

## 前 言

自从1960年激光器问世以来,光生物学、激光医学及其相关学科光物理学、光化学等有了迅速的发展。激光这一强有力的现代手段与传统的化学反应动力学、生物动力学等结合起来,已促成了一门新的边缘学科——激光生物动力学的诞生。迄今为止,这方面的实验工作及医学实践已积累了相当丰富的资料,理论上也提出了不少有价值的观点、模型和假说。但由于各种原因,除数量众多的研究报告和论文之外,该领域的专著尚未见报道。本书是在国内填补这一空白的首次尝试。

鉴于激光生物动力学涉及许多相关学科,本书作者无意也无力对此领域的工作作系统全面的总结与论述,而只能撷取某些方面作一介绍,并根据作者的研究心得,对一些已有文献尚未涉及或尚未深入讨论的问题提出自己的分析。书中第一章首先介绍了目前已相当成熟的激光理论的概貌,包括经典理论、半经典理论及量子理论,而以Lamb的半经典理论为主。第二章用李代数方法进一步探讨了激光的半经典理论和量子理论,从理论上导出了在Lamb理论中唯象引入的能级的衰变率 $\gamma$ 和激发率 $\lambda$ 的表达式;与通常的微扰方法相比,李代数方法的一个重要优点即是其结果不仅适用于弱场,也同样适用于强场。第三章和第四章分别介绍了激光的各种生物学效应和光动力学治疗中常用的激光器。第五章介绍了应用Prigogine和Haken的非平衡态动力学理论对激光过程的分析方法,并具体讨论了神经传导过程的动力学行为。第六章集中介绍激光反应的动力学分

析。我们提出一种非奇异线性变换方法，可将反应动力学方程组无需通过所谓“常数变易法”而直接化成 Haken 形式，从而使求得非线性动力学方程组的解的近似表达式成为可能，该方法可成为处理多变量体系的有效手段。第七章较全面地探讨了激光光化学的生物学作用机理，给出了数理模型和动力学分析，介绍了光敏物质的特点、分类及其在人体内的药代动力学过程；并介绍了作者及其他学者在激光光化学应用于肿瘤诊断、治疗及其他方面的最新成果。

正如我们已指出的，本书仅是结合作者个人工作对本领域中某些问题的一些初步探讨，其中包括作者许多尚未发表的工作。囿于作者的知识面和水平，疏漏及不当之处是难免的，希望有关方面的专家不吝指正。如果本书能起到引玉之砖的作用，书中某些分析方法能在激光反应动力学、光化学动力学及其他相关领域中得到应用及进一步的发展，本书的目的就达到了。

最后，特别要感谢济南出版社和刘崇刚、宋友文二位先生，他们对本书的出版给予了大量的帮助。

著者

1992年6月于济南

## Preface

Great progress has been made in the fields of optical physics, photochemistry, photobiology and laser therapy over the past three decades since 1960 when the first laser device came into being. As a matter of fact, the combination of the laser, a powerful modern tool, with such traditional sciences as reaction dynamics, biodynamics and other related subjects has brought about a new branch of science—laser biodynamics. Up to now, a wealth of data have been accumulated in the experimental studies of this area and the laser therapeutic practice, while theoretically quite a number of valuable viewpoints, models and hypotheses have been advanced. For various reasons, however, monographic works on the subject are still rare, although there are large amounts of research reports and treatises. This book, therefore, is our first attempt to fill in the gap in China.

Since laser biodynamics is connected with a wide range of disciplines and technologies, we do not intend, nor are we in a position, to make a comprehensive summary or give a systematic exposition of the theory and practice of the topic. This book purports to offer an introduction to some aspects of the subject with particular emphasis on those questions which have not been considered or thoroughly examined so far and provide some possible approaches and analytic methods based on our own studies.

Chapter 1 of the book gives a brief introduction of the laser theories including the classical, the semiclassical and the quantum treatments, with emphasis on the Lamb school. It is followed in Chapter 2 by the further investigation into the semiclassical and quantum laser

theories by means of the Lie algebra, which yields the explicit expressions of the decay constant  $\gamma$  and excitation one  $\lambda$  between two energy levels introduced as phenomenological constants in the Lamb theory. Compared with the conventional perturbation method, the Lie algebraic approach can produce more advantageous results, suitable not only for the weak field but for the strong field as well.

Chapter 3 is a brief review of various biological effects of the laser, while the characteristics and functions of several lasers often used in photodynamical therapy are discussed in Chapter 4 for the convenience of practical application.

The non — equilibrium dynamics developed by Prigogine and Haken has now become a very efficient means for different purposes. Chapter 5 explains how to use this theory to analyze laser operation, and examines specifically the dynamic behaviour of the process of neuro — conduction.

Chapter 6 is focused on the dynamical analyses of different reactions induced by light and heat. A nonsingular linear transform method is proposed, for it can transfer the reaction dynamical equations directly into the Haken form without using the method of constant alteration and enable us to obtain their approximate solutions. It may become an effective way to deal with the multivariable systems.

In the last chapter, inquiries are made into different aspects of the mechanics of biomedical reactions of laser photochemistry, their mathematical models and dynamical analysis are provided, and the properties and classification of photoactive materials and their pharmacokinetic processes in the human body are described. Some practi-

cal applications of laser photochemistry in the diagnosis and treatment of cancers and other fields carried out by the authors and other specialists are also illustrated.

As mentioned above, this book is only a preliminary and tentative exploration into some problems in this field based on the results of our own research including quite a few works not yet published. We would be very happy if it could, as the Chinese saying goes, serve as a brick cast to attract jade. We also believe that the methods suggested in this book will be found applicable and will be further improved in various fields such as laser physics, reaction dynamics and chemical kinetics.

Finally, special acknowledgements should be extended to Jinan Press, Mr Liu Chonggang and Mr Song Youwen, who all have rendered valuable help with the publication of this book.

## Authors

June, 1992

Jinan

# 目 录

第一章 激光理论概述 .....	1
§ 1.1 辐射理论基础 .....	2
§ 1.2 激光的半经典理论 .....	12
§ 1.3 激光的量子理论 .....	49
参考文献 .....	66
第二章 激光理论的李代数处理方法 .....	68
§ 2.1 Alhassid-Levine 理论概要 .....	71
§ 2.2 半经典理论的李代数处理方法 .....	85
§ 2.3 量子理论的李代数处理方法( I ) .....	102
§ 2.4 量子理论的李代数处理方法( II ) .....	110
§ 2.5 李代数处理方法推广到多模情况 .....	120
参考文献 .....	133
第三章 激光的特性及生物效应 .....	135
§ 3.1 激光的特性 .....	136
§ 3.2 激光对生物分子的效应 .....	147
§ 3.3 激光在细胞生物学中的应用 .....	159
§ 3.4 激光对生物系统的作用 .....	170
参考文献 .....	187
第四章 用于光动力学治疗的激光器 .....	188
§ 4.1 氦氖激光器 .....	189
§ 4.2 氩离子激光器 .....	200
§ 4.3 金属蒸气离子激光器 .....	207
§ 4.4 氮分子激光器 .....	213

§ 4.5 固体激光器 .....	218
§ 4.6 染料激光器 .....	231
§ 4.7 LCT-1 型激光治疗机 .....	239
参考文献 .....	239
<b>第五章 非平衡态动力学在激光过程中的应用 .....</b>	<b>245</b>
§ 5.1 非平衡系统中的自组织理论 .....	246
§ 5.2 协同学简介 .....	248
§ 5.3 稳定性理论 .....	252
§ 5.4 分支点理论 .....	256
§ 5.5 反应项 $h_i(q_1, \dots, q_n)$ 的表示方法 .....	263
§ 5.6 特征方程中系数的表示法 .....	265
§ 5.7 神经传导过程的动力学行为 .....	267
§ 5.8 准分子激光过程的动力学行为 .....	276
参考文献 .....	286
<b>第六章 激光反应动力学分析 .....</b>	<b>287</b>
§ 6.1 通过一种非奇异的线性变换将体系动力学方程 组化成 Haken 形式 .....	289
§ 6.2 激光同位素分离机理的动力学分析 .....	291
§ 6.3 乙烷热分解机理的动力学分析 .....	318
§ 6.4 醚热分解机理的动力学分析 .....	329
§ 6.5 乙醛热分解机理的动力学分析 .....	334
参考文献 .....	339
<b>第七章 激光光化学在医学上的应用 .....</b>	<b>341</b>
§ 7.1 激光光化学疗法的生物医学机制 .....	342
§ 7.2 光敏剂的药代动力学模型 .....	350
§ 7.3 激光光化学动力学分析 .....	355
§ 7.4 激光光化学的临床应用 .....	365

参考文献 ..... 374



# CONTENTS

<b>Chapter I INTRODUCTION TO LASER THEORY</b> .....	1
§ 1. 1 Fundaments of Radiation Theory .....	2
§ 1. 2 Semiclassical Theory of the Laser .....	12
§ 1. 3 Quantum Theory of the Laser .....	49
References .....	66
<b>Chapter II LIE ALGEBRAIC APPROACH TO LASER</b>	
<b>THEORY</b> .....	68
§ 2. 1 Introduction to Alhassid—Levine Theory .....	71
§ 2. 2 Lie Algebraic Approach to Semiclassical Laser	
Theory .....	85
§ 2. 3 Lie Algebraic Approach to Quantum Laser	
Theory ( I ) .....	102
§ 2. 4 Lie Algebraic Approach to Quantum Laser	
Theory ( II ) .....	110
§ 2. 5 Application of Lie Algebraic Method to Multimode	
Laser Operation .....	120
References .....	133
<b>Chapter III PROPERTIES AND BIOLOGICAL EFFECTS</b>	
<b>OF THE LASER</b> .....	135
§ 3. 1 Properties of Laser Light .....	136
§ 3. 2 Effects of the Laser on Biological Molecules .....	147
§ 3. 3 Laser Application in Cell Biology .....	159
§ 3. 4 Effects of the Laser on Biological Systems .....	170
References .....	187

## Chapter IV LASERS USED IN PHOTODYNAMIC

THERAPY .....	188
§ 4. 1 Helium—Neon Laser .....	189
§ 4. 2 Argon Ion Laser .....	200
§ 4. 3 Metal Vapor Ion Laser .....	207
§ 4. 4 Nitrogen Molecular Laser .....	213
§ 4. 5 Solid Laser .....	218
§ 4. 6 Dye Laser .....	231
§ 4. 7 LCT—1 Laser Therapeutic Machine .....	239
References .....	244

## Chapter V APPLICATIONS OF NON—EQUILIBRIUM

DYNAMICS IN LASER PROCESS .....	245
§ 5. 1 The Self—Organization Theory in Non—equilibrium Systems .....	246
§ 5. 2 Introduction to Synergetics .....	248
§ 5. 3 The Stability Theory .....	252
§ 5. 4 The Bifurcation Theory .....	256
§ 5. 5 Expression of the Reaction Term $h_i(q_1, \dots, q_n)$ .....	263
§ 5. 6 Expression of the Coefficients of Characteristic Equation .....	265
§ 5. 7 Dynamic Behaviour of Neuro—Conduction .....	267
§ 5. 8 Dynamic Behaviour of the Excimer Lasers .....	276
References .....	286

## Chapter VI ANALYSES OF LASER REACTION

DYNAMICS .....	287
§ 6. 1 Transformation of the Dynamic Equations of System	

to Haken's Form through Nonsingular Linear Transform .....	289
§ 6.2 Dynamic Analysis of the Mechanism of Laser Isotope Separation .....	291
§ 6.3 Dynamic Analysis of the Mechanism of the Thermal Decomposition of $C_2H_6$ .....	318
§ 6.4 Dynamic Analysis of the Mechanism of the Thermal Decomposition of $C_2H_5OC_2H_5$ .....	329
§ 6.5 Dynamic Analysis of the Mechanism of the Thermal Decomposition of $CH_3CHO$ .....	334
References .....	339
<b>Chapter VII MEDICAL APPLICATIONS OF LASER</b>	
<b>PHOTOCHEMISTRY</b> .....	341
§ 7.1 The Biomedical Mechanism of Laser Photochemical Therapy .....	342
§ 7.2 The Pharmacodynamic Model of Photosensitizers .....	350
§ 7.3 Dynamic Analysis of Laser Photochemistry .....	355
§ 7.4 Clinical Applications of Laser Photochemistry .....	365
References .....	374

---

# 第一章

\* \* \* \* \*

\*

## 激光理论概述

\*

\*

\* \* \* \* \*

激光(Laser)是受激辐射产生的光放大(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)的简称。受激辐射这一特点使得激光具有其他普通光源所无法比拟的高单色性、高方向性、高相干性和高强度,因而在许多领域包括激光生物动力学中得到了广泛的应用。在具体讨论激光器件及激光的生物动力学特性之前,了解一下激光理论的概貌是有益的。

激光的产生从本质上说是一种光与物质的相互作用过程。描述这一过程的理论大致可分为经典的、半经典的和量子的三类。其中经典辐射理论读者从电动力学中已经熟悉。本章重点讨论半经典理论和量子理论,而以前者为主。在讨论中着重阐明其基本思想和基本原理,更深入细致的内容则可参阅有关专著。

## § 1.1 辐射理论基础

激光是一种辐射场。为对辐射场的特性有一般的了解,本节首先回顾黑体辐射的普朗克(Planck)公式,由其导出过程引入光子概念;并由爱因斯坦(Einstein)对黑体辐射的解释引入原子的自发辐射、受激辐射及受激吸收三种过程;最后简单阐述辐射的半经典理论。

### 1.1.1 黑体辐射

#### 1. 普朗克公式及光子概念

黑体辐射是暴露经典物理学理论与实验事实之尖锐矛盾的一个著名现象。所谓黑体(绝对黑体之简称),是指一种能够将

投射于其上的各种频率的辐射能量全部吸收而不反射的物体。显然,这种物体仅是一种理想模型。但是,用人为方法可以构成非常接近绝对黑体的实体,例如密闭腔上的小孔。

当黑体与其周围的辐射场达到热平衡(设其绝对温度为  $T$ )时,在单位时间内由黑体单位表面积所发出的、在频率  $\nu$  附近单位频率间隔中的辐射能称为黑体的光谱辐出度,记为  $r(\nu, T)$ 。 $r(\nu, T)$  随  $\nu$  的分布曲线可由实验测定。另一方面,由辐射度学可知

$$r(\nu, T) = \frac{c}{4} \rho(\nu, T), \quad (1.1)$$

式中  $c$  为光速,  $\rho(\nu, T)$  是与黑体处于热平衡的辐射场的光谱能量密度,它在数值上等于单位体积的辐射场所包含的频率在  $\nu$  附近单位频率间隔中的辐射能。 $\rho(\nu, T)$  的表达式可由理论分析而导出,代入(1.1)式即可与  $r(\nu, T)$  的实验曲线相比较。由电磁理论,单位体积的辐射场中在频率  $\nu$  附近单位频率间隔中的振动模式数、即态密度为

$$N(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}. \quad (1.2)$$

将每一模式看作一谐振子,依经典统计理论,各个谐振子的能量  $\epsilon$  是在  $(0, +\infty)$  区间连续分布的,而振子具有能量  $\epsilon$  的几率正比于  $\exp(-\epsilon/kT)$ ,其中  $k$  为玻耳兹曼(Boltzmann)常数。因此振子的平均能量为

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon e^{-\epsilon/kT} d\epsilon}{\int_0^{\infty} e^{-\epsilon/kT} d\epsilon} = kT. \quad (1.3)$$

由(1.2)及(1.3)式,可得

$$\rho(\nu, T) = N\bar{\epsilon} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT. \quad (1.4)$$

将上式代入(1.1)式即有

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT. \quad (1.5)$$

上式称为瑞利-金斯(Rayleigh-Jeans)公式。它在长波段( $\nu$ 较小时)与黑体辐射的实验曲线符合较好,在短波段( $\nu$ 较大时)则偏离很大;特别当 $\nu \rightarrow \infty$ 时 $r(\nu, T) \rightarrow \infty$ ,而且黑体的总辐出度

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu$$

亦趋于无限大。这一物理上显然不合理的推论在历史上曾被称为“紫外灾难”。

为解释黑体辐射的实验结果,普朗克于1900年大胆地提出了一个假说:谐振子的能量不是连续分布的,而只能取一系列分立值。具体地说,频率为 $\nu$ 的谐振子的能量只能取

$$e = ne_0 = nh\nu, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1.6)$$

式中 $e_0 = h\nu$ 是能量的最小单元,称为能量子或量子, $h$ 为普朗克常数。由能量分立的概念,(1.3)式应由下式取代:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu e^{-nh\nu/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/kT}} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1.7)$$

用此 $\bar{e}$ 值代替 $kT$ , (1.4)和(1.1)式分别变为

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (1.8)$$

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1.9)$$

(1.9)或(1.8)式称为黑体辐射的普朗克公式,它在整个波段内与实验曲线符合很好,在长波近似( $h\nu \ll kT$ )下则可自动转化为

瑞利—金斯公式。普朗克公式的成功证明了量子假说的正确性，并成为以量子理论为重要标志的近代物理学的发端。

1905年，爱因斯坦在对光电效应的解释中，进一步发展了普朗克的思想，认为电磁辐射本身即由能量为 $h\nu$ 的粒子所组成，这种粒子以光速运动，在与电子等微观粒子相互作用时服从能量守恒和动量守恒定律。这种光量子被称为光子。

## 2. 爱因斯坦的黑体辐射理论

1916—1917年，爱因斯坦运用光量子论，从另一角度重新研究了黑体辐射，同样得到了黑体辐射场光谱能量密度的普朗克公式(1.8)。在推导过程中，他首次提出了自发辐射和受激辐射两个极为重要的概念，建立了光与物质相互作用的崭新模型。

为方便起见，假定原子体系是二能级体系，即原子仅有两个能级：高能级(激发态) $E_2$ 和低能级(基态) $E_1$ 。爱因斯坦把光与物质的相互作用归结为三种基本过程：

(1) 自发辐射 此过程中原子由高能态自发跃迁到低能态，同时辐射出一个能量 $h\nu$ 满足

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1.10)$$

的光子。上式称为玻尔(Bohr)条件。

(2) 受激吸收 此过程中原子吸收一个频率满足玻尔条件的光子，从而从低能态跃迁到高能态。

(3) 受激辐射 当原子受到频率满足玻尔条件的光的照射时，原子会在外来光子的激励下从高能态跃迁到低能态，并发出另一个与外来光子频率相同的光子，此过程称为受激辐射。

自发辐射是一个随机过程，各原子何时发生自发辐射带有偶然性、彼此无关，所以自发辐射光在相位、偏振态及传播方向上都是杂乱无章的，其相干性很差。受激辐射则不同，它所发



出的光子与外来激发光子具有相同的量子态，即受激辐射光与外来激发光具有相同的频率、相位、偏振态和传播方向，因而是相干光。让大量原子在同一外来光场激励下产生并维持受激辐射，即可得到激光。

设  $N_2$ 、 $N_1$  分别表示上、下能级的原子密度，则单位时间和单位体积中自发辐射、受激辐射和受激吸收的光子数可分别表示为  $A_{21}N_2$ 、 $B_{21}\rho(\nu, T)N_2$  和  $B_{12}\rho(\nu, T)N_1$ ，其中  $A_{21}$ 、 $B_{21}$  和  $B_{12}$  分别称为自发辐射系数、受激辐射系数和受激吸收系数，统称为爱因斯坦系数。显然， $A_{21}$ 、 $B_{21}\rho(\nu, T)$  和  $B_{12}\rho(\nu, T)$  分别表示自发辐射、受激辐射和受激吸收的跃迁几率。

在热平衡条件下，单位时间和单位体积中原子所发射的光子数和所吸收的光子数应该相等，即有

$$[A_{21} + B_{21}\rho(\nu, T)]N_2 = B_{12}\rho(\nu, T)N_1. \quad (1.11)$$

另一方面，热平衡时  $N_1$ 、 $N_2$  应服从玻耳兹曼分布律：

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2 e^{-E_2/kT}}{g_1 e^{-E_1/kT}} = \frac{g_2}{g_1} e^{-h\nu/kT}, \quad (1.12)$$

上式中用到了玻尔条件， $g_1$  和  $g_2$  则分别表示原子能态  $E_1$  和  $E_2$  的简并度。由(1.11)和(1.12)式可得到黑体辐射场的光谱能量密度

$$\rho(\nu, T) = \frac{A_{21}/B_{21}}{(g_1 B_{12}/g_2 B_{21})e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1.13)$$

上式与普朗克公式(1.8)形式相同。比较二式可得到

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}, \quad (1.14)$$

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21}, \quad (1.15)$$

此即各爱因斯坦系数所应满足的关系式。

为便于看清(1.15)式的物理意义，考察  $g_1 = g_2$  的情况，这