密切的若干非綫性光學現象。

本教材的內容是按80講課學時安排的（帶*的章節和段落可不講），先行課是四大力學和物理光學。

本教材可作為光電子技術、應用光學、光電子物理、應用物理等科系大學生的雷射原理、雷射物理課程的教學用書，也可作非光電工科科系的研究生的學習用書以及科技人員的參考書。

緒 論

1917 年愛因斯坦 (A. Einstein) 在他的“關於輻射的量子力學”論文中，爲了說明黑體輻射現象，從理論上預言了存在着原子受激輻射光（即雷射）的可能性。1928 年，拉登堡 (R. Ladenburg) 和克普夫曼 (H. Kopferman) 在實驗上觀察到氣體放電時由受激輻射造成的負色散效應，從而證實了愛因斯坦的預言。但是直到本世紀五十年代，人們才知道可以通過粒子數反轉分佈狀態的原子，分子系統，將受激輻射光突出出來。最早在實驗上實現粒子數反轉分佈的是普賽爾 (E. M. Purcell) 和龐德 (R. V. Pound)，他們在 1950 年觀察到核自旋系統的反轉分佈。1951 年，法卜利坎特 (Ф. А. Фаорнкант) 在專利中提出利用粒子數反轉分佈的物質，實現放大電磁輻射的設想。從歷史上來說，真正將原子的受激輻射突出出來的，首先是在微波波段。1954 年人們研製成功了微波量子放大器 (Microwave Amplification by stimulated Emission of Radiation, 簡稱 Maser)，並由此形成了一門新興的學科——量子電子學。1958 年肖洛 (A. L. Schawlow) 和湯斯 (C. H. Townes) 以及普洛霍洛夫 (А. М. Прохоров) 提出了將微波量子放大器的原理推廣到光波段的建議。1960 年梅曼 (T. H. Maiman) 按照他們的建議在實驗上研製成功了世界上第一台雷射裝置 (Light Amplification by stimulated Emission of Radiation, 簡稱 Laser)——紅寶石雷射裝置。至此，一門新的科學技術——量子電子學中的雷射技術，就以科學史上罕見的高速度向前發展着。

在本世紀六十年代之初，幾乎每一個月在雷射方面都有重大的發

明和突破。紅寶石雷射裝置問世之後，1961年研製成功了氦-氖混合氣體連續雷射裝置，1961年提出了Q調製技術，同年夏天在實驗上以克爾盒作為Q開關，製成了第一台調Q雷射裝置，在這一年還製成了鈹玻璃雷射裝置。1962年，美國的三個研究小組幾乎同時分別公佈了關於砷化鎵半導體雷射裝置運轉的報導。僅1961—1962年間，世界各國發表的雷射方面的論文達200篇以上。1963年建立了雷射裝置的半古典理論，對雷射裝置的頻率特性和功率特性進行了比較完善的探討。1964年研製成功了氬離子雷射裝置、二氧化碳雷射裝置、化學雷射裝置以及摻釹的鈮鋁石榴石雷射裝置。1965年實現了鉍酸鋰光學參量振盪器。同年，人們借助半古典理論預言了鎖模效應的存在。1966年研製成功固體鎖模雷射裝置。獲得了超短雷射脈衝，同年還研製成染料雷射裝置。1970年首次研製成準分子雷射裝置。1977年，人們研製成紅外波段的自由電子雷射裝置。

進入七十年代，有關雷射本身的三種基本理論——古典、半古典和量子理論，都已基本形成。

上面我們簡單地回顧了雷射科學的發展過程。雷射科學技術的發展如此迅速是因為它所涉及的一些科學——諸如光譜學、物理光學、固態物理、物質結構、無綫電電子學等在此以前基本上都已成熟，為它的發展提供了物質條件。但是，一門科學技術得以存在，還仰仗於它的廣闊的應用領域。由於雷射具有高的單色亮度（高的光子簡併度），好的單色性和相干性以及定向性，所以雷射一經問世，就受到了幾乎所有各門科學技術的重視，都在考慮在解決雷射出現以前所不易或不可能解決的問題上，雷射所可能提供的全新的技術。迄今，雷射在核聚變、加工、熱處理、光通訊、測距、計量標準等方面已經得到廣泛的應用。雷射的可調諧性和超短脈衝的獲得，對於研究需要長時間分辨、大空間分辨、高能量分辨的物質結構和微觀運動問題提供了全新的技術途徑。此外，雷射的出現還推動或帶動了一批近代光學學科以及邊緣學科的建立和發展，例如非綫性光學、量子光學、全息照

像術、雷射光學、雷射生物學等。綜上所述，雷射科學技術到現階段已發展為相當廣闊的學科並具有相當廣闊的應用領域。

本教材着重討論雷射的一般原理，不涉及雷射元件和技術的具体技術問題，後者一般是在“雷射元件和技術”課程中講授。雷射是物質發光的一種形式，物質發光屬於物質內部的微觀過程。研究雷射必定要涉及物質與光輻射場的相互作用問題，這類問題的近代理論是建立在量子電動力學基礎上的。本教材在討論雷射過程時，將採用古典的、半古典的和量子的理論。本教材前兩章，主要介紹輻射的基本概念和性質；第三、四章研究雷射裝置的一般原理和光學諧振腔以及雷射的基本性質；第五章討論目前有關雷射自身的基本理論；第六章、第七章和第八章分別討論目前常用的雷射技術——調Q、鎖模、放大技術的一般原理和基本理論，以及超短雷射脈衝的傳播規律和光學獨立波的性質；第九章主要討論最近出現的雷射裝置的 Casperson 型不穩定性及其成因，以及雷射裝置的混沌態的形成問題；第十章介紹與雷射技術本身關係密切的一些非綫性光學效應。

目錄

緒 論	1
第一章 光的模式和光子的量子狀態	1
§1.1 光的模式和光子的量子狀態	1
§1.2 相干體積與相格	8
§1.3 光子簡並度	13
習題與思考題	15
第二章 輻射理論	18
§2.1 黑體輻射	18
§2.2 光的自發輻射、受激吸收和受激輻射	22
§2.3 輻射的古典理論	28
§2.4 輻射的半古典理論	36
§2.5 光輻射的量子理論	42
§2.6 光譜綫形狀和寬度	62
習題與思考題	76
第三章 雷射裝置的基本原理	79
§3.1 粒子數反轉分佈	79
§3.2 增益、增益飽和及燒孔效應	91

§3.3	關於光學諧振腔的初步概念	108
§3.4	雷射裝置的工作過程和分類	112
§3.5	閾值條件	113
§3.6	連續運轉雷射裝置穩定工作狀態的建立	119
§3.7	連續運轉雷射裝置的泵浦功率	123
§3.8	雷射裝置的速率方程組	131
§3.9	連續運轉雷射裝置的輸出功率	134
§3.10	雷射裝置的最佳透過率	137
§3.11	雷射的譜綫寬度	141
§3.12	頻率牽引效應	145
§3.13	脈衝雷射裝置的運轉特性	146
§3.14	自發輻射的受激放大 (ASE)	150
	習題與思考題	153
第四章	光學諧振腔	156
§4.1	引 言	156
§4.2	光學諧振腔的穩定條件	163
§4.3	光學諧振腔的光場運動方程	171
§4.4	共焦腔中的光場——高斯光束	174
§4.5	共焦腔的基膜的特點、高階模的花樣和共振頻率	183
§4.6	非共焦腔的光場	190
§4.7	繞射損耗	195
• §4.8	諧振腔的模體積和調節精度	198
§4.9	高損耗光學諧振腔	201
• §4.10	選模技術	205
§4.11	高斯光束通過薄透鏡的傳輸、聚焦和準直	212
§4.12	波導諧振腔	222

習題與思考題	228
第五章 雷射理論	231
§5.1 雷射理論的結構和分類	231
§5.2 雷射的半古典理論 拉姆自洽場方程	233
§5.3 宏觀電極化強度與密度矩陣的關係	241
§5.4 靜止情形：一階理論	250
§5.5 靜止情形：非綫性理論	258
§5.6 運動情形：一階理論	260
§5.7 運動情形：三階理論	273
* §5.8 環形雷射裝置的半古典理論	298
習題與思考題	305
第六章 調Q雷射裝置原理	308
§6.1 雷射裝置的調Q原理	308
§6.2 調Q雷射裝置的脈衝波形分析	310
§6.3 調Q雷射裝置的基本參數分析	318
習題與思考題	321
第七章 鎖模雷射裝置原理	323
§7.1 鎖模原理	323
§7.2 鎖模方式	328
習題與思考題	333
第八章 雷射放大與超短雷射脈衝傳播	335

§8.1 引 言	335
§8.2 光信號放大的運輸方程	337
§8.3 穩態理論	341
§8.4 非穩態理論	353
§8.5 光學布洛赫方程	364
§8.6 π 脈衝	375
§8.7 面積定理	377
§8.8 自感透明和光學獨立波	384
習題與思考題	391
第九章 雷射裝置的不穩定性和混沌態	392
§9.1 非均勻加寬雷射裝置的不穩定性	392
§9.2 行波腔雷射裝置不穩定性的半古典理論	394
* §9.3 駐波腔雷射裝置不穩定性的半古典理論	416
§9.4 雷射裝置的混沌態	440
第十章 非線性光學效應	446
* §10.1 光學二次諧波	446
* §10.2 光學參量放大和振盪器	455
* §10.3 自聚焦	458
§10.4 受激拉曼散射	462
§10.5 受激布里淵散射	472
§10.6 光學相位共軛	478
§10.7 光學雙穩態	482
參考資料	491

第一章

光的模式和光子的量子狀態

我們首先來熟悉一下雷射理論中經常遇到的一些物理概念。它們是模式、光子的量子狀態、相格、相干體積以及光子簡並度。這些概念對於理解雷射的基本性質是重要的。

§ 1.1 光的模式和光子的量子狀態

實驗和理論表明，光具有波粒二象性。因此，描寫光的運動有兩種方式，一種是從波動的觀點出發，另一種是從光子的觀點出發。

從光的波動觀點，也就是從光的古典電磁理論的觀點來看，光的運動服從馬克斯威爾方程組。對於在給定的空間內任一點處光（電磁場）的運動情況，當問題的初始條件和邊界條件給定後，從原則上說，就是求解馬克斯威爾方程組。一般而言，可以得到很多個解。而且這些解的任何一種綫性組合，也滿足馬克斯威爾方程組。每一個特解，代表存在於此體積空間內的一種電磁場（光）分佈或者說電磁場（光）的一種本徵振動狀態。我們把每一個解所代表的場振動的分佈叫做電磁場（光）的一種模式（或稱一種波型）。場的不同本徵振動狀態表示為不同的模式。對於封閉的體積，這種模式，實際上就是存在於該體積內的各種不同頻率的駐波。

在光頻區域，光模式的形象是很具體的。一種光的模式也就是上述馬克斯威爾方程組的一個特解，代表着具有一定的偏振，一定的傳播方向，一定的頻率和一定的壽命的光波。因此，容易得到在給定的

體積內，所可能存在的光模式數目 g 。

我們舉一個具體例子，討論光在如圖 1.1-1 所示的體積為 V 的各向同性介質中運動時，所可能存在的模式數目。先討論在偏振和頻率都是一定的情況下，因傳播方向的不同，所可能存在的模式數目。從物理光學來看，各種模式的光，在傳播方向上的區別，由它們的繞射來決定。假設光波是平面波，任何兩個模式的光束在方向上必須至少相差一個平面波的繞射角，才能分辨開來。對應於從尺度為 d 的光源發出的波長為 λ 的光，因繞射限制，在 R 處所張的立體角為

$$d\Omega = \pi \left(\frac{\lambda}{d} \frac{R}{2} \right)^2 / R^2$$

$$\simeq \left(\frac{\lambda}{d} \right)^2$$

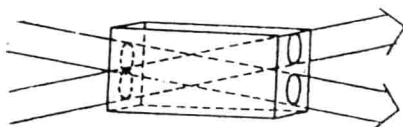


圖 1.1-1 體積為 V 各向同性介質中的模式數目

若取繞射孔的大小為單位面積，則 $d\Omega = \lambda^2$ 。因此在整個空間 4π 立體角內，在單位體積中，在傳播方向上可以分辨出

$$\frac{4\pi}{d\Omega} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (1.1-1)$$

個模式。

再來看在傳播方向和偏振都是一定時，因頻率的不同，在 ν 到 $\nu + \Delta\nu$ 內，可能存在的模式數。一個壽命為 Δt 的光波列（圖 1.1-2）它有一個由測不準關係決定的光譜寬度 $\delta\nu$

$$\delta\nu \approx 1/\Delta t \quad (1.1-2)$$

此處 $\Delta t = l/c$ ， c 是光速， l 是光波列的長度，所以 $\delta\nu \approx c/l$ 。兩個

光波的頻率之差大於 $\delta\nu$ 時，才能在測量中分辨出來。這樣在 ν 到 $\nu + \Delta\nu$ 頻率間隔 $\Delta\nu$ 內的光，可能有

$$\frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{l\Delta\nu}{c} \quad (1.1-3)$$

個模式。若光波的波列長度為單位長度，則上式為

$$\frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{\Delta\nu}{c} \quad (1.1-3a)$$

最後，再來看因偏振的不同所可能存在的模式數。我們知道，具有任意偏振狀態的單色平面波，都可以分解為兩個振動面互相垂直的且彼此有一定相位關係的綫偏振光，所以互相垂直的兩個綫偏振狀態是描寫光偏振特性的兩個獨立的偏振狀態。這樣，圖 1.1-2 光波列及其頻寬

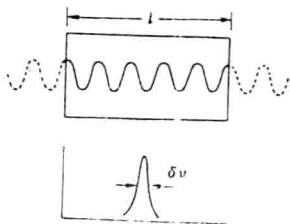


圖 1.1-2 光波列及其頻寬

光具有兩種獨立的偏振狀態。對於給定傳播方向和頻率的光，只可能有兩種不同的模式。

綜上所述，我們得到在單位體積中，在 ν 到 $\nu + \Delta\nu$ 頻率間隔內，因傳播方向、頻率以及偏振的不同，所可能存在的光模式數為

$$\frac{g}{V} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\Delta\nu}{c} \times 2$$

由此，在體積 V 內，在頻率 ν 到 $\nu + \Delta\nu$ 間隔內，光的模式數為

$$g = \frac{8\pi\nu^2 \Delta\nu}{c^3} V \quad (1.1-4)$$

可以證明，由這個具體例子得到的上述結果，對任何形式的腔體積都是成立的。對於光波段， g 是一個很大的數目。例如，若 $V = 1$ 厘米³， $\nu = 10^{14}$ 赫茲， $\Delta\nu \approx 10^{10}$ 赫茲。則 $g \sim 10^8$ 。這就是說，在光波段，一般而言，都是有大量的模式的光同時存在。以後會講到，只有在雷射裝置中才能造成這樣的特殊情形，即只有一個或少數幾個模式的

光，強度很大，其餘的上億個模式的光非常弱，要弱十幾個量級。

在第四章，我們還要詳細分析雷射裝置的光學諧振腔的光模式的性質。在那裏通常把光場的空間分佈，分解為沿光學諧振腔的軸向的分佈 $E(z)$ 和垂直於傳播方向的橫截面內的分佈 $E(x, y)$ ，即將光學諧振腔內的光模式分解為縱模和橫模。

在雷射理論中，模式的概念是重要的。所以，我們再從光子的觀點出發，通過海森堡測不準關係來討論。光子和光子的量子狀態的概念，在從古典物理到量子力學的變革時期，曾起過重要的作用。人們知道，光子的運動可以由它們的能量、動量和偏振來表徵。一個光子的能量為

$$E = h \nu \quad (1.1-5)$$

h 為普朗克常數。光子的動量為

$$\begin{aligned} P &= \frac{h \nu}{c} n_0 \\ &= \hbar k \end{aligned} \quad (1.1-6)$$

n_0 是光子動量的單位向量， k 為波向量。根據光子統計理論，光子的一種運動狀態，不能用相空間中的一點來代表。因為光子的動量與座標之間存在海森堡測不準關係

$$\begin{aligned} \Delta P_x \Delta x &\geq h \\ \Delta P_y \Delta y &\geq h \\ \Delta P_z \Delta z &\geq h \end{aligned}$$

這意味着，如果光子座標 x 的測量值越準確，則動量 P_x 的測量值就越不準確。所以只能相空間劃出面積 $\Delta P_x \Delta x = h$ ， $\Delta P_y \Delta y = h$ ， $\Delta P_z \Delta z = h$ 來確定光子的一種狀態。凡滿足條件

$$\Delta P_x \Delta x \leq h$$

$$\Delta P_y \Delta y \leq h$$

$$\Delta P_z \Delta z \leq h$$

即在面積 h 內的各點，物理上是不能分開的，因而屬於同一狀態。這樣，在六維空間 (x, y, z, P_x, P_y, P_z) 內，光子的一種狀態對應於相體積（相格）

$$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z \leq h^3 \quad (1.1-8)$$

光子在以動量 P_x 、 P_y 、 P_z 組成的動量空間內，它的一種運動狀態佔據動量空間的體積元 δP 為

$$\delta P = \Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z \quad (1.1-9)$$

由 (1.1-8) 式則得

$$\delta P = \frac{h^3}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{h^3}{V} \quad (1.1-10)$$

上式中的 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ 是光子運動的體積。

現在來討論，在 ν 到 $\nu + \Delta \nu$ 頻寬間隔內，因光子的動量不同，所可能存在的狀態數。這相當於求出光子在動量空間中一個半徑為 $P = h\nu / c$ ，厚度為 $dP = h \Delta \nu / c$ 的球殼內，所可能有的光子狀態數（圖 1.1-3），它是 $4\pi P^2 dP / \delta P$ 。再考慮到光子只能存在兩種不同的偏振狀態，所以在體積 V 內在 ν 到 $\nu + \Delta \nu$ 頻率間隔內，因能量、動量及偏振狀態的不同，所可能有的光子狀態數，根據 (1.1-6) 式和 (1.1-10) 式為

$$g = \frac{4\pi P^2 dP}{\delta P} \times 2 = \frac{4\pi \nu^2 \Delta \nu}{c^3} V \times 2$$