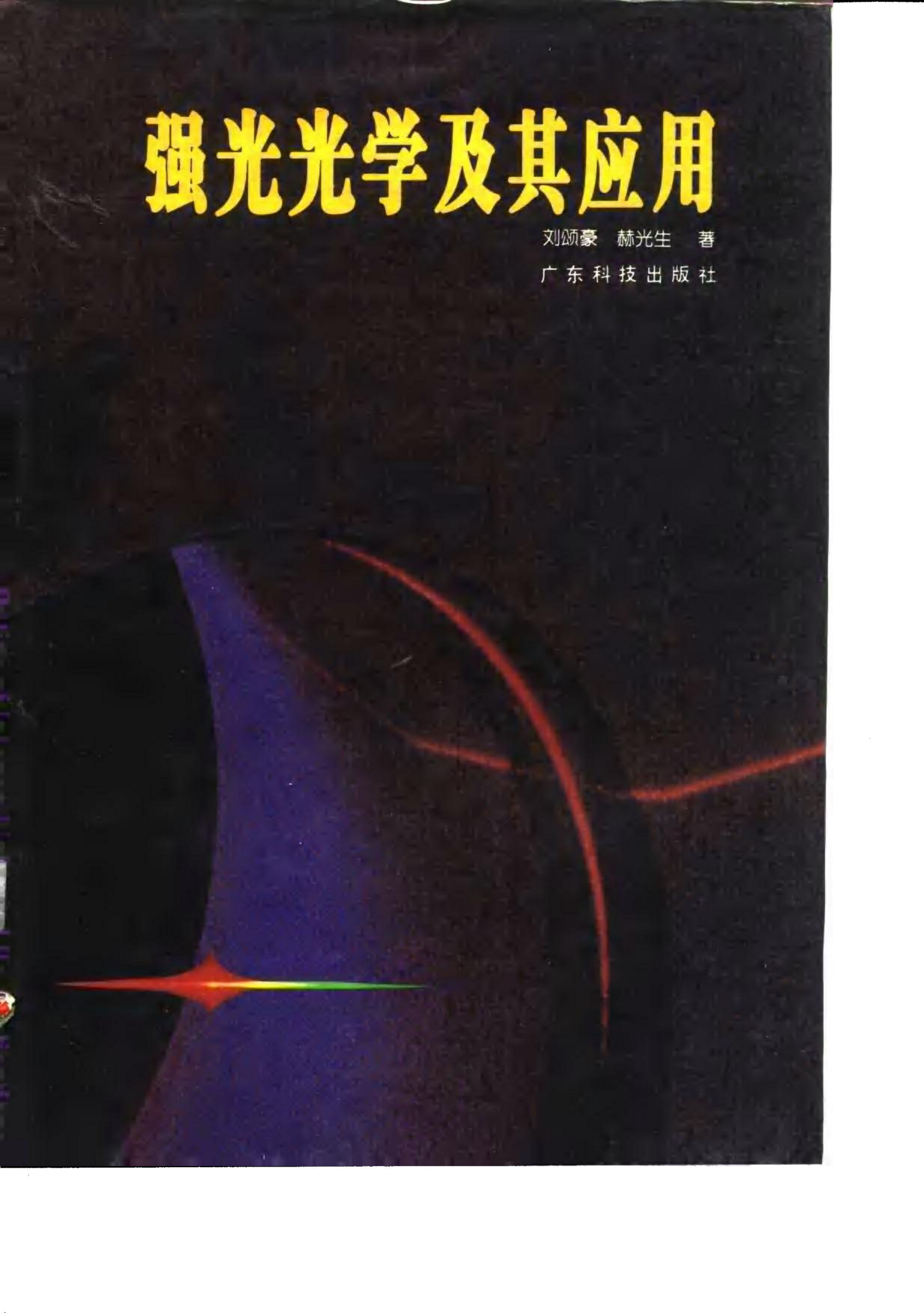


强光光学及其应用

刘颂豪 赫光生 著

广东科技出版社



强 光 光 学 及 其 应 用

刘颂豪 赫光生 著

广 东 科 技 出 版 社

内 容 简 介

本书专门介绍随激光技术的出现而发展形成的一门新兴分支学科——强光光学(非线性光学)。书中着重介绍各种强光光学效应的基本原理、实验技术、研究成果、应用前景和发展展望。

书中内容的论述简明严谨、自成体系,包含了作者自己的学术贡献与独特见解。

本书同时兼具专业教科书和学术研究参考书的特点,既可供高等学校有关专业的师生作为教学参考书使用,也可供光学、物理、化学、光电子学、激光生物医学等领域的科技工作者参考。

全书附有彩图(照片)10幅,形象地演示了有关强光光学效应的表现形态。

图书在版编目(CIP)数据

强光光学及其应用/刘颂豪等著. —广州:广东科技出版社,1995. 1
ISBN 7-5359-1102-1

- I. 强…
- II. 刘…
- III. 光学-应用
- IV. O43

出版发行:广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路11号)

经 销:广东省新华书店

印 刷:广州彩色印务有限公司

规 格:787×1092 1/16 24.75印张 2插页 字数570 000

版 次:1995年1月 第1版

1995年1月 第1次印刷

印 数:1—1 000册

ISBN 7-5359-1102-1

0·73 定 价:30.00元

本书承广东优秀科技专著出版基金会推荐与资助出版



广东优秀科技专著出版基金会

广东优秀科技专著出版基金会

顾问、评审委员会

顾 问：钱伟长

(以下按姓氏笔画为序)

王 元	卢鸣谷	池际尚	李 辰
李金培	吴中伦	吴良镛	武泽民
郎景和	赵善欢	高由禧	裘维蕃
蒲蛰龙	谭浩强		

评审委员会

主 任：蒲蛰龙

委 员：(以姓氏笔画为序)

马俊林	邓铁涛	卢永根	卢明高
伍尚忠	许学强	刘振群	刘颂豪
李 辰	李任先	李岳生	李宝健
李炳熙	何镇陆	陈兴业	张士勋
张展霞	罗元恺	罗征祥	赵元浩
赵善欢	高由禧	高惠广	徐名滴
徐秉铮	黄达全	黄衍辉	彭文伟
蒲蛰龙	欧阳莲		

前 言

本书专门介绍随激光技术的出现而发展形成的一门新兴分支学科——强光光学（非线性光学）。这门新兴学科，主要研究强激光与物质相互作用过程中出现的一系列新现象与新效应。通过对这些新现象与新效应的研究，可以大大加深人们对光与物质相互作用的本质和规律性的认识，同时又为一系列具有重要价值的科学和技术应用提供新的物理基础。基于这种原因，自本世纪60年代中期以后，非线性光学一直是激光技术、量子电子学和物理学科范围内最活跃的研究领域之一。

作者曾长期在中国科学院从事与激光和强光光学有关的基础研究，对这一新兴技术学科有比较深入和全面的了解，同时也对这一领域的发展作出了自己的一份贡献。以上两方面的因素，构成了作者撰写本书的基础。

本书初稿，曾在80年代前后，以“强光光学（非线性光学）”专题讲义的形式，先后在中国科学技术大学、南京工学院（现东南大学）、长春光学精密机械学院、哈尔滨工业大学、上海科学技术大学、中国人民解放军国防科学技术大学等高等院校为物理、光学、激光与电子学等专业的教师与研究生讲授试用过。以后又经过多次补充与修改，最后以目前的形式定稿出版。

作者期望本书能同时兼具大学教学参考书与专业学术参考书的特点。撰写本书的目的，是希望读者通过阅读此书，对强光光学（非线性光学）这一新兴学科的主要内容与发展趋势，有一概括而又深入的了解。为此，编写的内容力求重点突出，概念明了，轮廓清晰，叙述简明。在这门学科领域内的参考文献成千上万，因此本书只能列入那些起过重要作用的早期奠基性文献，以及少数在行文论述与公式推导中被直接引用到的文献。

非线性光学领域内的国际知名学者、美国加州大学伯利克分校的沈元壤（Y. R. Shen）教授，曾经参与本书初稿大纲的拟定，阅读过部分初稿并提出过宝贵建议，作者在此向他表示感谢。对本书的形成和最后完成有所贡献的尚有以下学者与教授：雷仕湛、吴鸿兴、杨正名、沈柯、李淳飞、邓飞帆、王润文。另外，崔一平教授协助撰写了本书第十章，廖常俊教授和郭旗副教授协助撰写了本书第十一章。对以上提到的诸位同仁，作者在此谨致谢忱。

本书采用国际单位制（SI）。

由于水平所限，书中疏漏与错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

刘颂豪 赫光生

彩图插页说明

彩图 1 强激光作用下引起的三种光频转换效应

图中,左部为若丹明 6G 染料液盒,右部为含有空气沉积浮尘的酒精液盒,内置方形倍频晶体.高功率脉冲 1.06 微米波长的红外激光由左端入射,首先在染料液盒内引起双光子荧光发射(图中左部黄色光柱),然后引起酒精中悬浮尘粒的可见光散射(图中白色光柱),最后经倍频晶体后引起 0.53 微米波长的倍频光散射(图中右部绿色光柱).

彩图 2 激光气体击穿效应

高功率脉冲 1.06 微米红外激光经透镜聚焦后在空气中引起火花击穿.

彩图 3 液体中的受激拉曼散射(SRS)效应

高功率 0.53 微米激光经聚焦后在充有二甲亚砷液体的 10 厘米长液盒内产生 SRS 时拍得的照片,绿色激光由左方入射.(a)为不经有色滤光片拍摄的照片,显示出由绿色入射激光和红色 SRS 光所形成的散射光柱;(b)为经过透红滤光片拍摄的照片,单独显示前向 SRS 光束沿传播方向上的增强情况(可进一步参见正文 § 5-2).

彩图 4 反向受激布里渊散射(SBS)效应

高功率脉冲 0.53 微米激光在 10 厘米长二甲亚砷液盒内产生反向 SBS 的法-珀干涉仪光谱环照片,其中图右半侧靠外缘的半圆环是作为参考比较用的入射激光干涉环.通过这种测量可以确定 SBS 谱线的宽度和相对频移(可进一步参见正文 § 5-5).

彩图 5 反向受激散射的相位共轭效应

高功率脉冲 0.53 微米入射激光(左),出自二甲亚砷液体的反向 SBS(中)以及反向 SRS(右)输出相干辐射的远场分布图.(a)为泵浦激光不经过像差板而直接入射的情况,(b)为泵浦光经过像差板后入射的情况,可见入射光束发散角明显扩大,而两反向散射光束发散角基本不变,显示出反向受激散射光束的相位共轭特性(可进一步参见正文 § 7-4).

彩图 6 高阶相干拉曼发射效应

高功率脉冲 0.53 微米激光聚焦在方解石晶体后引起的前向 SRS 和拉曼增强四波混频效应.(a)为在高于阈值不多泵浦水平下前向输出相干光辐射近场图,包含了透过的泵浦光、第一级斯托克斯(S_1) SRS 光和第二级斯托克斯(S_2)之环状相干辐射光;(b)为在同样泵浦条件下经过透红滤光片拍摄的前向输出近场图,表明由四波混频导致的空心 S_2 辐射光环;(c)为较高泵浦水平下经过透红滤光片拍摄的前向输出近场图,表明高阶斯托克斯相干辐射成分;(d)为同样泵浦条件下经过透蓝滤光片拍摄的照片,表明高阶反斯托克斯相干辐射成分(可进一步参见正文 § 5-3).

彩图 7 液芯光纤内的受激克尔散射(SKS)效应

高功率脉冲 0.53 微米激光聚焦入射到充有 CS_2 液体的空心光纤系统后产生多级

SRS 和 SKS 相干辐射输出. (a) 为实验装置图, 可看出泵浦光由前方第一个液盒内入射, 经过液芯光纤和第二个液盒输出后, 再经由后方的光栅反射后在观察屏上形成超宽带光谱; (b) 为输出光谱分布细节图, 可看出由右至左排列的各条窄谱线分别为泵光谱线及各级斯托克斯 SRS 谱线, 而附加在以上各条窄谱线左侧的宽谱带则是 SKS 的贡献 (可进一步参见正文 § 5-6).

彩图 8 超短强激光脉冲在透明介质内产生连续谱相干光辐射效应

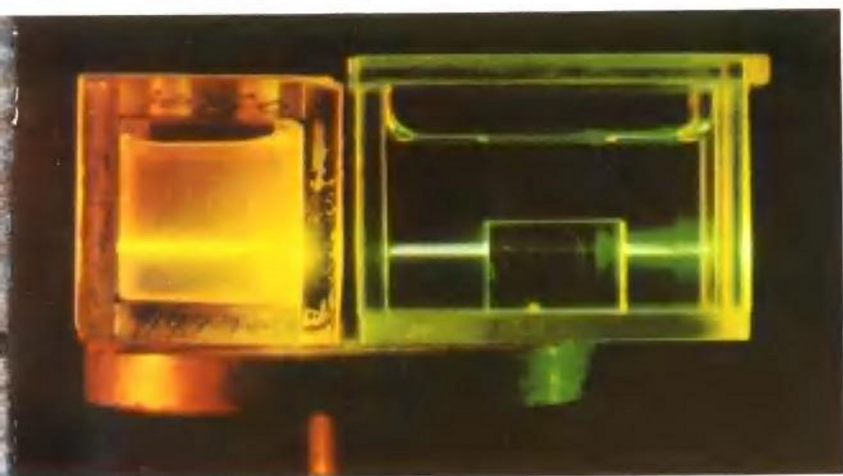
脉冲宽度为 0.5 皮秒之 0.6 微米红色激光束在充有重水的 5 厘米长液盒内产生的前向超加宽相干光输出光谱结构. (a)、(b) 和 (c) 是输出光束经光栅反射后再经过一个垂直置放的柱面透镜聚焦后形成的光谱分布, 故垂直方向表示不同光谱成分传播方向与入射泵浦光方向之间的夹角变化. 其中, (a) 表明沿非轴向传播的由四光子参量作用导致的频移相干光辐射贡献, (b) 表明沿轴向传播的由自相位调制作用导致的频移相干光辐射贡献, (c) 表明由轴向与非轴向成分叠加而成的总相干辐射光谱结构. 图 (d) 为在较高泵浦水平下输出光束经光栅反射后再经过一个球面透镜聚焦后形成的相干光谱分布, 此种聚焦安排下轴向与非轴向光谱成分不再能被分离 (可进一步参见正文 § 3-5 和 § 4-3).

彩图 9 双光束简并四光子参量效应

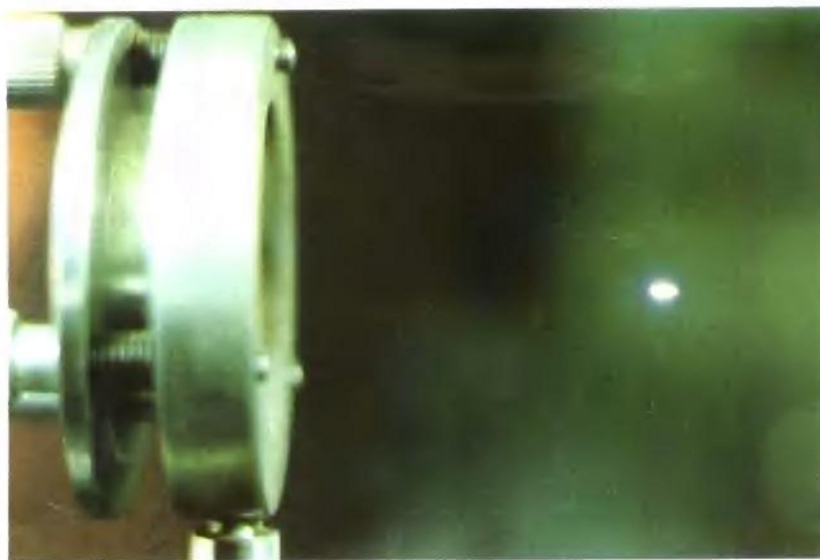
由波长相同 (0.6 微米) 的两束超短 (0.5 皮秒) 脉冲激光束在充有 CS_2 液体的 1 厘米长液盒内产生的前向相干辐射的近场图分布, 其中圆状的相干辐射光环是通过简并的四光子参量作用所产生 (可进一步参见正文 § 3-5).

彩图 10 强激光在液体内引起的自聚焦效应

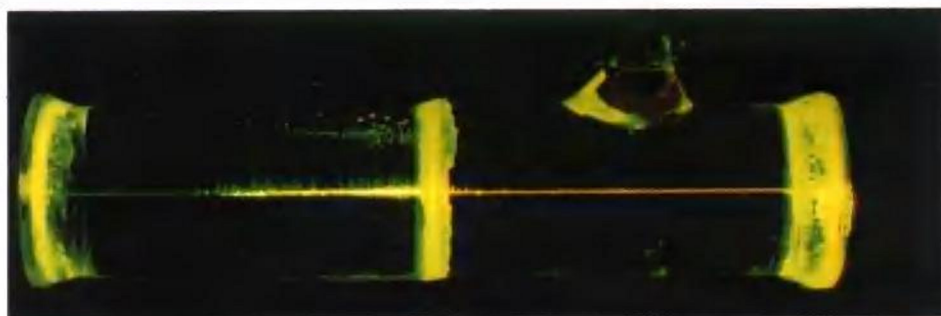
持续时间为 0.1 纳秒的高功率脉冲激光束在充有 CS_2 的 10 厘米长液盒内所产生的自聚焦效应, 其中由聚焦透镜所产生的几何焦点位于液盒中央部位. (a) 为较低入射功率水平的情况, 无自聚焦效应产生; (b) 为较高功率水平的情况, 此时可看出经过几何焦点后光束自陷现象的出现 (可进一步参见正文 § 4-3).



彩图 1



彩图 2

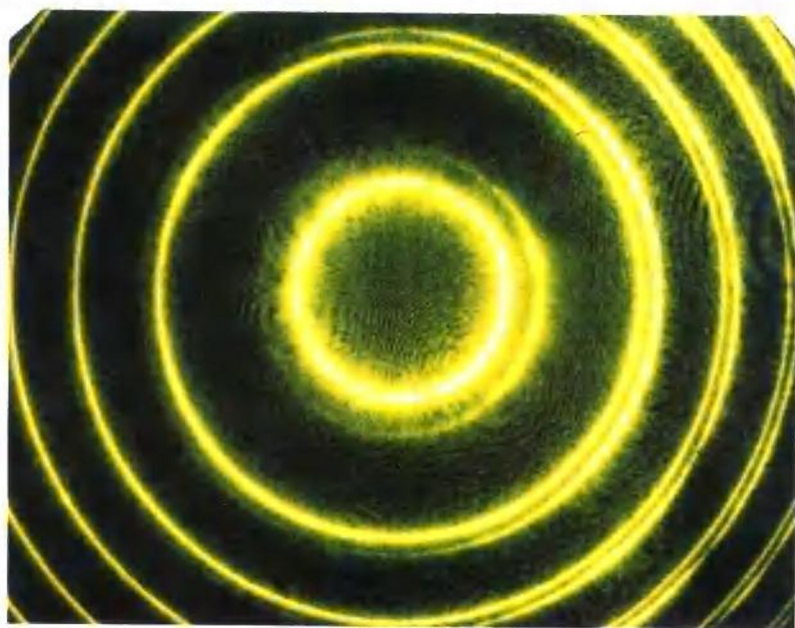


(a)



(b)

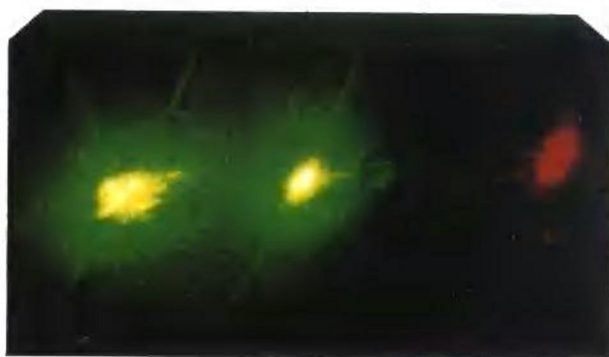
彩图 3



彩图 4



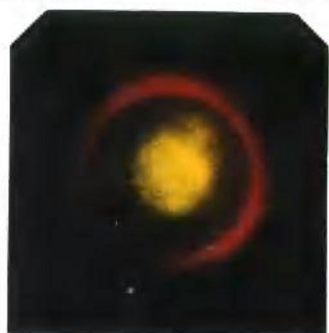
(a)



(b)

彩图 5

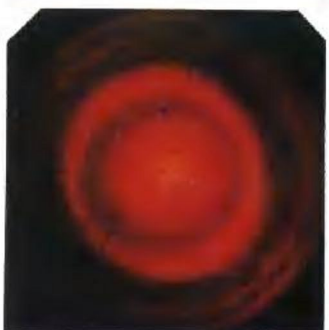
(a)



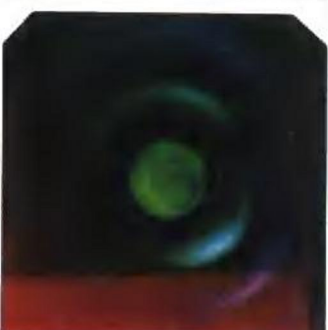
(b)



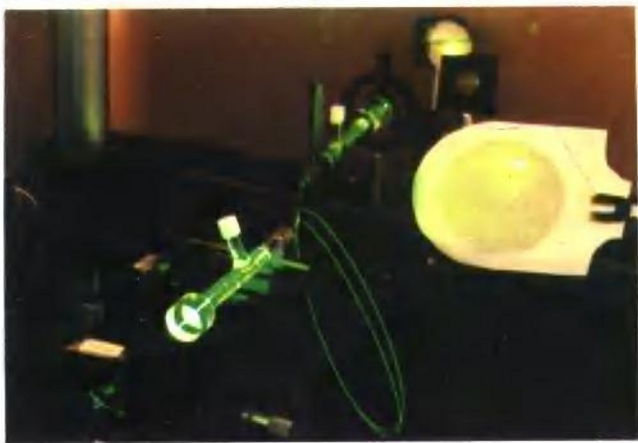
(c)



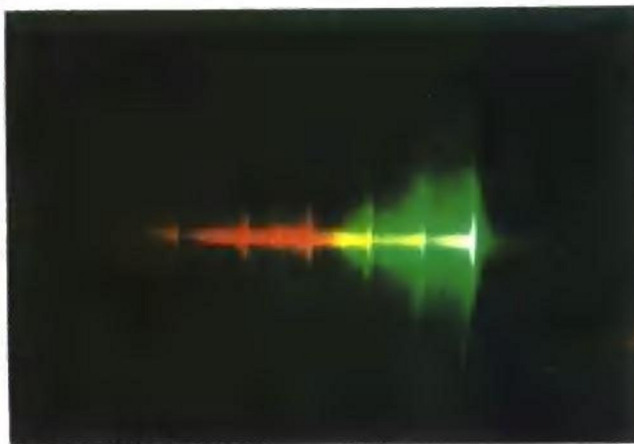
(d)



彩图 6

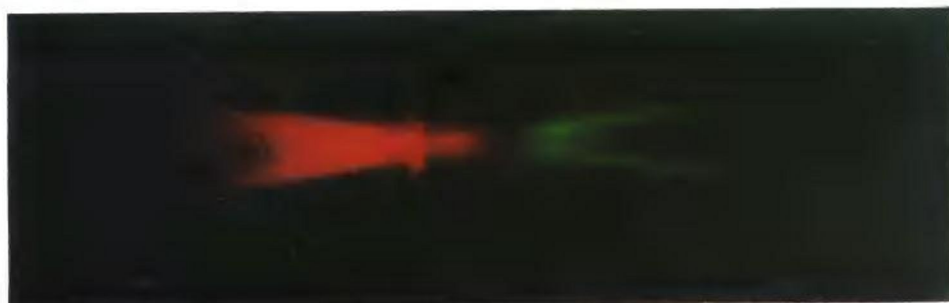


(a)



(b)

彩图 7



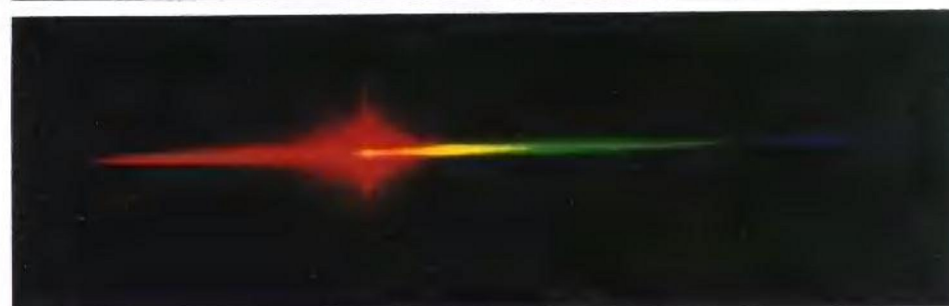
(a)



(b)



(c)



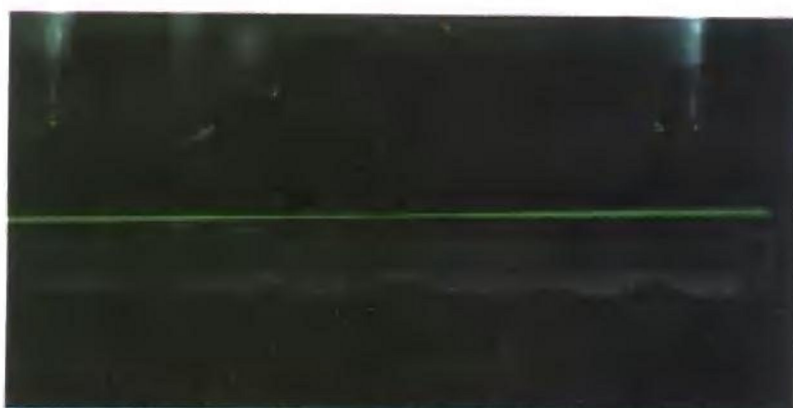
(d)

彩图 8

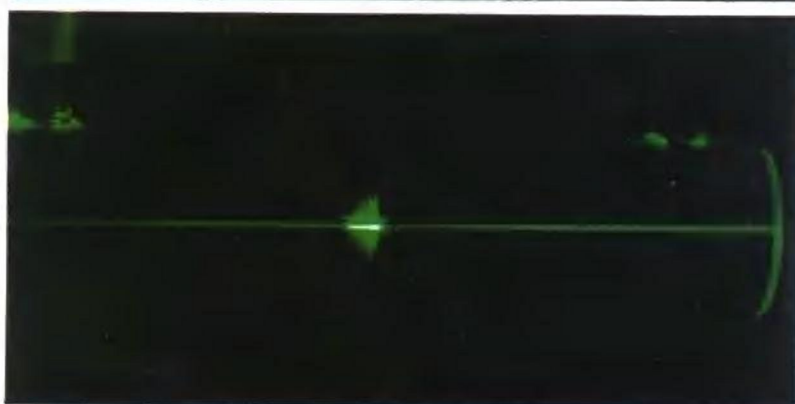


彩图 9

(a)



(b)



彩图 10

目 录

第一章 强光光学概述	1
§ 1-1 强光光学的学科定义和发展历史.....	1
§ 1-2 强激光与物质相互作用的主要特点.....	3
§ 1-3 强光光学效应的应用价值和科学意义.....	5
第二章 非线性电极化过程的基础知识	8
§ 2-1 光学介质的非线性感应电极化效应.....	8
§ 2-2 光学介质非线性电极化率的基本性质	11
§ 2-3 非线性作用的耦合波方程	15
第三章 光学倍频、混频与参量效应	20
§ 3-1 光学倍频(二次谐波)效应	20
3.1.1 基本物理图象描述	20
3.1.2 光学二次谐波的基本理论	22
3.1.3 产生光学二次谐波的工作物质	25
3.1.4 产生光学二次谐波的实验装置	28
§ 3-2 光学和频与差频效应(三波混频)	30
§ 3-3 光学参量放大与振荡效应	32
3.3.1 光学参量效应的物理解释	32
3.3.2 光学参量放大和振荡条件的推导	33
3.3.3 光学参量放大器实验系统	35
3.3.4 光学参量振荡器实验系统	35
§ 3-4 光学三次谐波和四波混频效应	37
3.4.1 四波混频的物理描述	37
3.4.2 三次谐波效应	39
3.4.3 可调谐四波和频效应	40
§ 3-5 简并和部分简并四光子参量混频	42
3.5.1 部分简并四光子参量混频效应	42
3.5.2 简并四光子参量混频效应	43
§ 3-6 产生光学二次谐波的特殊技术	45
3.6.1 产生二次谐波的特殊实验	45
3.6.2 出自表面或交界面的二次谐波效应	45
3.6.3 光学纤维内的二次谐波效应	46
第四章 强光引起的折射率变化与自聚焦、自调制、自加宽效应	48
§ 4-1 强光引起的介质折射率感应变化	48

4.1.1	强光引起介质折射率变化的物理机制	48
4.1.2	各向同性介质中单光束入射引起的折射率变化	50
4.1.3	各向同性介质中双光束入射引起的折射率变化	52
4.1.4	二阶非线性电极化过程导致的折射率变化(光频普克尔斯效应)	55
4.1.5	光克尔效应和电致伸缩效应导致的折射率变化	58
§ 4-2	强光自聚焦效应(稳态情况)	61
4.2.1	自聚焦现象概述	61
4.2.2	稳态自聚焦理论——光场的波动方程	63
4.2.3	场方程的近似解析求解(无像差近似)	64
4.2.4	场方程的数值求解	67
§ 4-3	动态自聚焦与自调制、自加宽效应	68
4.3.1	动态情况下的场方程	68
4.3.2	运动焦点特征	69
4.3.3	运动焦点引起的自调制和频谱加宽效应	70
第五章	光的受激散射效应	75
§ 5-1	光的散射现象概述	75
5.1.1	光的散射现象的起因	75
5.1.2	光的散射现象的分类	76
5.1.3	光的受激散射与普通(自发)散射间的区别	77
§ 5-2	受激拉曼散射理论	78
5.2.1	拉曼散射过程的量子理论描述	78
5.2.2	自发和受激拉曼散射几率表示式	81
5.2.3	受激拉曼散射增益因子和阈值条件	83
§ 5-3	受激拉曼散射实验规律性	85
5.3.1	实验装置和散射介质	85
5.3.2	受激拉曼散射的方向性	87
5.3.3	产生高阶相干拉曼辐射的两种不同机制	87
5.3.4	拉曼共振增强的自聚焦效应	90
§ 5-4	自旋反转、电子跃迁和纯转动跃迁受激拉曼散射	93
5.4.1	自旋反转受激拉曼散射	93
5.4.2	电子跃迁和纯转动跃迁受激拉曼散射	97
§ 5-5	受激布里渊散射效应	99
5.5.1	布里渊散射过程的物理描述	99
5.5.2	受激布里渊散射的增益因子	101
5.5.3	受激布里渊散射的实验研究	103
§ 5-6	受激克尔散射效应	105
5.6.1	有关光频克尔效应的背景知识	105
5.6.2	受激瑞利翼散射	105
5.6.3	超宽带受激散射现象的发现	106

5.6.4	受激克尔散射的理论模型	109
5.6.5	实验结果与理论比较	112
第六章	瞬态相干光学效应	115
§ 6-1	瞬态相干作用的定义和特点	115
§ 6-2	自感透明效应	116
§ 6-3	光子回波效应	121
§ 6-4	光学章动效应	125
6.4.1	布劳赫(Bloch)方程的建立	126
6.4.2	瞬态相干辐射场方程	128
6.4.3	光学章动效应的求解	129
§ 6-5	光学自由感应衰减效应	131
第七章	光学相位共轭效应	135
§ 7-1	相位共轭波的定义和功用	135
§ 7-2	四波混频产生相位共轭波的理论描述	138
7.2.1	简并四波混频产生相位共轭波	138
7.2.2	四波混频产生相位共轭波的全息光栅解释	140
7.2.3	四波混频产生相位共轭波的共振增强效应	143
§ 7-3	四波混频产生相位共轭波的实验研究	144
7.3.1	非共振介质产生相位共轭波的研究	144
7.3.2	共振介质产生相位共轭波的研究	146
§ 7-4	反向受激散射产生相位共轭波	149
7.4.1	技术发展的背景考虑	149
7.4.2	反向受激散射产生相位共轭波物理解释	151
7.4.3	非聚焦入射情况下的理论描述	152
7.4.4	聚焦入射情况下的理论描述	155
7.4.5	机理解释的判断实验	160
§ 7-5	产生相位共轭波的其他方法	162
第八章	光学双稳态效应	164
§ 8-1	效应研究发展概述	164
§ 8-2	光学双稳态过程的基本理论描述	166
§ 8-3	光学双稳态装置的要求和分类	170
§ 8-4	光学双稳态效应实验研究简介	171
8.4.1	纯光学控制法-珀干涉仪型双稳态装置的运转特性	171
8.4.2	准共振增强瞬态光学双稳特性研究实例	173
8.4.3	光电反馈控制法-珀干涉仪型双稳态装置	177
8.4.4	内全反射型光学双稳态装置	178
第九章	强光光谱学效应	180
§ 9-1	背景知识(谱线加宽因素)	180
§ 9-2	饱和吸收光谱学效应	184

9.2.1	效应概述	184
9.2.2	有关理论的结果	186
9.2.3	实验研究简述	188
§ 9-3	双光子吸收光谱学效应	191
9.3.1	效应概述	191
9.3.2	有关理论的结果	192
9.3.3	双光子吸收光谱术实验研究简述	193
§ 9-4	相干拉曼和四波混频光谱学效应	195
9.4.1	效应概述	195
9.4.2	相干反斯托克斯拉曼(CARS)光谱学效应	196
9.4.3	拉曼感应克尔效应(RIKE)光谱术	200
9.4.4	相干布里渊光谱(CBS)分析术	201
9.4.5	拉曼增益(RGS)光谱术与反拉曼(IRS)光谱术	203
§ 9-5	激光偏振光谱学效应	204
9.5.1	消多卜勒加宽饱和吸收偏振光谱学效应	205
9.5.2	CARS 偏振光谱学效应	207
9.5.3	双光子吸收偏振光谱学效应	208
9.5.4	分子吸收偏振标定光谱术	209
§ 9-6	激光光声光谱学技术	210
9.6.1	原理概述	210
9.6.2	光声光谱学实验技术	212
§ 9-7	激光光电流光谱学效应	214
9.7.1	效应概述	214
9.7.2	实验研究简述	215
9.7.3	光电流光谱术的特点和应用范围	217
§ 9-8	激光光谱学技术的应用和发展	218
9.8.1	对可调谐单色激光源的要求	219
9.8.2	激光光谱分析中的特种技术	221
9.8.3	激光光谱学技术的主要应用领域	224
§ 9-9	激光分离同位素	228
9.9.1	激光分离同位素的基础知识	228
9.9.2	激光分离同位素的方案分类	230
9.9.3	原子系统同位素分离实验	231
9.9.4	分子系统同位素分离实验	233
第十章	高时间分辨光谱学	237
§ 10-1	电子态基态恢复时间测量——泵浦-探测法	237
§ 10-2	电子态相位弛豫过程测量——四波混频(脉冲回波)法	242
§ 10-3	分子振动态弛豫时间测量——拉曼光谱法	246
§ 10-4	非辐射弛豫过程测量——皮秒瞬态光栅法	249

§ 10-5 非相干光高时间分辨光谱学研究	253
第十一章 光学孤子	255
§ 11-1 孤子研究的早期历史	255
11.1.1 罗素(J. S. Russell)的发现	255
11.1.2 FPU 数值模拟实验	256
11.1.3 孤子的发现	257
11.1.4 孤子的定义	259
§ 11-2 光学孤子的基本理论	259
11.2.1 光学孤子的提出	259
11.2.2 数学工具	260
11.2.3 非线性薛定谔方程	263
11.2.4 光学孤子的性质	265
11.2.5 光学孤子形成的物理机理	270
11.2.6 光学孤子的实现	272
§ 11-3 光纤孤子通信	274
11.3.1 光纤线性通信系统的缺陷	274
11.3.2 光纤孤子通信系统的基本原理	276
11.3.3 拉曼增益对损耗的补偿	277
11.3.4 最佳系统设计准则	281
11.3.5 光学孤子的长距离传输实验	284
11.3.6 掺铒光纤放大器	286
11.3.7 孤子系统与线性系统的比较	287
§ 11-4 实现光纤孤子通信的若干问题	287
11.4.1 孤子脉冲的产生	288
11.4.2 孤子脉冲的相互作用	290
11.4.3 高阶项对孤子传输的影响	295
§ 11-5 孤子激光器	303
11.5.1 通论	303
11.5.2 色心孤子激光器	304
11.5.3 光纤拉曼孤子激光器(FRASL)	308
11.5.4 孤子激光器的稳定性	311
11.5.5 其他类型的孤子激光器	314
11.5.6 孤子激光器的应用	315
§ 11-6 非中心对称介质中的孤子传输	316
11.6.1 背景描述	316
11.6.2 摄动方程及其解	317
11.6.3 一些有趣的结论	320
第十二章 非线性电极化率的理论	324
§ 12-1 密度矩阵和相互作用能	324