

工业激光器及其应用

〔英〕 J. E. 哈里 著



机械工业出版社

工业激光器及其应用

〔英〕 J. E. 哈里 著

北京光电技术研究所情报室 译

机械工业出版社

本书主要论述激光基本原理、激光器以及激光在工业中的应用。全书共分六章。第一章，光辐射过程简介；第二章，激光特性；第三章，激光系统中的材料和元件；第四章，工业激光器；第五章，工业激光器的应用；第六章，激光安全。书末附有部分激光术语解释和选读书目。

本书可供从事激光应用和研究的技术人员以及大专院校激光专业的师生参考。

本书由中国科学院力学研究所李元恒校。

Industrial lasers and their applications

John E. Harry

McGraw-Hill Book Company(UK) Limited 1974

* * *

工业激光器及其应用

〔英〕 J. E. 哈里 著

北京光电技术研究所情报室 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 77/8·字数 170 千字

1980年3月北京第一版·1980年3月北京第一次印刷

印数 00,001—10,000·定价 0.74元

*

统一书号：15033·4725

前 言

本书主要论述激光器在工业中的应用。这本书是写给这样一些工程技术人员的，他们不需要太深奥的激光理论，但对激光的应用会对他所感兴趣的领域有些什么影响很关心。本书假定读者不具有激光和光学的专业知识。

第五章工业激光器的应用是全书的重点，这也许是急于了解这方面知识的读者首先想要阅读的一章。前四章是提供一些基础知识，以便使读者对激光的应用能有充分的了解，从而有这方面需要的人就可以去估价激光在他自己的工作范围内可能的应用。

第一章叙述普通光源和激光器。第二章介绍与应用密切相关的一些重要的激光特性。一项激光应用，往往不单纯是一台激光器。在一套激光加工系统中，除激光器外还可能包括透镜、反射镜、检测器、调制器等其他光学元件。第三章讲述光学材料、各种装置、以及影响它的设计和应用的一些因素。

现有的许多关于激光的书籍和文章都是从激光理论与发展的角度来写的。本书第四章将专门介绍在市场上可以买得到的各种激光器。

第五章叙述激光的各种应用，同时尽可能地说明其工作原理，以及激光与其他方法相比较的优点和不足。重点放在已趋成熟的各项应用上，而不是将来有可能得到应用的方面。本章还从技术性和商业性的刊物中选列了近200篇有关测量、

焊接、火灾监测和污染检测等方面的文献供读者参考。

对于激光应用来说还必需谈一谈安全防护问题。我们在第六章讲述了激光波长和输出功率(连续或脉冲)对安全的影响。这里谈到了一些预防措施和有关身体检查的细节,同时列出了有损人体健康的各项阈值标准。本章还介绍了英国和美国采用的各种安全规则。在全书的末尾附有一个参考书目,同时各章的最后都列有一些参考文献。

附录中介绍了一些读者可能不熟悉的激光术语。

现在已经出版了大量的关于激光以及与激光有关的读物,而这本书首次介绍了与激光应用的主要领域有关的一整套数据。本书同时还提供了与激光应用有关的诸领域所需的参考资料。

作者希望这本书能使读者对作为工业上一个工具的激光有一个较广泛的了解。我相信激光的工业应用必将和它的商业应用、家庭应用一起继续不断地更加向前发展。

J.E.哈里

35068

符 号

(i) 拉丁字母	单 位	代 号
<i>A</i> 面积	米 ²	m ²
<i>A</i> 振幅		
<i>B</i> 电光常数(克尔效应)	米/伏 ²	m/V ²
<i>c</i> 真空中的光速(3×10^8 米/秒)		
<i>C</i> 电容	法拉	F
<i>d</i> 直径	米	m
<i>D</i> 光密度		
<i>e</i> 自然对数的底(2.718)		
<i>E</i> 能量	焦耳	J
<i>E</i> 电场强度	伏/米	V/m
<i>E_r</i> 电光系数	伏/米	V/m
<i>f</i> 频率	赫兹	Hz
<i>f</i> 焦距		
<i>F</i> 孔径		d/f
<i>h</i> 普朗克常数(6.6×10^{-34} 焦耳/秒)		
<i>H</i> 磁场强度	安匝/米	A/m
<i>I</i> 强度		
<i>k</i> 吸收系数		
<i>l</i> 长度	米	m
<i>M</i> 声光品质因数		
<i>n</i> 折射率		
<i>P</i> 压力	牛顿/米 ²	N/m ²
<i>P</i> 功率	瓦	W

R	曲率半径	米	m
t	厚度	米	m
T	透射系数		
T	绝对温度	度	K
u	物体到主平面的距离	米	m
U	速度	米/秒	m/s
v	象到主平面的距离	米	m
V	电压	伏	V
V'	半波电压	伏	V
V	磁光常数(费尔德效应)	弧度/泰斯拉米	rad/Tm
x	距离	米	m
z	焦深	米	m

(ii) 希腊字母

α	发散角	弧度	rad
β	反射系数		
γ	波数	米 ⁻¹	m ⁻¹
δ	衍射极限直径	米	m
ϵ	发射系数		
ϵ_r	相对电容率		
η	效率		
θ	偏转角	弧度	rad
λ	波长	米	m
λ_0	特征波长	米	m
ρ	密度	公斤/米 ³	kg/m ³
σ	斯忒藩-玻耳兹曼 常数(5.67×10^{-8})	瓦/米 ² ·度 ⁴	W/m ² K ⁴
ϕ	角直径	弧度	rad
ω	直径(等强度两点的距离)	米	m
ω	角旋转速率	弧度/秒	rad/s

目 录

前言

符号

第一章 光辐射过程简介	1
1.1 发射过程	1
1.2 荧光	6
1.3 受激发射	7
1.4 激光器工作原理	9
参考文献	12
第二章 激光特性	13
2.1 输出波长	13
2.2 发散度	16
2.3 模式结构	18
2.4 相干性	21
2.5 偏振	22
2.6 能量和功率输出	24
2.7 能量转换和效率	27
参考文献	29
第三章 激光系统中的材料和元件	30
3.1 各种材料的光学特性	30
3.2 双折射材料	46
3.3 反射器	63
3.4 透镜	71
3.5 光导纤维	77

3.6	Q开关	78
3.7	波长选择	81
3.8	空间滤波器	83
3.9	光学衰减器	84
3.10	检测器和量热器	84
3.11	扫描方法	88
	参考文献	89
第四章	工业激光器	92
4.1	固体激光器	96
4.2	固体激光器的抽运源	99
4.3	固体激光材料	106
4.4	气体激光器	110
4.5	几种主要的气体激光器	112
4.6	染料激光器	120
4.7	半导体激光器	123
4.8	其他激光器	126
	参考文献	128
第五章	工业激光器的应用	131
5.1	激光在计量学中的应用	131
5.2	激光工业加工	149
5.3	激光在电子元件制造中的应用	180
5.4	激光在医学上的应用	189
5.5	激光检验技术与无损检验	194
5.6	污染检测	196
5.7	激光分析技术	198
5.8	全息术的应用	201
5.9	激光通讯和信息处理	207
5.10	其他应用	209
	参考文献	214

VI

第六章 激光安全	221
6.1 眼睛对光的透射和吸收	221
6.2 激光对人体的作用	225
6.3 临阈级	227
6.4 眼睛的防护	231
6.5 预防措施	232
参考文献	237
选读书目	238
附录 激光术语解释	240

第一章 光辐射过程简介

本章介绍光辐射过程的各种重要特征，并着重阐述普通光源与激光光源的区别。

光和无线电波、微波、热一样是电磁能的一种形式。虽然电磁辐射的效应随频率而变化，但所有电磁辐射过程的本质是一样的，并且遵循着相同的基本规律。电磁波的频谱和光的频谱示于图 1.1，图中还对可见光的谱线进行了放大。这里我们所关心的是谱线的光学部分，从紫外到可见区，再到远红外，要用光学理论去处理它（关于物理光学的参考书列在书末的选读书目中）。

光谱的紫外端受其光源有效性的限制，并且各种材料（包括空气）对紫外光的透射都有限。红外区很宽，近红外区与可见光区相接，远红外区则延伸到微波频率的毫米波段。人们对红外区已经进行了非常广泛的研究。可见光区仅仅是整个光谱中的很小一部分。

无线电频率的波长一般是用“米”来表示的。光波频率的波长比无线电波短得多，可用国际单位制表示，如微米（ μm ， 10^{-6}m ）或毫微米（ nm ， 10^{-9}m ）。以前曾广泛使用的另一种单位是埃（ $\text{\AA}$ ， 10^{-10}m ）。

1.1 发射过程

一个原子可以看作是由若干个电子围绕着一个带正电荷的中心核所组成，如图 1.2 所示。这些电子在有限个可能的

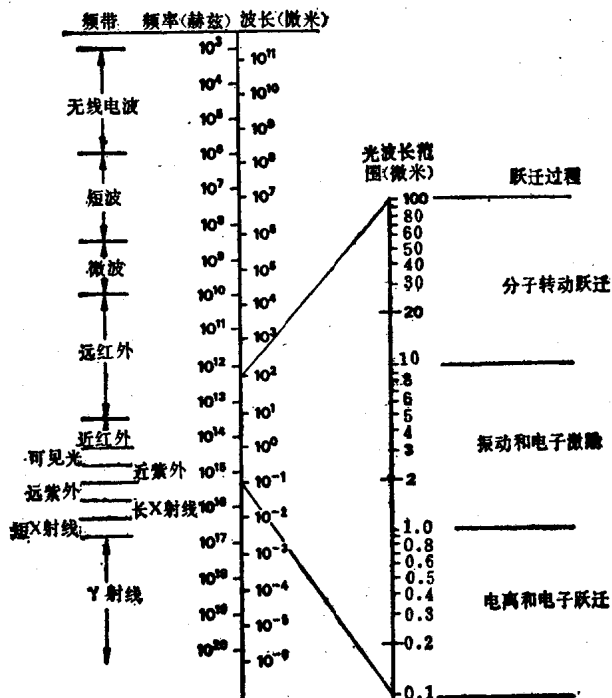


图1.1 电磁波谱

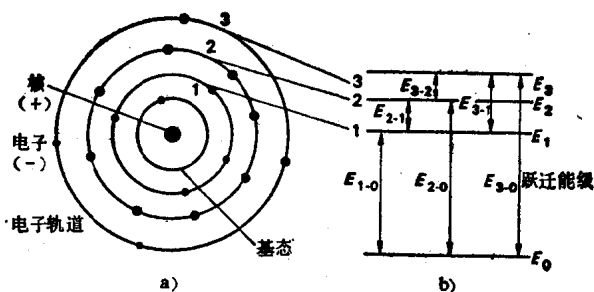


图1.2 能量跃迁能级和电子轨道的关系

a) 核和轨道电子 b) 能级图

轨道上围绕着核旋转。除这些特定的轨道之外，电子不可能处在其他轨道上。电子通过能级跃迁可以改变它的轨道，当它从离核较远的轨道跃迁到离核较近的轨道上时就发射光，而从离核较近的轨道跃迁到离核较远的轨道上时则需吸收光。每个跃迁对应一个特定的能量(量子)和特定的波长。与跃迁相对应的这个能量 E 随波长的变短而增加，遵从关系式

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

式中 c 是光速，真空中 $c = 3 \times 10^8$ 米/秒。 λ 是波长，用米作单位， f 是频率，单位是赫兹，而 h 是普朗克常数， $h = 6.6 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒。

对发射过程较为详细的论述可参阅本书最后所列的选读书目中有关物理光学和几何光学的著作。

1.1.1 连续辐射源

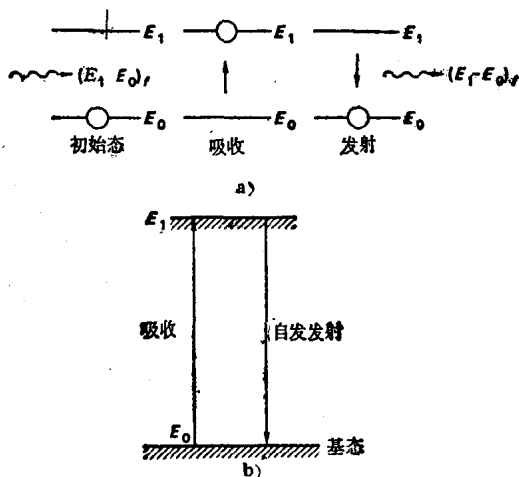


图1.3 自发发射

a) 自发发射的吸收和再辐射 b) 能级跃迁图

象钨丝灯泡这样的白炽辐射源，可在一个很宽的波长范围上产生辐射，这相当于大量的电子在不同的能级之间同时发生跃迁(图1.2)。与这些跃迁相应的能量将被吸收或自发地再辐射。具体过程见图1.3。电子从内层低能级跃迁到外层高能级时需吸收能量，而由高能级跃迁到低能级时就是自发再辐射，其辐射频率由跃迁能级的能量差所确定。

输出强度随温度和波长而改变。辐射的总能量是指整个输出波长范围内辐射能量的总和。对大多数的热辐射源，总辐射能近似地与温度的四次方成正比

$$W = \sigma T^4 \text{ (瓦特)} \quad (1.2)$$

式中 σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数 ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ 瓦/米}^2 \cdot \text{度}^4$)。一个理想发射体(黑体)的辐射能与温度和波长的函数关系现已列制成表[1]。图1.4表示在各种温度下辐射强度随波长的变化。对应于辐射输出强度最大值的波长在图中用虚线表示，并由维恩定律描述：

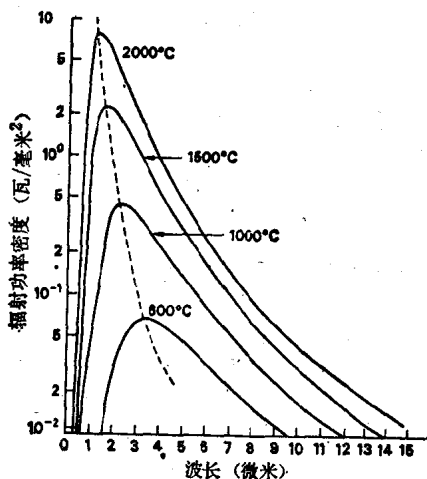


图1.4 黑体辐射功率密度随温度和波长的变化(虚线表示峰值强度)

$$\lambda_{\max} T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ 米} \cdot \text{度} \quad (1.3)$$

式(1.3)表示随着温度的升高，对应于强度最大值的波长变短，同时有更多的辐射能量落在可见光区域。

实际光源的辐射输出功率通常比黑体辐射小，一般称之为非黑体。如果引进一个随材料及其表面条件而变化的发射系数 ε ，那么辐射输出的方程式可变为

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ (瓦特)} \quad (1.4)$$

式中 ε 是发射系数， $\varepsilon \leq 1$ 。对一个实际的物体，发射系数也随波长而变。其平均发射率和光谱发射率的数值均有表可查[1]。非黑体的光谱强度曲线和黑体的光谱强度曲线一并绘于图 1.5 中。

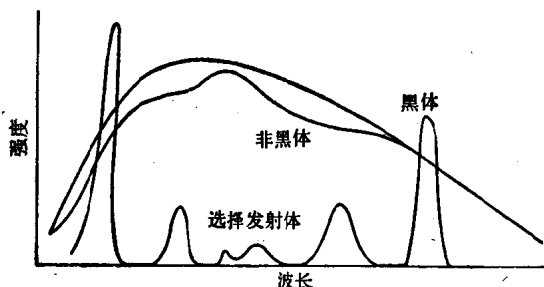


图1.5 黑体光源、非黑体光源以及选择发射体的强度随波长的变化

辐射输出总强度的最大值和给定波长的强度值受所用材料热性质的限制。白炽光源的最高工作温度被限制在大约 3000°C ，其辐射功率密度为 6 瓦/毫米^2 左右。

1.1.2 选择发射体

光的发射也能控制在很窄的波长范围内，即所谓选择发射。选择发射体的一个输出实例也表示在图 1.5 中。选择发射体的发射过程与吸收过程和连续辐射源相类似，但是仅限于有限数目的电子跃迁。它可以通过一个外部能源（譬如电场）来进行选择激发，然后以与连续辐射源相同的方式通过自发发射而发出光，但发射光的波带很窄。一般情况下存

在着各种可能的原子和分子间的跃迁，因而可在不同的波段上获得输出。窄波段的输出近似于一个单色光源。一个选择发射体的输出强度不受黑体曲线的限制。气体放电、荧光材料、磷光材料、固体光源以及激光器等都是常见的选择发射体。除激光器外，选择发射体的辐射输出通常是非相干的。（参阅 2.4 节）。

1.2 荧 光

当用给定波长的光照射某些材料时，我们观察到该材料有再发光的现象。这种新发出的光，其波长与入射光的波长不同，通常要长一些，这可用图 1.6 说明。这种现象称为荧光，它大多出现在用紫外光（一种人眼看不见的光线）照射

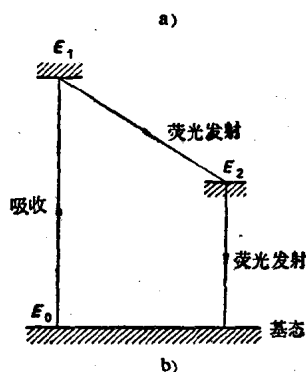
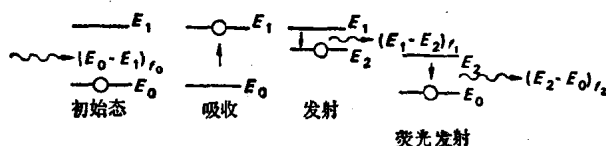


图 1.6 荧光

a) 荧光的吸收和再辐射 b) 能量跃迁图

各种矿物的时候。这时可观察到波长较长的其他颜色的辉光。然而也有几种特殊材料，其电子能级结构可使部分能量以更短的波长进行再辐射。

荧光作用的电子跃迁过程示于图 1.6 中。只有从激发态能级 E_1 通过中间能级 E_2 ，再到基态的跃迁才能得到可见的再辐射光。某些荧光材料具有亚稳态——一种不多见的长寿命状态，它能使能量在再辐射之前贮存在中间能级上，这是受激发射的基础。

1.3 受 激 发 射

受激发射是吸收的逆过程。也就是说，一个光子会导致某上能级向下跃迁，这时该能级不仅不吸收光子，反而又产生出一个新的光子。为了产生激光，两个能级上的电子数（粒子数）必须与正常状态相反。激光跃迁能级上的粒子数至少得比基态上的粒子数多50%。这样才能使得一个适当频率的光子感应出一个受激光子的可能性比光子被吸收掉的可能性来得大。

对于产生粒子数反转来说，自发发射总是起破坏作用的。由于这个原因，粒子数反转往往建立在上能级是亚稳态的某些能级之间。这时通过自发发射回到下能级的几率是很小的。在下能级的寿命比上能级的寿命短得多的时候，也能产生粒子数反转。例如氩离子激光器就是这样。

受激发射过程见图 1.7。从基态 E_0 通过吸收能量上升到 E_1 ，继而自发地衰变到 E_2 。从荧光态 E_2 跃迁到基态 E_0 时所产生的光子将激发另一个从 E_2 到 E_0 的跃迁，于是得到两个光子。第二个光子与第一个光子有相同的相位。这两个光子再产生出两个具有相同相位的光子，如此循环下去，快