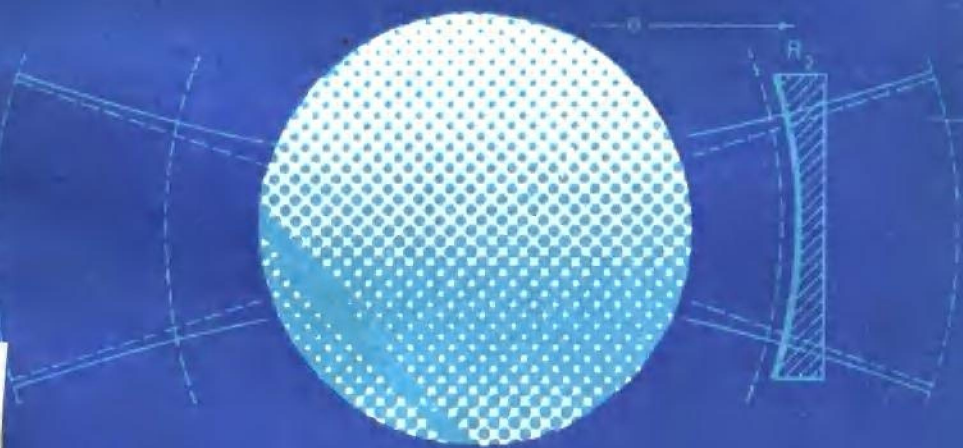


—— [美] J.T. 维德延 著 ——

激光电子学

● 陈尔绍 吴芝兰 译

● 韦典源 校



电子工业出版社

内 容 提 要

本书是一部激光与电子学相结合的教科书。它使具有射频或微波电子学基础知识的人们能够学习有关激光的原理、技术、器件和其它一些问题，书中论述的许多概念，在无线电和微波电子学中也有应用。全书共分十四章，并附有两个附录和大量习题。本书适用于物理系、电子学系和电机工程系高年级学生及研究生作为教科书，也可作为有关专业师生及科技人员参考。

激 光 电 子 学

[美] J. T. 维德延 著

陈尔绍 吴芝兰 译

韦典源 校

责任编辑 连潮东

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
重庆印制一厂印刷

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：14.625 字数：391千字

1987年10月第一版 1987年11月第一次印刷

印数：1—3000册 定价：2.45元

统一书号：15290·532

ISBN7-5053-0097-0/TN58

序 言

本书系根据作者在伊利诺斯大学电机工程系，物理系和化学系为高年级学生和低年级研究生授课的讲义写成。它试图使具有射频或微波电子学基础知识的学生方便地了解与高频域中新光源——激光相联系的一些技术、元件和问题。

因此，这部书是从麦克斯韦方程开始，研究在激光振荡中起主要作用的电磁问题，然后讨论在原子物理中导致放大和在反馈的情况下振荡的基本现象。当人们确定这种讨论能适用于所有类型激光器时，就十分倾向于把气体激光器作为说明所讨论原理的最简单系统。这部书的最后一章是初步讨论量子探测器和探测系统，以评价激光通信的一些可能性和存在的问题，这是一个迟早会涉及而且无论如何应当涉及的问题。

本书所提出的一切理论推导均使用国际单位制，但是，大部分讨论和数值例子使用厘米作为长度单位。

整部书的根本哲理是：激光技术多半是低频电子学的自然扩展。如果说激光器是量子器件，那么晶体管也是量子器件！学生应该喜爱它，而不应该被激光的量子性质所吓倒。

J. T. 维德延

常数和转换因子表

常见的常数

名 称	符号	值
光 速	c	$2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$
自由空间介电常数	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
自由空间导磁率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
普朗克常数	h	$6.6256 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
电 荷	e	$1.60210 \times 10^{-19} \text{ C}$
电子质量	m	$9.1091 \times 10^{-31} \text{ kg}$
质子质量	M_p	$1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$
玻尔兹曼常数	k	$1.30854 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
阿伏加德罗常数	N_A	$6.02252 \times 10^{23} \text{ 个原子/摩尔}$
洛施密脱数	L_0	$2.687 \times 10^{19} \text{ 个分子/cm}^3 \text{ (在 } 0^\circ\text{C 时)}$

实用的转换因子

对于能量而言: E (焦耳)

$$1 \text{ eV} \rightleftharpoons 23.06 \text{ kcal/mol} \quad 1 \text{ cm}^{-1} \rightleftharpoons 1.23941 \mu\text{m} \rightleftharpoons 23.063 \text{ 卡/摩尔}$$

对于波长而言: λ (nm)

$$10000 \text{ \AA} \rightleftharpoons 1.0 \mu\text{m} \rightleftharpoons 1000 \text{ nm} \rightleftharpoons 10^4 \text{ cm}^{-1} \rightleftharpoons 1.239 \text{ eV}$$

对于频率而言: ν (赫芝)

$$\bar{\nu} = \text{波数单位} = 1/\lambda = \text{每cm的波数} (\text{cm}^{-1})$$

罗马字母符号

A^*	A 的共轭复数
a_n	在 n 方向的单位矢量
a	单位漂移的辅助速率
$[A]$	A 的密度
A_{21}	爱因斯坦自发发射系数

A, B, C, D	光线矩阵元素
b, B	磁感应矢量
B_a	旋转常数
B_{21}	爱因斯坦受激发射系数
B_{12}	爱因斯坦吸收系数 $B_n = g_2 B_{21} / g_1$
c	光在真空中的速度
d, D	位移矢量
D_T	横向扩散系数
$D_{n(p)}$	电子(空穴)扩散系数
E	能量
e	电荷
e, E	电场强度
$E_{c(v)}$	导(价)带的能量
E_F	费米能量
$e^2, \bar{i}^2$	等效噪声发生器
F	精细度 $= FSR / (\Delta\nu_{1/2})$
f	焦距
$F(\epsilon)$	单位能量的电子分布函数
$f(E)$	费米函数
$F(J)$	转动能量
$F_{n(p)}$	电子(空穴)的准费米能级
FSR	自由光谱区 $= c/2d$
$F(z)$	前向波
$F(v)$	单位速度的电子分布函数
$FWHM$	半极大点处全宽
f_{12}	吸收振荡强度
$g(v)$	线型
$\bar{g}(v)$	在谱线中央归一化到 1 的线型, 即 $\bar{g}(v_0) = 1$
$G(v)$	振动能量
G	功率增益

I

$1/q(z)$	光束复参数 $= 1/R(z) - j\lambda/[\pi w^2(z)]$
$g_{1,2}$	$(1-d/R_{1,2})$, 谐振腔的 g 参数
g	$2J+1$, 量子态的简并度
h	普朗克常数
$\hbar$	除以 2π 的普朗克常数
h, H	磁场强度
$H_n(u)$	n 阶 n 宗量厄米多项式 $n = [(-1)^n e^{u^2}] du^n$
H_{op}	与哈密尔顿对应的算符
$I(\nu)$	在频率为 ν 时的强度
$I(\nu)$	在频率为 ν 时单位频率强度
J	角动量量子数
j	虚数 $(-1)^{1/2}$
j, J	传导电流
k	$2\pi n/\lambda$
k	波矢量 $= k\hat{a}_n$
K, E	动能
$m_{o(\nu)}$	在导(价)带中的有效质量
N	密度(数/体积)
n	粒子数差 $(N_2 - N_1)V$
n	模指数
n	折射率 $(\epsilon_r)^{1/2}$
$n(\nu)$	与频率有关的折射率
$n_o(E)$	在导带中单位能量的密度
n_e	电子密度
n_{th}	粒子数差的阈值
N_ν	在 0 和 ν 之间, 体积 V 中的模数
$N_2(\nu)$	在振动态 ν 中的氮
$N_{2(1)}$	在态 2(1) 中的原子密度
$\langle P \rangle$	平均功率 (对许多周期平均)
$\langle p \rangle$	瞬时功率 (只对几个周期平均)

p	压力
p, P	极化矢量
p_{el}	电子气中的功率
p_f	荧光功率
$p_v(E)$	在价带中单位能量的空穴密度
Q	品质因素 $= \omega W / (-dW/dt)$
g	在谐振腔中, 其振模的轴向模数, 也就是反射镜之间半波长数目
R	电阻
R	如果数值 > 1 , 则代表曲率半径; 如果数值小于 1, 则代表功率反射率
r	位置矢量 $= xa_x + ya_y + za_z$
$\text{Re}(\quad)$	量 $(\quad)$ 的实部
$R(z)$	反向波
$R(z)$	波前曲率半径
S	玻印廷矢量
S/N	信噪比
$S_T(\nu)$	单位频率的功率
T	光线矩阵
T	温度 (K)
T_e	电子项能量
TEM	横向电和磁模式
V	电压或体积
$V_{m,n}$	TEM $_{m,n}$ 模体积
v	速率、速度或振动量子数
v_g	群速
VSWR	电压驻波比
W	能量
w	漂移速度 (第十一章)
W_e	电子气的能量

w_0	最小光斑尺寸
w_s	饱和能量
$w(z)$	作为 z 函数的光斑尺寸
z_0	高斯光束的特征长度参数
Z	阻抗

希腊字母符号

α	吸收系数 (单位长度损耗)
α	汤生 (Townsend) 电离系数 (单位漂移电离速率) (第十一章)
α_c	由于振动引起的转动常数的修正
β	导波的相位常数 (弧度/长度)
β_0	满足布拉格条件的相位常数
$\gamma_{1(2)}$	能态1(或2)的衰减速率
Γ	光子通量 ($I/h\nu$)
$\gamma_0(\nu)$	小信号增益系数
$\gamma(\nu)$	与强度有关的增益系数
δ	二次发射比
δ	在弹性碰撞中, 电子能量损耗的部分
$\Delta\nu_D$	多普勒线宽
$\Delta\nu_h$	均匀线宽
$\Delta\nu_n$	自然线宽
$\Delta\nu_H$	烧孔线宽
$\Delta\omega$	以辐射频率为单位的谱线宽度
$\Delta t_{1/2}$	脉冲宽度 (半极大处全宽)
ϵ_k	电子的特征能量 $= D_T/u$
ϵ_A	原子或分子的特征能量
ϵ'	相对介电常数的实部
ϵ''	相对介电常数的虚部

ϵ_0	自由空间介电常数
ϵ_r	相对介电常数
ϵ	电子能量
η_0	自由空间的波阻抗 $(\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$
η_{ge}	量子效率
η_e	提取效率
L	特征长度
λ_g	TEM _{m,m,q} 模的波长
λ_0	自由空间波长
λ	波长 λ_0/n
μ	迁移率
μ_{21}	电偶极矩
μ_0	自由空间磁导率
ν, f	频率 (赫芝)
ν_i	电离速率 (每个电子)
ν_0	谱线中心
$\bar{\nu}$	波数 (每厘米波长的#)
ν_0	频率的碰撞
$\rho(\nu)$	在频率为 ν 时, 单位体积单位频率的能量
ρ_ν	在频率为 ν 时, 单位体积的能量
ρ	电场的反射系数
$\sigma(\nu)$	受激发射截面
$\sigma_0(\epsilon)$	碰撞截面
σ_i	电离截面
τ_1	能态 1 的寿命
τ_2	能态 2 的寿命
τ_{21}^{-1}	能态 2 衰减到能态 1 的速率
τ_p	光子寿命
τ_r	辐射寿命
ϕ, θ	相移或几何角度

ϕ	谐振腔中的光子数
ϕ_{12}	分支比
ψ	波函数
ω	辐射频率 $= 2\pi\nu$
Ω	拉比频率 $(\mu_{21}E/2\hbar)$

绪 论

二十世纪六十年代以前,光学只是一些比较成熟的工业产品,例如,光学仪器、照相机和显微镜以及科学应用的基础。后来出现了激光器,先是固体(红宝石)激光器,再是气体激光器,然后是注入式半导体激光器。现在光学已经成了许多系统、产品和设施的基础。

首先,说句开玩笑的话:“激光是寻求问题的答案”。严肃地说,几乎每个人都认识到激光在通信,数据处理、数据存储和检索,甚至在眼外科中应用的潜力。现在要回答的问题是:激光能够做以前未曾做过的事情吗?或者它能把事情做得比用以前的装置和技术更好,更经济吗?人们有趣地看到,激光的最初应用并不在上面提到的那些显而易见的领域中,而是由了解激光原理和了解要解决的问题的富有创造性的人们提出的新应用。因此,现在出现了激光经纬仪、激光仿形加工、激光切割钢板和激光聚变等应用,并开始致力于光通信的突破。激光在通信领域中的历史是说明激光“显著”应用的很好例证。

波长为 $\lambda=694.3\text{nm}$ 的红宝石激光器的频率是 $4.32\times 10^{14}\text{Hz}$,这是一个对于任何通信工程人员来说都是感兴趣的值。如果只把这个载频的1%用作信息带宽,那么所得到的通信信道要比现在最宽频带信道的容量大二至三个数量级(即 10^2 到 10^3)。由电话公司使用的某些微波无线电中继通信线路的信道宽度高达载频的10%。因此,一束激光应该能同时播送数量巨大的话路(每条话路要求带宽为4kHz)和许多套电视节目(带宽 $\sim 5\text{MHz}$)。

然而,也存在某些问题。我们既不知道如何以高达 $4\times 10^{14}\text{Hz}$ 的速率来调制这一载波,以及是否存在如此高速率的解调技术,也不知道我们的终端设备能否以这样高的速率处理信息。如

果这方面的技术不够成熟，那么我们就没有充分的把握象微波接力线路那样可靠地将信息从A点传送到远距离之处的B点。最后，对激光器的可靠性还存在一定的怀疑。因此，象微波频段那样完善的激光通信还有待于未来的发展，不过现在已经取得了一些突破。

具有很低损耗的玻璃纤维的发明，使激光通信成为能代替有线通信的富有生命力的通信手段。应当看到世界优质铜矿的资源实际上已经耗尽，而我们对于玻璃的主要原料—— SiO_2 （即沙子）毕竟还没有真正的接触。这样，激光的“显著”应用——通信直到1977年才开始进行短距离通信试验。

以上论述的要点说明，激光的显著应用并非那么直接和简单。通常，材料是主要的障碍，但这不会阻止人们寻找别的应用途径。例如，红宝石激光器的第一个主要用途是“修整”固体电路元件。此时，人们把激光能量聚焦成很小的光斑来气化剩余的材料。

基于以上分析，我们将不从应用观点来看激光，而是设法介绍激光本身的基本的简单的原理，它的辐射传播和探测元件方面的问题。“简单”这个词着重强调这部书的目的：使你对以下问题感到容易理解：

1. 激光辐射的产生过程包括哪些物理原理？
2. 激光束的传输有哪些特征？
3. 普通探测器的特性和限制是什么？

一旦你对激光基本知识有所了解，你就能够阅读更高深的书籍和现代文献以掌握量子电子学的精髓。

最后，想就内容作点说明。激光器是量子器件这是无需回避的事实。然而，为了得到对激光很好的了解，无需对量子力学的每条法则、规定、基本原理和定理都很熟悉。早在1908年真空三极管发明以前，就有可能发明激光器，到了1930年，所有必须的量子理论都已经建立起来，这时肯定应该能够发明激光器，但事实并非如此，直到二十世纪五、六十年代量子电子学蓬勃发展之

后，激光器才被发明。

产生这种繁荣景象的许多原因应归功于微波工业这一在第二次世界大战期间和以后发展起来（并且仍在蓬勃发展）的技术，微波技术的许多概念可全部为激光领域所接受，同复杂的微波管相比，激光器就某些方面而言是十分简单的。

的确，激光器比低频振荡器更容易理解。任何振荡器都只是一种具有反馈的放大器。如果我们在任意点将这个反馈系统断开，使波绕着回路传播，那么形成振荡所必需的条件是往返增益必须超过1。在低频时，有时很难区分什么是增益，什么是反馈。但对于简单的激光器来说，这种区分是很容易的。例如，考虑如图0-1所示工作于632.8nm的简单He/Ne气体激光器，如果 R 表示反射镜的功率反射率， L 表示通过窗口的单程损耗， G 表示通过放电管单程功率增益，则只要

$$G(1-L_2)R_2(1-L_1)G(1-L_1)R_1(1-L_1) \geq 1 \quad (0-1)$$

激光器将产生振荡。

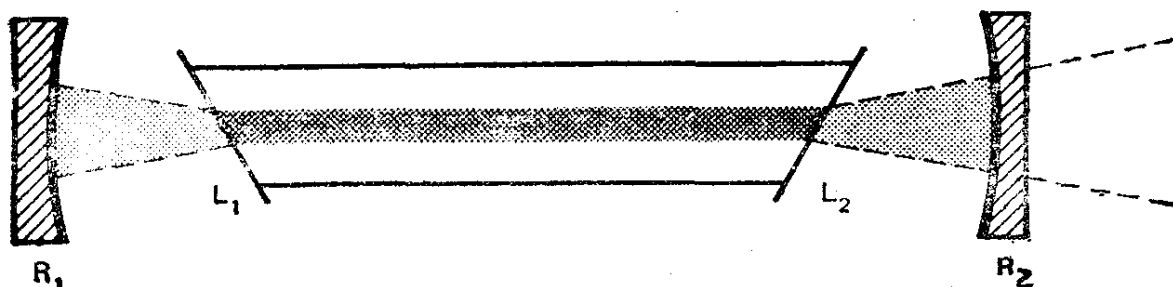


图0-1 简单激光器的示意图

在写这个方程时，我们已经在窗口1的右边断开“回路”，并观察波沿着光路来回传播。这个方程简单而又明确！

这里有些有趣的问题：（1）为了获得增益 G ，我们怎样激励系统？（2）是否存在专门制造反射镜的技术？（3）为什么要使用曲面镜？（4）为什么窗口要具有如图所示的指向？（5）光束是怎样传播的？（6）我们得到多大的功率？（显然，它必须小于系统的输入功率）。

十分有趣的是，量子理论只是在选择所包含的氦、氖气体

时，以及提供两个能量差为

$$E = h\nu \quad \nu = \frac{c}{\lambda}, \quad \lambda = 632.8 \text{ nm}$$

的能态时才予以考虑。利用几个简单方程把增益与这两个能态中的每一个态的原子数联系起来，所有其它所列的问题均可非常精确地加以讨论，而根本无需涉及器件的量子性质。

激光是量子器件，这是一个我们接受的并不回避的事实，但却常常予以忽略。

目 录

绪 论.....	I
第一章 电磁理论的回顾.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 麦克斯韦方程.....	1
1.3 波动方程.....	3
1.4 麦克斯韦方程的代数形式.....	4
1.5 测不准关系.....	5
1.6 电磁波束的发散.....	7
1.7 相干的电磁辐射.....	9
1.8 相干效应的例子.....	15
第二章 光学系统中的光线跟踪.....	21
2.0 引言.....	21
2.1 光线矩阵.....	21
2.2 一些常见的光线矩阵.....	23
2.3 光线跟踪的应用——光学谐振腔.....	25
2.4 稳定性——稳定性图.....	29
2.5 非稳定区.....	31
2.6 稳定谐振腔中的光线跟踪的例子.....	31
2.7 重复光路.....	35
2.8 初始条件——稳定腔.....	35
2.9 初始条件——非稳定腔.....	36
2.10 象散现象.....	37
2.11 连续透镜状介质.....	39
2.11.1 光线在非均匀介质中的传播.....	41
2.11.2 连续透镜的光线矩阵.....	42
2.12 用透镜对波进行转换.....	44

第三章 高斯光束.....	50
3.1 引言.....	50
3.2 预备知识——TEM波.....	50
3.3 最低阶模——TEM _{0,0} 模.....	53
3.4 TEM _{0,0} 模的物理描述.....	57
3.4.1 场振幅.....	57
3.4.2 纵向相位因子.....	59
3.4.3 径向相位因子.....	59
3.5 高阶模.....	61
3.6 高阶模的发散——空间相干.....	63
第四章 连续介质中的高斯光束.....	67
4.1 引言.....	67
4.2 介质板波导.....	67
4.3 高斯光束的 <i>ABCD</i> 定律.....	70
4.4 纤维光学波导——近似分析.....	74
4.5 纤维光学波导——精确分析.....	76
4.6 高阶TEM模.....	79
4.7 光纤中的色散.....	81
第五章 光学谐振腔.....	87
5.0 引言.....	87
5.1 简单稳定谐振腔中的高斯光束.....	87
5.2 <i>ABCD</i> 定律在谐振腔中的应用.....	90
5.3 稳定谐振腔中的模体积.....	95
5.4 不稳定谐振腔.....	97
5.5 不稳定共焦谐振腔.....	104
第六章 振荡的光学谐振腔.....	111
6.0 谐振腔的一般概念.....	111
6.1 振荡.....	111

6.2	频率选择——谐振腔 Q 值, 精细度	113
6.3	光子寿命	118
6.4	厄米-高斯模的振荡	120
6.5	衍射损耗	121
第七章 原子辐射		129
7.1	引言和预备知识	129
7.2	黑体辐射理论	130
7.3	爱因斯坦系数 A 和 B	134
7.3.1	辐射过程的定义	134
7.3.2	系数之间的关系	136
7.4	速率方程的引入——寿命加长	138
7.5	线型	142
7.5.1	均匀加宽	142
7.5.2	非均匀加宽	147
7.5.3	线型的一般评述	150
7.6	单色波跃迁速率	150
7.7	原子系统的放大作用	151
7.8	小结	155
第八章 激光的振荡和放大		159
8.1	引言——振荡的阈值条件	159
8.2	均匀加宽跃迁中的激光振荡和放大	160
8.3	均匀加宽跃迁中的增益饱和	164
8.4	非均匀加宽跃迁中的激光振荡——物理描述	171
8.5	多模振荡	175
8.6	非均匀加宽跃迁中的增益饱和——数学分析	176
8.7	放大的自发发射	180
8.8	激光振荡——各种观点	185
第九章 激光器的一般特性		194
9.1	引言——量子效率	194
9.2	连续激光器的功率	195