

大气非线性光学

伏·耶·祖也夫
阿·阿·捷姆良诺夫 著
尤·得·科培金

中国工程物理研究院

大气非线性光学

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА
АТМОСФЕРЫ

Том 6

中国工程物理研究院
《国外科技资料》编辑部
1992.4

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ

Том 1

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГАЗОВЫХ
КОМПОНЕНТ АТМОСФЕРЫ**

Том 2

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ

Том 3

СПЕКТРОСКОПИЯ АТМОСФЕРЫ

Том 4

ОПТИКА АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Том 5

ОПТИКА ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

Том 6

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА АТМОСФЕРЫ

Том 7

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ

Том 8

**ДИСТАНЦИОННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
АТМОСФЕРЫ**

Том 9

ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ

译 者 的 语

原苏联科学院大气光学研究所最近编写一套大气光学现代问题科学专论,共分九册,由院士伏.耶.祖也夫担任主编。本译文为其中的第六分册——“大气非线性光学”。

该书阐述了强激光在大气中传播的特性,给出了简明的分析,提出了主要非线性光学现象产生的能量阈值。

详细讨论了激光在气体和气溶胶大气中热自作用和光学击穿的低阈值效应。

综述了强激光束在近地表路径上传播的实验的首批实际成果。例证说明了利用非线性和相干相互作用作为在大气中进行激光和光-声探测新方法物理基础的原则可能性。

本书适用于从事大气物理和光学、气象、天文、测绘、光声及激光技术的科学研究人员以及高等院校有关专业教师和高年级学生、研究生阅读参考。

该书的出版得到了国家 863 高技术强激光总体研究与论证专题(410-1)专家组的资助和支持,印刷厂付出了辛勤的劳动,这里一并表示感谢。

该书由霍广盛(第一章—第五章)和王绍丰(第六章)翻译,章冠人研究员审稿。译者感谢他在百忙中所给予的支持和指导。

由于译者水平有限,加之时间仓促、疏误之处、恳请读者批评指正。

译 者

一九九二年一月

前 言

目前,大气光学研究的一个新的领域——大气非线性光学获得了迅猛的发展。大气非线性光学研究的迫切性,归因于光学通讯、航行、遥测和周围介质激光监测设备中日益广泛地利用强激光源,从而要求上述这些系统必须要有质量的提高。这一事实激励着研究工作者必须预见到非线性光学效应在实际大气中对他们所设计的电子系统和设备精度与能量特征的影响。另一方面,为利用特殊的和最为普通的非线性和相干相互作用来作为激光探测大气参数方法的物理基础开辟了诱人的前景,而这些大气参数是线性光学传统方法和其它熟知方法所不能有效地测量得到的。

本专集是现代大气光学问题科学专论的序列文集(第六分册)。从系统性、一致性观点出发,书中阐述了强光波在地球大气的多种成份、散射、随机不均匀非线性介质中自作用过程的物理基础。

书中讨论了强光直接对介质极化作用和间接即通过辐射对束通道中气体和气溶胶微粒的热作用和有质作用而产生的极重要的光学非线性机制。

对大气的光引发和天然气溶胶—气体异常现象诊断的问题,给出了研究结果的重要数据。

本专集共分六章。

第一章内容包括大气非线性光学的基本概念和方程,大气非线性光学构成了大气物理和激光物理接合的科学方向。

给出了主要的非线性光学效应在气体和大气气溶胶中表现的一般特性和能量阈值。

第二、三章分节顺序阐述了激光束在未扰动大气中的热自作用的问题。其中,在第二章讨论了动冷情况下脉冲辐射和红外辐射非稳态聚焦束的热声散射过程。综述了辐射在湍流大气脉冲加热下空间统计研究的首批结果,以及在部分相干辐射束自作用下发生不稳定性的研究首批结果。在第三章系统归纳了稳态热自作用问题的大量研究成果。给出了孔径处不同几何和不同场分布激光束以及部分相干束稳态热畸变的分类和说明。讨论了激光束在垂直大气路径和在湍流大气中的自作用问题。引证了激光能量在大气中输运的最佳问题的数值模型。

第四章系统介绍了激光在气溶胶大气(云、雾、固态烟尘)中非线性传播问题的最新信息,其中包括水滴的正规破坏和爆炸破坏效应,水滴间介质加热效应,以及在烟尘和起化学反应的碳化气溶胶中的非线性光散射效应,等等。

第五章阐述了远程光学击穿问题的系统分析和利用激光产生空气介质人工电离区。注意力集中在固态相位和液态气溶胶微粒的红外光谱区的低阈值击穿机制上。综述了实验室和天然条件下实验研究的激光闪光特性和由于束通道中辐射阻塞而取决于源击穿的效果的结果。讨论了在烟尘空气介质中生成人工弱电离和电导通道的可能出现的物理机制。

第六章综述了利用非线性和相干光学效应作为激光探测和提高激光导航系统有效性的新方法的物理基础的应用问题。引述了定位方程的适用范围以及用强功率激光源以传统方式探测回波信号非线性畸变规律性的研究结果。阐述了用相干和非线性光学方法进行远程大气快速分析的新型激光雷

达设计的结果。

研究多种非线性光学现象工作的不完备性,特别是其在实际大气条件下表现的特性方面,客观上决定了书中个别章节在信息方面的不均衡性质。作者尽量在所有情况下反映苏联科学院西伯利亚分院大气光学研究所以及从事光学和大气物理科学计划的苏联其它单位和国外科学研究中心取得的最新研究成果。

作者衷心感谢评论家、数学物理学博士 O·A·沃利科维兹基和数学物理学博士 B·П·堪吉多夫在改进本书内容方面提出的宝贵意见和希望。

主 量 符 号

- a —— 气溶胶微粒半径
 c —— 光速
 c_s —— 声速
 c_p, c_v —— 等压、等容比热容
 D —— 扩散系数
 E —— 电场慢变化复振幅
 F —— 激光束相位阵面率半径
 $f(a)$ —— 微粒尺寸分布函数
 H —— 比焓
 I —— 辐射强度
 J —— 亮度
 K, K_s, K_a —— 光的衰减、散射、吸收有效因子
 k —— 波数
 R_B —— 玻耳兹曼常数
 m_s —— 气溶胶微粒复合折射系数
 N_0 —— 微粒浓度
 n_s —— 气溶胶微粒有效折射系数
 P —— 辐射功率
 p —— 压力
 Q, Q_s —— 比热、蒸发比热
 $\vec{R}$ —— 点矢量半径横向分量

R_s —— 激光束有效半径

R_p —— 普适常数

$\vec{r}$ —— 点矢量半径

T —— 温度

T_b —— 沸点

t —— 时间

U —— 比内能

V —— 比容

$\vec{v}$ —— 运动速度

W —— 激光能量

w —— 激光能量密度

z —— 辐射传播距离

$\alpha, \alpha_s, \alpha_a$ —— 衰减、散射、吸收体积系数

α_g —— 气体吸收体积系数

γ —— 绝热指数

ϵ —— 介电常数

ϵ_0 —— 空气未扰动介电常数

μ_a —— 气溶胶微粒吸收系数

λ —— 真空中辐射波长

ρ —— 密度

τ —— 光学厚度

ω —— 光场圆频率

χ —— 温度传导系数

标记 $n, a, g, L, b, 0$ 相应表示蒸汽相, 气溶胶, 气体, 液体相, 沸点, 初始状态.

目 录

前 言

第一章 大气非线性光学效应的一般特性和能量阈值·····	1
1.1 基本概念和关系·····	1
1.1.1 大气非线性光学效应分类·····	1
1.1.2 传播方程·····	2
1.1.3 非线性光学效应阈值确定的原则·····	5
1.2 大气折射率非线性的非热机制·····	6
1.2.1 克尔效应·····	6
1.2.2 电致伸缩效应·····	8
1.3 气体大气中的非线性光谱效应·····	9
1.3.1 激光红外辐射与气体大气共振相互作用下 的非线性光学效应·····	9
1.3.2 斯塔克动力学效应·····	15
1.3.3 分子振动-转动跃迁的双光子共振光谱···	15
1.4 光的组合散射非线性光谱·····	18
1.5 空气介质中有选择性的激光化学过程·····	20
1.6 激光束在大气中的热模糊效应的分类和阈值····· ·····	23
1.7 气溶胶光学非线性机制·····	28
1.7.1 水滴的正规蒸发·····	29

1.7.2	水滴蒸发爆炸	31
1.7.3	气溶胶燃烧	33
1.7.4	气溶胶升华	34
1.7.5	电离和光学击穿	35
1.8	激光对大气气溶胶的有质动力作用	41
第二章	脉冲辐射束的热声自作用	44
2.1	非稳态气体透镜的形成	44
2.2	光束在固有非线性气体介质中的热模糊散射	46
2.3	脉冲辐射在湍流大气热自作用下的空间统计	51
2.4	部分相干辐射在脉冲热自作用下不稳定性的 发展	60
2.5	CO ₂ 激光在非稳态动力冷却条件下的自聚焦 效应	64
第三章	激光在不混浊大气中的稳态热自作用	68
3.1	激光束畸变和品质标准分类	68
3.2	高斯激光束在均匀风流中的稳态热畸变	73
3.2.1	准直束	75
3.2.2	聚焦束	77
3.2.3	脉冲周期辐射束的自聚焦	79
3.2.4	束扫描	81
3.3	非高斯激光束的自作用	82
3.4	激光束在大气路径上的稳态热自作用	90
3.4.1	激光束在垂直路径上的自作用	91
3.4.2	激光束在湍流大气中, 风引起的随机折射	95

3.4.3	湍流大气中, 热自作用对激光束强度涨落的影响	99
3.5	部分相干束的稳态自作用	100
3.5.1	部分相干束自作用特点	101
3.5.2	多模部分相干束自作用	104
3.6	强光束在大气路径上热畸变的补偿	111
第四章	强激光束在气溶胶大气中的传播	113
4.1	在水滴正规蒸发情况下激光透明通道在水溶成	113
4.1.1	水溶胶中激光透明通道过程的主要特性	113
4.1.2	气溶胶衰减的非线性系数	117
4.1.3	介质湍流运动对透明通道透明度的影响	118
4.1.4	人造雾透明通道的实验研究	119
4.2	在水滴正规蒸发状态条件下, 激光束在含水胶路径上的传播	122
4.3	激光在水溶胶吸收微粒爆炸破裂条件下的传播	129
4.3.1	爆炸状态	129
4.3.2	在强光场下各向同性吸收水滴相爆炸的理论模型	130
4.3.3	在强脉冲 CO_2 激光场中实验研究水溶胶的光学特性	143
4.3.4	水滴爆炸蒸发时激光在气溶胶中的迁移模型	152
4.4	激光束在烟尘中的热自展宽	159

4.4.1	高能激光脉冲在烟尘中热自作用过程的特点	159
4.4.2	在吸收微粒周围, 光对介质温度扰动的非线性散射	162
4.4.3	毫秒级宽度脉冲的自展宽分析	167
4.5	有化学反应气溶胶中的非线性光学效应	174
第五章	空气介质的光学击穿	183
5.1	引言	183
5.2	用红外激光辐射形成击穿剥离中心的广义理论模型	184
5.3	用非等温级联电离近似对激光击穿气溶胶阈值特性的分析	193
5.4	考虑电子能谱的非麦克斯韦分布用电子计算机模拟气溶胶微粒蒸汽晕中的初始击穿动力学	199
5.5	激光在大气中传播时的击穿源和透射系数的统计学	208
5.6	激光火花实验研究	217
5.7	空气介质次级电离区的形成	201
第六章	用非线性光学法和相干光学法对大气进行激光探测	230
6.1	强激光探测一般特性	230
6.2	气溶胶介质中回波信号的非线性畸变	231
6.3	含尘大气的激光发射分析	237
6.4	利用声光现象诊断光束通道中的介质	244
6.5	根据进入激光光学反馈通道中的大气对超弱回波信号进行非线性探测	249

6.5.1	关于宽频带激光器对频率相关外部作用 反应的分析	250
6.5.2	窄频带连续激光对相干回波信号的非线 性响应	262
6.5.3	用宽频带光谱 ЛП 激光雷达对大气中体 异常进行超灵敏度诊断	263
6.5.4	相干激光雷达与回波信号在谐振腔内的 外差作用	267
6.6	气体介质和气溶胶介质复合散射非线性光谱 学方法	270
6.6.1	多光子光学混合下气体介质远距离光谱 测量	270
6.6.2	应用微粒形状谐振非线性复合光散射效 应进行探测	277

第一章

大气非线性光学效应的一般特性和能量阈值

1.1 基本概念和关系

1.1.1 大气非线性光学效应分类

激光的特点，在于它具有空前高的参数（单色性，方向性，相干性和亮度），这些参数对激光束在大气中的远距离传播，形成多种非线性效应提供了条件^[46]。

激光束在与介质发生非线性相互作用的过程中，其性质要经受复杂的变化，因此，产生非线性效应的条件也随之改变。辐射与介质相互间要产生影响。大气是一种复杂的运动介质，在该条件下研究激光非线性变化过程，是大气非线性光学的主要内容。

激光物理学中，研究四种基本形式的激光束变化^[42]。但是，只有下列形式的这些变化，才属于非线性效应。

频率变化所包括的非线性效应，有谐波的产生，频移、受激散射。振幅的变换，改变了光在介质中的衰减性质，这相当于非线性吸收和澄清现象或自感应透明效应。自聚焦、自散焦、自管道化相当于空间变化效应，这种非线性相互作用

过程，引起光束的焦斑形状与亮度的变化。最后，时间变化就是激光脉冲的结构发生变化。自散焦、自聚焦、自管道化、脉冲压缩和膨胀，形成孤立子 (солитон)，这些非线性效应称为自作用效应^[9]。在出现这些效应时，辐射频率几乎是不变的。

根据激光与物质相互作用的物理机制，非线性光学过程可以划分为两组。属于第一组的有共振过程（饱和光谱效应^[42]，动力冷却效应^[35]，受激复合散射^[1]，激光化学效应^[66]，等等）。第二组包括所谓非共振相互作用（气体和气溶胶中的热非线性效应^[46]，克尔效应^[58,76]，电致伸缩效应^[70,76]，光学击穿^[47]，热化学效应^[27]，非共振光谱效应^[2]，等等）。

所有上面谈到的问题，既属于均匀介质中的非线性光学问题^[13]，也是大气非线性光学问题^[46]。但是，大气非线性光学问题是有特点的。其特征是过程的多因子性和倍增性（非叠加性）。大气气象参数的空间不均匀性和随时间的不定常性导致一定的非线性效应，在不同路径点上达到的条件也不相同。

1.1.2 传播方程

在非线性光学效应作用条件下激光的传播可以用麦克斯韦方程组描述^[23]之：

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \mathcal{E} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \\ \operatorname{rot} \mathcal{B} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \bar{D} &= 0, \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0\end{aligned}\quad (1.1)$$

式中 $\mathcal{E}$ 和 $\mathcal{B}$ ——电场和磁场强度， $\bar{D}$ 和 $\bar{B}$ ——电位移和磁感应强度， $\vec{j}$ ——电流密度。麦克斯韦方程加上材料方程，在各

向同性介质中，该方程可写成：

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad j = \sigma \vec{E} \quad (1.2)$$

式中 ϵ ——介电常数(磁导率认为等于1), σ ——介质电导率。

由(1.1)可以得到电场强度满足的更普遍的矢量波动方程

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\epsilon \vec{E}) = -\nabla(\vec{E} \nabla \ln \epsilon) + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial(\sigma \vec{E})}{\partial t} \quad (1.3)$$

考虑到在单色场光波周期时间内, ϵ 和 σ 变化甚小的因素

$$\vec{E} = \frac{1}{2} \vec{E}(\vec{r}, t) e^{-i\omega t} + \text{kc} \quad (1.4)$$

由(1.3)应得出

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E} + k_0^2 \vec{E} = & -\nabla(\vec{E} \nabla \ln \epsilon) - \frac{2ik_0 \epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ & + i \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中

$$\epsilon = \epsilon + i \frac{4\pi\sigma}{\omega} = \epsilon + i \frac{\alpha}{k_0} \quad (1.5a)$$

为复介电常数, α ——介质吸收系数, $k_0 = \omega/c$ ——真空中的波数。对于弱吸收介质 ($\epsilon \gg \sigma/\omega$), 当波的极化效应不大时, 由式(1.5)得出

$$\Delta \vec{E} + k_0^2 \epsilon \vec{E} = -\frac{2ik_0 \epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

为了进一步研究, 最后求 $\vec{E}$ 的方程采用

$$\Delta \vec{E} + k_0^2 \epsilon \vec{E} = 0 \quad (1.7)$$

式中忽略了式(1.6)的右边部分, 只保留了 $\vec{E}$ 随时间变化部分。

在非线性介质中, 复介电常数决定于波的强度

$$I = \frac{c \sqrt{\epsilon_0}}{8\pi} |\vec{E}|^2,$$