

非线性 激光光谱学

〔苏〕 V. S. 莱托霍夫 著
V. P. 契勃塔耶夫

科学出版社

非线性激光光谱学

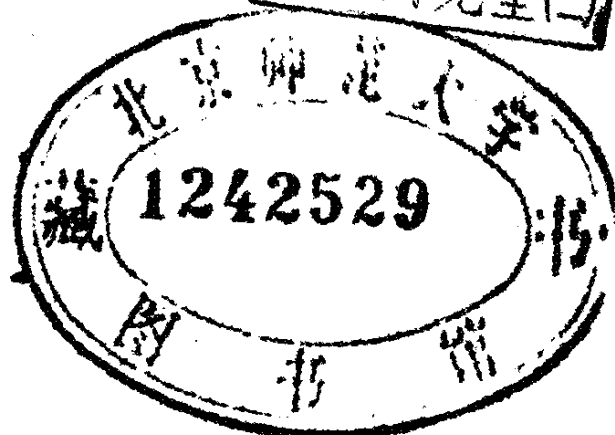
[苏] V. S. 莱托霍夫 V. P. 契勃塔耶夫著

沈乃澈 译

李恭亮 校

12/1/53

教员阅览室(二)



科学出版社

1984

内 容 简 介

本书是一本阐述非线性激光光谱学的专著，系统地介绍了这个研究领域的现状。书中分析了谱线变窄的原理和方法，以及影响谱线宽度的因素，介绍了谱线频率稳定的方法及其在光谱学应用中的最新成果。对饱和吸收光谱学、双光子谱振、非线性原子和分子光谱学及它们在物理测量中的应用均作了详尽的叙述。

本书可供高等院校教师和学生，从事光谱学研究和应用的科研工作者以及研究稳定激光的工作者参考。

V. S. Letokhov V. P. Chebotayev

Nonlinear Laser Spectroscopy

Springer-Verlag, 1977

非线性激光光谱学

〔苏〕V. S. 莱托霍夫 V. P. 契勃塔耶夫 著

沈乃激 译

李恭亮 校

责任编辑 陈菊华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1984年9月第一次印刷 印张：15 1/2

印数：0001—5,350 字数：348,000

统一书号：13031·2661

本社书号：3661·13—3

定价：2.40元

译 者 的 话

激光光谱学是激光应用中一个很重要的方面,近年来迅速发展的非线性激光光谱学取得了显著成果.

本书是一本非线性激光光谱学的专著,作者从研究激光的无多普勒窄谐振谱线出发,分析了使谱线变窄的原理和方法,以及影响谱线宽度的因素,介绍和提出了一些富有成效的谱线频率稳定方法,报道了这些方法在光谱学应用中的最新成就.

本书对饱和吸收光谱学、双光子谐振、非线性原子和分子光谱学以及它们在物理测量中的应用均作了详尽介绍.

对于原文中一些明显的错误,在译文中作了改正.

译文错误或不当之处,欢迎读者批评指正.

译 者

序 言

激光作为一种相干的光辐射源,有可能用来研究光辐射与原子和分子的非线性相互作用. 由于激光的应用,产生了一些新的研究领域,诸如非线性光学、激光光谱学、激光光化学,它们分别是量子电子学与物理光学,光谱学与光化学之间的边缘科学. 由于在上述领域中相干光辐射的应用,已发现了许多性质上新的效应和新的潜力;特别在光谱学中,高纯单色光与原子和分子之间一些颇为微妙的相互作用效应,已成为所谓无多普勒移动的非线性激光光谱学方法的基础. 这些方法已使得有可能把光谱研究的分辨率,由受多普勒谱线加宽限制的 10^5 至 10^6 提高到 10^{11} ; 目前有些研究所正在发展分辨率更高的新技术. 许多国家的科学家,对非线性激光光谱学方法的发现和改进作出了巨大贡献,尤其是美国(麻省理工学院,斯坦福大学,美国标准局,哈佛大学等)、苏联(列别捷夫物理研究所,新西伯利亚半导体研究所,光谱学研究所等)、法国(巴黎大学等)、西德(海得堡大学)和日本(东京大学). 他们所作的贡献是本书的基础. 在本书中,我们尽量完整而系统地介绍了这个研究领域的现状,采用了许多科学家和我们自己发表的文章. 有些地方,由于我们个人的兴趣似乎更多一些,着重强调了苏联科学院光谱学研究所和半导体物理研究所进行的研究工作,因而在一定程度上打乱了平衡. 遗憾的是,我们未能介绍这个课题的某些方面,我们两人相距四千公里,望读者在这方面能谅解我们. 在准备本书的英文版时,我们采用了 1975 年夏季由苏联科学出版社出

版的《非线性激光光谱学原理》一书的俄文版本。然而，我们认为必须改变其形式和内容。俄文版原为六章，本书已改为十章，篇幅也增加了。因此本书基本上是新的，书名也稍作了一点改动。我们曾共同商定本书的大纲，并讨论了每章的内容，以使全书内容相互协调，但必须分别撰写各章。第一至四章和第十章由 V. S. 莱托霍夫执笔撰写，第五至九章由 V. P. 契勃塔耶夫执笔撰写。

这本专著是首次尝试从共同的观点总结和分析激光光谱学中这个迅速发展的领域。最近，Springer-Verlag 出版了《高分辨率激光光谱学》一书（应用物理丛书第13卷），我们也参加了该书的编写工作，其中有些部分与本书是相同的，但本书对这些课题作了更详细和更广泛的论述，这不仅对于这个领域的科学家，而且对于与这个研究领域有关的大学生、研究生和专家，都将是有所裨益的。（下略）

V. S. 莱托霍夫

V. P. 契勃塔耶夫

于 1976年 8 月

主 要 符 号

"a"	表示增益介质的角标
a	光束直径
a_k	第 k 个能级的几率振幅(薛定谔绘景)
$a(w)$	极大值归一到 1 的均匀线形
A_{21}	$2 \rightarrow 1$ 跃迁的爱因斯坦系数 A
A	用原子单位表示的粒子重量
"b"	表示吸收介质的角标
$C(t)$	极化强度的余弦(同相)分量
c	光速
c.c.	"复共轭"的缩写
d	两个光束之间的距离
e	电子电荷
$\mathbf{e}$	光场偏振矢量
E	场的电分量的瞬时强度
E_i	第 i 个量子能级的能量
E	光行波的慢变化振幅(包络)
E_{st}	光驻波的慢变化振幅
E_0	弱试探波的振幅
$f = a, b$	表示介质类型的角标
f_p	由饱和产生的谐振加宽因子
g_f	饱和参数 G_f 中的系数 ($G_f = g_f \cdot P$)
$G = gP = \left(\frac{P_{12} E}{\hbar} \right)^2 \frac{1}{\gamma \Gamma}$	饱和度或饱和参数
$G_f = g_f P$	增益 ($f = a$) 或吸收 ($f = b$) 介质的饱和度
$\hbar$	普朗克常数/ 2π
h	凹陷的相对幅度(或高度)
$k, \mathbf{k}$	光波的波矢

k 玻耳兹曼常数

$l_f (f = a, b)$ 谐振介质的长度

L 腔长

$L(x) = (1 + x^2)^{-1}$ 洛伦兹轮廓

M 原子或分子质量

N_0 气体中的粒子密度

N_i 在 i 能级上的粒子密度

N_i^0 在 i 能级上的粒子初始密度(不饱和)

$n_i(\mathbf{v}) = N_i W(\mathbf{v})$ 在 i 能级上的粒子的速度分布

$n(\nu) = n_1(\nu) - n_2(\nu)$ 能级粒子数差的速度分布

$\mathbf{n}$ 在光波或观测方向上的单位矢量

$n(\omega), n_f$ 频率为 ω 时的介质的折射率

$P = \frac{c}{8\pi\hbar\omega} E^2$ 光波的光子流密度(以光子/厘米²·秒为单位)

$\mathbf{P}(t, \mathbf{r})$ 谐振介质的极化强度

$P_{12} = P = \mathbf{P}_{12} \cdot \mathbf{e}$ 跃迁偶极矩矩阵元的投影

P 气体压力

Q_i i 能级的粒子激发速率

Q 模腔的品质因子

$q_i(J) = q_i$ i 振动能级中转动支能级 J 上的相对粒子数

r 光波曲率半径

S 频率牵引因子(自稳)

$S(t)$ 极化强度的90°角相移分量

$S(\omega)$ 多普勒轮廓线形

T 温度 (K)

$u = \left(\frac{2kT}{M} \right)^{1/2}$ 气体中的粒子速度

$\mathbf{v}$ 粒子速度

$v = v_z = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$ 粒子速度在光波方向上的投影

v_0 粒子的平均速度

v_r 垂直于光波方向上的粒子速度分量(速度的径向分量)

$$v_{\text{res}} = c \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = c \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad \text{粒子速度的谐振投影}$$

v 原子或分子的绝对速度

$$V = \frac{PE}{2\hbar}, \quad V_{12} = \frac{P_{12}E}{2\hbar} \quad \text{以频率为单位表示的原子和场之间的能量相互作用}$$

$W(\nu)$ 粒子速度的分布

W_{ik} $i \rightarrow k$ 跃迁的积分几率

ω 能级之间感生跃迁的速率

$\alpha(\omega) = \kappa_a(\omega)$ 单位长度的谐振增益系数

$\alpha_{\text{eff}} = \kappa_a - \kappa_b = \alpha(\omega) - \kappa(\omega)$ 单位长度的有效谐振增益系数

$$\beta = \frac{\kappa_{b0}g_b}{\kappa_{a0}g_a} = \frac{\kappa_{b0}G_b}{\kappa_{a0}G_a} \quad \text{在具有非线性吸收的气体激光器理论中的参数}$$

Γ, Γ_f 半高度处谱线的均匀半宽(弧度/秒)

$\tilde{\Gamma}$ 谱线碰撞加宽的参数 ($\Delta\omega_{\text{coll}} = 2\tilde{\Gamma}P$, P 为气压)

$\Gamma_B = \Gamma \sqrt{1 + G}$ Bennett 空穴的半宽

γ_i i 能级的粒子数辐射衰变速率

$\gamma_{\text{coll}}^{(i)}$ i 能级的粒子数碰撞弛豫速率

$\tilde{\gamma}_i = \gamma_i + \gamma_{\text{coll}}^{(i)}$ i 能级的粒子数弛豫的总速率

$$r = 2 \left(\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} \right)^{-1} \quad \text{参数, 两个跃迁能级的粒子总寿命的倒数}$$

$$\tilde{r} = 2 \left(\frac{1}{\tilde{\gamma}_1} + \frac{1}{\tilde{\gamma}_2} \right)^{-1} \quad \text{考虑碰撞后的参数 } r$$

$$r' = \frac{1}{2} (\gamma_1 - \gamma_2)$$

$$r_{12} = \frac{1}{2} (\gamma_1 + \gamma_2)$$

γ_0 单位长度的线性非谐振损耗的系数

$\gamma_{\text{rad}} = \gamma_1 + \gamma_2$ 半高度处跃迁的辐射宽度(弧度/秒)

$\Delta = \omega_1 - \omega_2$ 两个场的频差

$$\Delta = \frac{c}{2L} \quad \text{轴模之间的频率间隔}$$

$\Delta_0 = \omega_s - \omega_0$ 增益和吸收跃迁的线中心的频率失谐

$\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$ 半高度处的谐振凹陷宽度

$\Delta\omega_c$ 腔带宽

$\Delta\omega_{\text{coll}} = 2\pi\Delta\nu_{\text{coll}} = 2\tilde{\Gamma}p$ 碰撞加宽

$\Delta\omega_D = 2\pi\Delta\nu_D = 2\omega_0 \left(2\ln 2 \frac{kT}{M} \right)^{1/2}$ 多普勒宽度

$\Delta\omega_{\text{tr}} = 2\pi\Delta\nu_{\text{tr}}$ 谱线的渡越时间宽度

$\Delta\omega_{\text{res}}$ 谐振功率峰宽度

$\Delta\omega_{\text{sp}}$ 由光波球面性产生的谐振加宽

$\Delta\omega_g = 2\pi\Delta\nu_g$ 由光波不平行性产生的谐振的几何加宽

$\delta = \frac{\Omega}{\Gamma} = \frac{\omega - \omega_0}{\Gamma}$ 场频率 ω 相对于跃迁频率 ω_0 的无量纲失谐

$\delta\omega_f (f = a, b)$ 环形激光中模不稳定区域的宽度 (竞争谐振的宽度)

θ 两个平面光波之间的夹角

$\kappa(\omega) = \kappa_s(\omega)$ 单位长度的谐振吸收系数

$\kappa_0(\omega) = \kappa_{s0}(\omega)$ 单位长度的弱场吸收系数

$\kappa_s(\omega) = \alpha(\omega)$ 单位长度的谐振增益系数

$\kappa_{s0}(\omega) = \alpha_0(\omega)$ 单位长度的弱场增益系数

Λ 粒子自由程长

λ 光波波长

ν_0 两个能级之间的量子跃迁频率 (以赫为单位)

$\rho = \frac{\gamma}{\Gamma}$ 光场和气体的相干相互作用参数 ($\rho = 1$, 相干相互作用; $\rho = 0$, 非相干相互作用)

ρ_{ii} 与第 i 个能级粒子数成正比的对角矩阵元

$\rho_{ij} (i \neq j)$ 与极化强度成正比的非对角矩阵元

$\sigma(\mathbf{v}, \omega)$ 在频率为 ω 的波场中, 速度为 $\mathbf{v}$ 的粒子能级间的辐射跃迁的截面

σ_0 在极大值处能级间的粒子跃迁截面

τ_{coll} 粒子间碰撞的平均时间

$\tau_i = \frac{1}{\gamma_i}$ i 能级的寿命

τ_{tr} 以平均速度通过光束的粒子渡越时间

τ_v 振动能级的粒子数弛豫时间

τ_r 转动支能级的粒子数弛豫时间

ϕ_0 原子束的角度

ϕ 光波相位

ϕ_{diff} 衍射角

$\chi = \chi' - i\chi''$, χ_f 介质极化率

$\psi(\mathbf{r}, t)$ 薛定谔波函数

$\Omega = \omega - \omega_0$ 场频率 ω 对于跃迁频率 ω_0 的失谐

$\tilde{\Omega} = [\Omega^2 + (2\nu)^2]^{1/2}$

$\omega = 2\pi\nu$ 场频率

$\omega_0 = 2\pi\nu_0$ 能级间量子跃迁频率

ω_c 模腔的谐振频率

$\omega' = \omega - \mathbf{k}\mathbf{v}$

$\omega_f (f = a, b)$ 增益 ($f = a$) 或吸收 ($f = b$) 介质的中心频率

目 录

第一章 引论	1
1.1 光谱线的多普勒加宽	1
1.2 无多普勒加宽的线性光谱学方法	4
1.3 饱和激光光谱学	12
1.4 双光子激光光谱学	29
1.5 与非常窄的光谐振有关的问题	31
参考文献.....	34
第二章 激光场与气体的谐振相互作用的理论基础	38
2.1 薛定谔方程——跃迁几率	38
2.2 密度矩阵方程	48
2.3 极化强度和能级粒子数, 速率方程.....	53
2.4 行波的吸收系数	56
2.5 由驻波引起的吸收饱和	59
2.5.1 弱饱和, 兰姆凹陷	59
2.5.2 强饱和, 能级粒子数效应	62
2.5.3 驻波场的相干性和非均匀性效应	67
2.6 强和弱的逆向行波	74
2.6.1 能级粒子数效应	74
2.6.2 相干效应	75
2.7 单向弱波和强波	81
2.8 多普勒加宽跃迁内光场中的斯塔克效应	85
参考文献.....	87

第三章 多普勒加宽跃迁上的饱和窄谱振	89
3.1 饱和吸收单模激光器中的谐振效应	89
3.1.1 单模激光的方程	90
3.1.2 输出功率	92
3.1.3 频率和频谱	107
3.2 独立波在吸收饱和中的谐振	116
3.2.1 试探的逆向激光波方法	118
3.2.2 不同频率的逆向激光波	123
3.2.3 不同偏振的激光波	125
3.2.4 空间分离的激光波	126
3.3 受激粒子的密度谐振	134
3.3.1 二能级原子和振转分子跃迁中的谐振	135
3.3.2 荧光室方法和有关方法	140
3.4 模相互作用的谐振效应	144
3.4.1 两个轴向模的相互作用	144
3.4.2 环形激光中两个反向行波的相互作用	148
参考文献.....	153
第四章 无多普勒加宽的双光子跃迁的窄谱振	161
4.1 双光子吸收	162
4.1.1 跃迁几率和选择定则	163
4.1.2 在两反向光行波中气体的双光子谐振线形	168
4.1.3 双光子谐振的功率位移和功率加宽	175
4.1.4 原子跃迁的双光子谐振	180
4.1.5 分子跃迁的双光子谐振	182
4.2 气体中无多普勒加宽的喇曼散射	184
4.3 谐振荧光的谱线线形	186
参考文献.....	189
第五章 耦合多普勒加宽跃迁的非线性谱振	193
5.1 双量子 and 步级跃迁	197

5.2	TLS 的基本方程	202
5.2.1	几率振幅方程	204
5.2.2	三能级原子的密度矩阵方程	207
5.2.3	三能级图式中的跃迁几率	211
5.3	气体中耦合跃迁线形	215
5.3.1	远离谐振 ($Q \gg \gamma_0, \gamma$) 时的辐射线形	217
5.3.2	谐振时弱场中的吸收线形	220
5.3.3	强场	224
5.4	三能级系统中研究谐振现象的方法	228
5.4.1	自发发射中的谐振	229
5.4.2	感生跃迁上的谐振	232
5.4.3	模交叉谐振	235
5.5	受激喇曼散射 (SRS) 的研究	237
5.5.1	跃迁的选择	237
5.5.2	观测谐振 SRS 的实验描述	238
5.5.3	谐振 SRS 的线形	241
5.5.4	谐振 SRS 的偏振特性	242
5.6	驻波场中受激喇曼散射饱和时的谐振	244
5.7	耦合的邻近跃迁的兰姆凹陷、交叉谐振	249
	参考文献	253
第六章	光谱学中的非线性窄谐振	257
6.1	非线性谐振的分辨率	258
6.1.1	吸收饱和谐振	258
6.1.2	竞争谐振	262
6.1.3	在双量子跃迁辐射宽度内的光谱学	265
6.1.4	激光辐射有限线宽的影响	267
6.2	窄谐振的极限分辨率	268
6.2.1	碰撞的影响	269
6.2.2	飞行效应对兰姆凹陷线形的影响	273

6.2.3	减小平均飞行宽度的方法	277
6.2.4	分辨率不受有限飞行时间限制的非线性光谱学的能力.....	284
6.2.5	二阶多普勒效应对谐振线形的影响	292
6.3	非线性光谱学方法的信息容量	293
6.4	非线性激光光谱学方法的灵敏度	294
6.4.1	方法的灵敏度比较	294
6.4.2	方法的极限灵敏度	295
	参考文献.....	297
第七章	非线性原子激光光谱学.....	300
7.1	自然宽度和能级寿命的测量	300
7.2	非线性谐振的碰撞加宽	310
7.2.1	主要实验结果	310
7.2.2	碰撞机制	314
7.2.3	用 TLS 方法研究单个能级上的弛豫过程.....	320
7.3	能级结构的研究	327
7.3.1	同位素结构	327
7.3.2	塞曼和斯塔克效应的研究	330
7.3.3	禁戒跃迁光谱学	334
	参考文献.....	338
第八章	非线性分子激光光谱学.....	341
8.1	能级结构的研究	342
8.1.1	分子的电子振转跃迁	343
8.1.2	超精细结构	344
8.1.3	振转跃迁上的斯塔克和塞曼效应	347
8.1.4	转动常数和同位素位移的拍测量	352
8.2	振转跃迁上谐振的碰撞加宽	353
8.2.1	吸收谱线轮廓的碰撞加宽	353
8.2.2	非线性谐振的加宽	354

8.2.3	低压下振转跃迁的均匀饱和	358
8.2.4	谐振宽度与压力的非线性关系	362
8.2.5	谐振的碰撞加宽与气体密度的关系	363
8.3	谐振用于研究非弹性碰撞	368
8.4	应用分子光谱学	371
	参考文献	372
第九章	量子电子学中的非线性窄谐振	377
9.1	用非线性吸收选模	377
9.1.1	纵模	377
9.1.2	横模	380
9.2	窄增益谱线的产生	384
9.2.1	二能级系统的窄增益谐振	385
9.2.2	三能级系统的窄增益谐振	389
9.3	用窄谐振进行激光频率稳定	393
9.3.1	非线性内吸收室的方法	395
9.3.2	非线性外吸收室的方法	405
9.3.3	非线性吸收室方法的改进	407
9.3.4	双模运转的频率稳定	411
	参考文献	413
第十章	实验物理学中的非线性窄谐振	418
10.1	基本物理常数的测量	418
10.1.1	光速	419
10.1.2	里德伯常数和氢原子的跃迁频率	422
10.1.3	电子偶素原子中的光学跃迁	427
10.1.4	基本常数恒定性的实验检验	430
10.2	量子 and 相对论效应	432
10.2.1	二阶多普勒效应	432
10.2.2	反冲效应	435
10.2.3	质能关系	439

10.2.4	左旋和右旋分子的能级分裂	442
10.3	无多普勒加宽的激光 γ 波谱学	444
10.3.1	光跃迁与核跃迁之间的联系	444
10.3.2	原子中的电子-核跃迁	447
10.3.3	分子-核跃迁	449
10.3.4	γ 和光学双共振	453
10.3.5	2γ 湮没辐射的激光感生窄谐振	455
10.3.6	激光核波谱学的一些展望	459
10.4	具有叠加吸收线的原子和分子的选择激发 ...	461
	参考文献	463
第十一章 结论		468
名词索引		470