

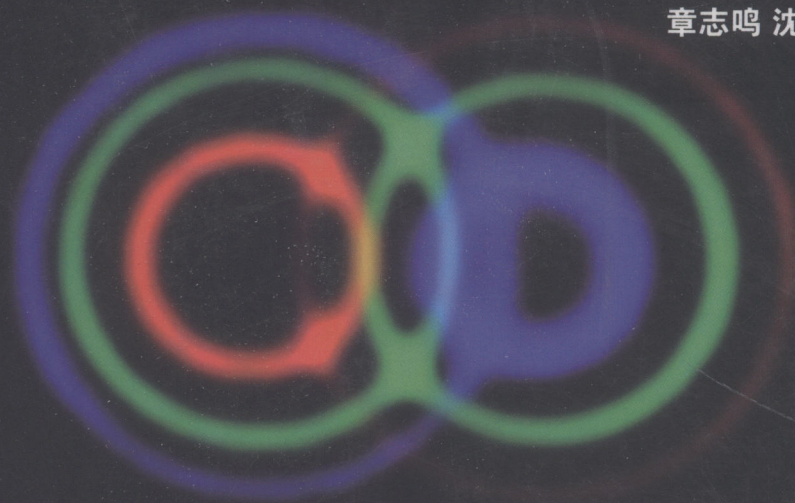


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光学

(第三版)

章志鸣 沈元华 陈惠芬



OPTICS



高等教育出版社



光学

Guang Xue
(第三版)

章志鸣 沈元华 陈惠芬



高等教育出版社 · 北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

043-43

2270.03

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,由作者在第一版(1994)和第二版(1999)的基础上修改和增补而成。本次修订在保持原有特色的基础上,对内容作了较多的重写和修正,删除了一些不重要的章节,并引入了近期光学学科发展的新成果。全书分上、下两篇,上篇:基础光学——建立“光”的电磁波理论,阐述各种基本光学现象;下篇:选读篇——加深光学基本概念的理解并走向前沿。

本书可作为高等学校物理类专业光学课程的教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学/章志鸣,沈元华,陈惠芬. —3版. —北京:高等教育出版社,2009.12

ISBN 978-7-04-027951-1

I. 光… II. ①章…②沈…③陈… III. 光学-高等学校-教材 IV. O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 198342 号

策划编辑 马天魁 责任编辑 王文颖 封面设计 张申申 责任绘图 吴文信
版式设计 余 杨 责任校对 俞声佳 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 27.25
字 数 510 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1994 年 12 月第 1 版
2009 年 12 月第 3 版
印 次 2009 年 12 月第 1 次印刷
定 价 31.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 27951-00

第三版前言

本教材是在第一版(1994)和第二版(1999)的基础上修改而成。本次修订对内容作了较多的重写和修正,删除了一些不重要的章节,并尽量联系到在这段时期中光学所取得的一些新成果。此外,还考虑到目前高中物理教学中“光学”部分的内容占有的比例较少,所以编撰是从最基本的光学现象开始,尽量注意概念的叙述,同时增添了多幅图表为辅助以达到更为直观的表述。

本教材的主要目标仍然保持第一版中所提到的主旨,即适合于安排为一学期“光学”课程的教学,这是对理科的物理系、核物理系等和工科的电子工程系、计算机科学系、信息工程系、光科学及工程系等的普通物理教学计划中“光学”课程建议采用的教材。本教材的学习基础是已经掌握了普通物理学中的电磁学和数学中的微积分等前期课程中的知识。

本教材将全书内容分成为上篇和下篇两部分,上篇:基础光学——建立“光”的电磁波理论,阐述各种基本光学现象,主旨于认识基本的光学现象和由此而建立的光学原理和理论,掌握了这些光学基础知识以后可以使学生对光学有一个初步但概念上仍然是准确的认识。这部分的内容不仅对所有需要学习光学课程的理工科专业是必要的,而且对于只安排半学期的一般理科如化学系、生物系和其他工科各系的普通物理的光学课程也是合适的,只是需要略去一些数学推导而注重概念的建立,就可以按教学计划的学时数完成。

下篇:选读篇——加深光学基本概念的理解并走向前沿,是联系到光科学领域中的一些近代进展和前景展望,从而可以加深对基本概念的认识。20世纪50年代由于激光的出现而带来了光科学的巨大变革,近十年来则又从微光电子学发展到纳米光电子学的范畴,其研究和发展的领域已经从原来的“经典光学”进展到了“现代光学”时代,从而使光科学达到了空前的繁荣并涉及极为广泛的范围。当然还应该意识到光科学的进展是跟其他学科如近代物理学、凝聚态物理学、微电子学、信息通信学等学科的进展有着密切相关的联系,而学科之间的科学思想和进展是相互关联并促进的。所以若是能够了解光科学的发展现状、它的前沿目标和它与其他学科之间的关联等都是十分有益的知识储备。下篇中的每一章只是简要介绍在某些前沿领域中的新成果,而其内容是与上篇中的相应章节相联系的。这些内容对于不同专业可以根据需要而由授课教师决定取舍,即使不讲授也仍然可以供学生参阅以开阔视野,了解和跟踪光学前沿的发展步伐。

本教材中许多图稿的初稿是由我组邢中簪女士精心绘制的。

最后,本教材在编撰过程中得到我院、我系领导和同事们热情关怀和支持,我们在此表示衷心的感谢。高等教育出版社也给予我们大力支持,特别是该社胡凯飞先生、马天魁先生和王文颖女士花了不少精力并给我们十分有益的指点而使本教材能够顺利出版,也在此表示我们的感谢和敬意。

编著者

上海复旦大学信息科学与工程学院光科学及工程系 2008 年 12 月

电子邮箱:zhimingzhang777@yahoo.com 或 chhfen@yahoo.com

第二版前言

(1999 年出版,从略)

第一版前言

我们有感于当今的科学技术是如此迅猛地发展,20世纪50年代曾经独占世界科技先进领域的半导体科研与工业,经过数十年的演变,从80年代末期到当今时代已经被迅速发展的激光及其技术,并与半导体微电子学相结合而形成的光电子技术一起挤入到历史发展的舞台上,可以预见21世纪将是微光电子学的世界。应该起到先导作用的教育事业及其工作者,必须为此而做好培育人才的准备。为此我们深感有责任和义务编写一本迎合这种发展形势的光学教材。对于这一本教材,我们认为不应该只适用于物理类的专业,还希望也适应用于电子工程学、材料科学以及化学、生物学等专业。

这本教材是作为两年制普通物理中的光学部分,所编排的内容适合于一个学期的课时,后继于电磁学。在本教材中,为了介绍有关激光及光电子学的一些内容,就不可避免地要涉及原子、分子以及固体物理中的一些微观结构的概念,例如能级、能带、导带、禁带、跃迁等等。我们认为能够及早正确地介绍给学生这些十分重要的概念是有益的。科学的进展并不就范于人们对学科的分类之中,所以我们不必在知识的获得过程中把自己限制在人为的学科界限之内。

在多年的光学课程教学实践中我们还意识到:作为普通物理的一个组成部分的光学课程,其内容并不注重于介绍光在运动过程中的能量和动量守恒这一重要的基本物理概念,因而与其前期所讲授的力学、热学、电磁学以及后继的原子物理学等课程中的物理思想未能保持密切的连贯,在普通物理的其他课程中却都是十分强调能量及动量守恒这一原则的重要性的。在光学课程中对这一原则的贯彻始终不能得到体现的原因,是过去的光学课程往往只讨论光在传播过程中的问题,而不涉及光与其他物质之间的相互作用的问题。光在传播过程中,其能量和动量总是守恒的,所以这一重要的原则实际上是隐含着的。但是忽视在光学中对这一基本概念仍然具有其重要性的阐明是不可取的。在本教材中,由于增加了有关光与物质相互作用的内容,所以原来在教学中的一些不足就很自然地获得了弥补。当然这仅仅是我们的一种教学尝试,考虑得不够周到之处也必然是存在的,我们愿意在教学实践中不断地改进,我们也热诚地希望同行们能对这本教材在内容的选择及编排上提出宝贵的意见。

在编写这本教材的过程中,我们自始至终得到我系领导的支持,不断地获得同事们的有益讨论、指正和帮助,在此表示我们的真挚感谢。此书的顺利出版获得了高等教育出版社的大力支持,特别是该社曹建庭先生不懈的促进和大力协

助,在此也表示我们的感谢并致以敬意。本书中原图的绘制及初稿的打印、编辑等工作都是我室邢中箐同志辛勤劳动的结果,我们也借此机会向她致以感谢。

编著者

1994 年于上海复旦大学激光物理研究室

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编：100120

购书请拨打电话：(010) 58581118

目 录

上篇 基础光学——建立“光”的电磁波理论,阐述各种基本光学现象

第一章 绪论	3
§ 1.1 光学是物理学科中的重要分支学科	3
§ 1.2 我国古代在光学方面的成就	5
§ 1.3 20 世纪前在光科学方面的发展简史	6
§ 1.4 20 世纪到近期的若干重大进展	8
§ 1.5 光波是电磁波谱中的一员	16
§ 1.6 光子与电子之间的异同	18
第二章 光波运动的数学表述及光波的叠加原理	20
§ 2.1 麦克斯韦方程组和单色平面波	20
§ 2.2 光波的能量、能量流(光强)和动量	25
§ 2.3 球面波	27
§ 2.4 高斯型波面和高斯光束	29
§ 2.5 光在均匀介质中的传播 折射率与光程	31
§ 2.6 平面波在介质界面上的折射和反射	33
§ 2.7 多束光波的叠加 叠加原理	35
§ 2.8 振动方向相互垂直的光波叠加 椭圆偏振光	35
§ 2.9 不同频率的光波叠加	38
第三章 几何光学	42
§ 3.1 几何光学的含义 费马原理	42
§ 3.2 平面反射镜的成像和反射定律	43
§ 3.3 球面反射镜、椭球面反射镜和抛物面反射镜的成像	44
§ 3.4 光线通过介质界面的折射和全反射	49
§ 3.5 近轴光线经过单球面折射体的传播规律	51
§ 3.6 薄透镜成像规律及光线追迹法	55
§ 3.7 光线经过同轴系统的 $ABCD$ 转换矩阵	60
§ 3.8 透镜的像差	70
§ 3.9 光阑与光瞳	72
§ 3.10 常用的光学元件:棱镜和光纤	74
§ 3.11 几何光学仪器	77

§ 3.12 几何光学的成就及其不足	84
第四章 光波的干涉现象和相干性	85
§ 4.1 光波的干涉现象及叠加原理	85
§ 4.2 波前分割法 杨氏双缝干涉	90
§ 4.3 振幅分割法 楔形薄层的干涉和牛顿环	94
§ 4.4 迈克耳孙干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪	99
§ 4.5 多光束叠加干涉及法布里-珀罗干涉仪	103
§ 4.6 准单色光及面光源的干涉 迈克耳孙恒星干涉仪	107
第五章 光的衍射现象	115
§ 5.1 光的衍射及惠更斯-菲涅耳原理	115
§ 5.2 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	125
§ 5.3 夫琅禾费衍射:求解单缝、矩形孔、双缝及光栅的衍射	127
§ 5.4 夫琅禾费衍射:求解圆孔的衍射	135
§ 5.5 分辨率、分辨率极限及瑞利判据	137
§ 5.6 夫琅禾费衍射与傅里叶变换	139
第六章 光波在界面及多层薄膜系统的反射和折射	142
§ 6.1 电磁波跨越界面需要满足的边界条件	142
§ 6.2 菲涅耳的反射和折射公式	145
§ 6.3 菲涅耳公式讨论之一:光波在界面上反射的相位突变	148
§ 6.4 菲涅耳公式讨论之二:布儒斯特定律	149
§ 6.5 菲涅耳公式讨论之三:全反射产生倏逝波,古斯-亨兴效应	151
§ 6.6 介质界面上的反射率和透射率	154
§ 6.7 光波在金属界面上的反射和吸收	156
§ 6.8 光波在涂有单层介质薄膜表面上的反射和透射	157
§ 6.9 光波在涂有多层介质薄膜表面上的反射和透射——薄膜光学	162
§ 6.10 一些典型光学膜系的结构及其反射率特性	165
§ 6.11 关于选用膜系的考虑	174
第七章 晶体双折射现象 光波的偏振态及其检测	176
§ 7.1 光在各向异性介质中传播的现象	176
§ 7.2 光波偏振态的检测 波片的用途	183
§ 7.3 对椭圆偏振光的分析 斯托克斯参数	193
§ 7.4 对椭圆偏振态的另一种描述:琼斯矢量和琼斯矩阵	200
§ 7.5 椭偏仪——椭圆偏振光在测定表面光学常量中的应用	201
第八章 光波在介质中传播的色散现象 光的散射	204

§ 8.1	多色光波在介质中的传播	204
§ 8.2	光与物质的相互作用 电偶极子振荡	207
§ 8.3	金属材料中的自由电子振荡	208
§ 8.4	介质材料对光波的吸收和色散 经典色散理论	210
§ 8.5	电极化强度在光场作用下的行为	215
§ 8.6	光的散射现象	216
第九章	光源和激光	221
§ 9.1	固态物质的发光及辐射计量:辐射度学和光度学	221
§ 9.2	热光源和黑体辐射源	224
§ 9.3	原子、分子体系发光的微观机制	229
§ 9.4	若干典型的发光体及其性质	237
§ 9.5	激光光源的简要原理	242
§ 9.6	常用的激光器及其特性	251
§ 9.7	激光的特点及提高输出功率的技术	259
§ 9.8	一些重要的激光应用	263
§ 9.9	激光束的特点和传播	267
第十章	光探测器	271
§ 10.1	光探测器的类别	271
§ 10.2	光电效应探测器	272
§ 10.3	多元阵列光敏探测器及电荷耦合器件	284

下篇 选读篇——加深光学基本概念的理解并走向前沿

第十一章	天文望远镜和显微镜的进展	289
§ 11.1	近年来在天文望远镜方面的进展	289
§ 11.2	适应光学在天文望远镜上发挥了作用	293
§ 11.3	显微镜的进展和近年来的成就	294
§ 11.4	突破衍射极限的近场探测	298
第十二章	傅里叶光学及全息照相术	301
§ 12.1	光学图像的傅里叶变换及空间频率	301
§ 12.2	空间频率的滤波	303
§ 12.3	傅里叶变换与光学现象的对应	306
§ 12.4	全息照相术	308
§ 12.5	全息照相的实际装置	312
第十三章	衍射光学元件	315
§ 13.1	衍射光学元件的含义	315

§ 13.2	衍射光学元件的衍射效率	318
§ 13.3	衍射光学元件的计算机设计简述	322
§ 13.4	衍射光学元件的制备工艺简介	325
§ 13.5	几种典型的衍射光学元件	328
第十四章	非线性光学	332
§ 14.1	光学中的非线性现象	332
§ 14.2	介质的光学非线性响应	334
§ 14.3	光波在非线性介质中的传播	336
§ 14.4	二阶光学非线性现象	338
§ 14.5	三阶光学非线性效应	345
第十五章	极窄脉宽和极窄频宽的激光光谱学 频率梳光谱学	349
§ 15.1	极窄脉宽激光器的研究进展	349
§ 15.2	实验桌上的高功率窄脉冲激光器	351
§ 15.3	高功率超短脉冲激光束的应用示例	355
§ 15.4	极窄脉宽的精密激光光谱学和频率梳	356
第十六章	表面的光学研究和表面吸附分子的光学检测	363
§ 16.1	表面光学研究的进展 等离子体激元及表面电磁耦合激元	363
§ 16.2	表面等离子体激元及表面电磁耦合激元的形成和性质	365
§ 16.3	表面电磁耦合激元的激励、衰减全反射现象	367
§ 16.4	朗缪-勃络吉单分子层的检测	371
§ 16.5	光学非线性效应对表面吸附分子的检测	373
第十七章	纳米光子学概述	377
§ 17.1	纳米光子学的含义	377
§ 17.2	纳米颗粒 金属纳米颗粒的特性和制备	378
§ 17.3	等离子体激元学:光子学和电子学在纳米尺度下的汇合	380
§ 17.4	光子晶体的结构和制备	382
§ 17.5	光子晶体的光学特性	387
§ 17.6	光子晶体光纤	388
第十八章	负折射率材料及其光学特性	390
§ 18.1	负折射率材料的发现及现状	390
§ 18.2	负折射率材料具有奇异的光学特性	392
§ 18.3	负折射率材料可以隐藏物体而不被察觉	394
第十九章	光学相干性的量子理论简介	396
§ 19.1	光的相干性及 HBT 效应	396
§ 19.2	光学相干性的量子论述 量子光学	397

习题	400
附录 一些常用数据	417
索引	419

上 篇

基础光学

——建立“光”的电磁波理论， 阐述各种基本光学现象

第一章 绪 论

§ 1.1 光学是物理学科中的重要分支学科

上 篇

基础光学

——建立“光”的电磁波理论， 阐述各种基本光学现象

光学是物理学科中的一门重要和庞大的分支学科，人类对“光”的认识和探索来源于遥远的历史积累，而且还在继续不断地新建和开发之中。实际上，人们对于客观世界的认识是一个从感性到理性的过程。人类的认识是通过眼、耳、鼻、舌、皮肤等五个感官反映到人的大脑中，从而形成对客观世界的认识。在这五个感官中占居首位，根据统计显示，人们从外界获得的信息则在这五个感官中占居首位，根据统计显示，人们从外界获得的信息 90% 是通过视觉所得来的。人们能够看到某个物体的视觉感受来自该物体所发出的“光”，或者是其他光源（例如太阳）照射到该物体而被反射的“光”。人类对光的各种表现探索开始得很早，从原始时代起人们就利用光来传递信息，并不断地总结经验和教训。随着生产力的发展和科学技术的进步，光科学与技术的相应应用也日益广泛。基础光学是光科学的基础，是研究光的本质、光的传播、光的相互作用、光的测量、光的控制、光的利用等问题的科学。基础光学是光科学的基础，是研究光的本质、光的传播、光的相互作用、光的测量、光的控制、光的利用等问题的科学。

从历史的发展过程中可以看到，光学在基础研究方面的进展是与物理学的进展相互促进并交织在一起的，这在近代物理学的发展史中可以得到有力的佐证。当 20 世纪初期物理学从经典的牛顿力学发展到近代的量子力学这一重大变革中，光学的基础研究曾经起到了关键性的作用，例如关于黑体辐射的能量分布、关于光电效应的探索等的研究课题都是与物理学科的研究进展联合在一起，开展了研究对经典的理论不能满足而突破到量子理论的新境界。科学家们试图从已经建立的光学和物理学中的理论来解释一些所观测到的光学现象却产生了矛盾，从而导致了在物理概念上的创新和突破。当今对于“光的本性”的研究已经形成一个新的、称为“量子光学”的专题，这是致力于对“光的本性认识”的研究领域，是极受关注的基础性理论研究，当然也是光科学的基本理论研究主导方向，所以是备受科学家们重视的领域。

在应用技术和开发的研究方面则利用光在传播过程中所产生的各种现象而开拓了众多的应用，例如创造出许多巧妙的光学仪器和光学工具以扩大人们的

卷 上

字兴野基

、分野知报甲的“兴”立野——
意旺宅兴本基幅各本例

第一章 绪 论

§ 1.1 光学是物理学科中的重要分支学科

光学是物理学科中的一门重要和庞大的分支学科,人类对“光”的认识和探索来源于渊远的历史积累,而且还在继续不断地创建和开发之中.实际上,人们对于客观世界的认识是一个从感性到理性的过程,感性认识是通过眼、耳、鼻、舌、皮肤等五个感官反映到人的大脑中形成的,而眼睛所获得的信息则在这五个感官中占居首位,根据统计显示,人们所获得的信息中有 90% 是通过视觉所得来的.人们能够看到某个物体的视觉感是来自该物体所发出的“光”,或者是其他光源(例如太阳)照射到该物体而被反射的“光”.人类对光的各种表现探索开始得很早,从原始时代起人们就已经注意观察天空中所产生的各种变幻无常的光学现象,并不断地总结蕴藏在其中的规律.随着生产力的发展和科学技术的进步,光科学与技术也就相应地获得了进展.当今的光科学包含了基础性的研究和利用各种光学现象所展开的技术和应用研究.

基础性研究中最热衷的课题是“光与物质相互作用”的研究和“光的本性认识”的研究.前者的研究是利用“光”作为探针以获得物质内部的微观结构知识,这方面的成就是开拓和发展应用和技术研究的基础.而后者则是涉及关于人类如何能够更准确地认识“光”的物理本质,是涉及对客观世界认识的基本问题.从历史的发展过程中可以看到,光学在基础研究方面的进展是与物理学的进展相互促进并交织在一起的,这在近代物理学的发展史中可以得到有力的佐证.当 20 世纪初期物理学从经典的牛顿力学发展到近代的量子力学这一重大变革中,光学的基础研究曾经起到了关键性的作用,例如关于黑体辐射的能量分布、关于光电效应的探索等的研究课题都是与物理学科的研究进展联合在一起,开展了研究对经典的理论不能满足而突破到量子理论的新境界.科学家们试图从已经建立的 optics 和物理学中的理论来解释一些所观测到的光学现象却产生了矛盾,从而导致了在物理概念上的创新和突破.当今对于“光的本性”的研究已经成为一个新的、称为“量子光学”的专题,这是致力于对“光的本性认识”的研究领域,是极受关注的基础性理论研究,当然也是光科学的基本理论研究主导方向,所以是备受科学家们重视的领域.

在应用技术和开发的研究方面则利用光在传播过程中所产生的各种现象而开拓了众多的应用,例如创造出许多巧妙的光学仪器和光学工具以扩大人们的

视觉感和提高加工工艺的技术,由此而发展了精确的光学计量,实现了在科学技术、生产和工程领域中获得精确而统一计量数值,从而提高了产品的质量和普适性.光学还与其他学科如化学、生物学、医学等相结合而开创了各种极为有价值的应用研究.光科学和技术与精密加工、建筑、军事国防等工业相结合而获得了出色的成果并受到重视.众多的学者都承认光学学科的成就和在技术方面的进展已成为国民经济建设和军事国防建设中的极为重要环节,是衡量这个国家的“先进性程度”的主要指标之一.

当20世纪60年代初期通过科学家们的辛勤劳动而研究成功了“激光”这一划时代的创建以后,又发掘了众多前所未能观察到的光学现象和光学过程,其中尤以高分辨率激光光谱学,超快过程激光光谱学和光学非线性现象等研究最为突出而引人注目.由于激光能够发射出极强的光束,这意味着它拥有极强的电磁场,因而可以很容易观察到物质的光学非线性效应,这是在通常的光源照射下不可能被观察到的新现象.光学非线性效应是十分重要的基础性研究,同时具有广泛的应用.例如在极强的激光照射下,具有非线性效应的介质可以使入射激光的频率发生改变,使具有红外波段的激光束照射到一块非线性介质后就可以转变为可见光而输出.此外,由于光纤制备技术的成熟并与掺铒的激光光纤放大器相结合而发展了实用的光纤通信系统,又是一个非凡的成功.利用光波而不是无线电波作为信息载体是由于光波的频率要远比无线电波的频率高,因而可以载容更多的电视通道和电话通道.光纤的原材料主要是二氧化硅,在地球上的含量相比于原材料为铜的电缆要丰富得多,因而不必由此担心资源的枯竭,光纤通信已经在我国许多地区投入了运行.利用激光的高能量可以使氘核产生聚变,这是通过受控核聚变以获得新能源的一个很有希望的途径,目前世界上只有少数几个先进国家在进行这一研究,而我国就是其中之一.利用激光光束所具有的十分优良的方向性这一特点,在造船工业、建筑业中的准直和丈量上取得了广泛的应用,其操作简便且结果准确.光学技术和激光在军事上的应用更是受到各个先进国家的重视,常用的技术是利用激光对敌对目标的测距和制导.新发展的激光武器有更多的优点而在现代化的战略战术中成为不可缺少的手段.光学和激光的技术与计算机和微电子学相结合后可以获得若干神奇的效果,这类成果是不胜枚举的.就以近年来在天文观测方面为例,科学家们创造出了利用太空中的星点(实际上是发光的原子)作为参考的“信标灯”,由于星光在通过大气层湍动后会引起图像模糊,同时也会使信标灯的光点模糊.但“信标灯”的模糊点光源可以利用计算机控制实时反馈信号系统而能补偿这种干扰后使观察到标灯的图像恢复为点光源.这一补偿系统同时也对受干扰的天体图像获得复原而形成不受干扰的清晰天体图像,这种激光技术、计算机技术和反馈控制技术的组合称为“自适应(adaptive optics)”,是一个十分成功的典型例子,我国的国家天文台已