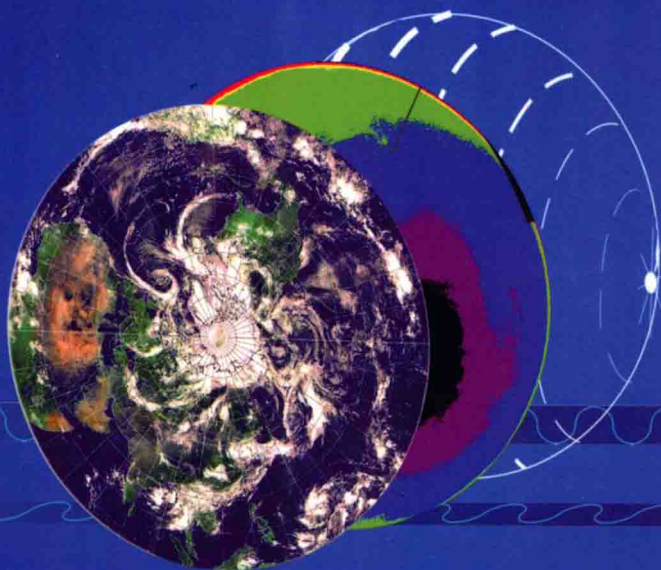




地球观测与导航技术丛书

偏振遥感物理

晏磊 陈伟相 杨彬 赵云升 著



科学出版社



地球观测与导航技术丛书

偏振遥感物理

晏磊 陈伟 相云 杨彬 赵云升 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

偏振信号是地表与大气系统反射信号的重要组成部分,是利用遥感信息反演地表与大气信息的重要信号来源。但目前的光学遥感研究多集中于非偏振遥感,对偏振遥感研究较少,从而忽略了遥感反演中的一项重要数据源。针对此,本书作者进行了长期系统研究,结合多年偏振遥感的成果,从偏振遥感的物理基础、偏振遥感在地物参数反演的应用、偏振遥感在大气参数反演的应用及偏振遥感应用的新领域四个方面展开,系统地介绍了偏振遥感反演地表参数、大气参数及导航等的基础、原理、方法及结果验证。

本书是立志从事光学偏振遥感新领域研究者的入门书,是遥感、地球观测、测绘、国土等领域学者了解偏振遥感全貌的参考书,为相关领域从业人员借助偏振遥感手段解决其自身面临的相关问题提供了一个新视野、新手段、新途径,可作为从事偏振遥感科研、教学人员了解偏振遥感理论、技术和方法的指南,也可为相关技术人员提供有价值的参考。

图书在版编目(CIP)数据

偏振遥感物理/晏磊等著. —北京:科学出版社,2014. 12

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-042812-7

I. ①偏… II. ①晏… III. ①偏振-遥感技术-物理学 IV. ①TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 302904 号

责任编辑:朱海燕 苗李莉 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:赵德静 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 12 月第一次印刷 印张:16 3/4 插页:10

字数:372 000

定价:129.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	孟 波	秦其明
单 杰	施 闯	史文中	吴一戎	徐祥德
许健民	尤 政	郁文贤	张继贤	张良培
周国清	周启鸣			

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009 年 10 月

序

偏振是地表反射信号中的重要组成部分,但光学偏振遥感尚缺乏深入的研究与应用。国际上,从 CZCS1 到 POLDER 都尝试有所突破,但尚未达到目的。目前,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)已经认识到偏振遥感的意义,并已研制新型偏振传感器列入上天计划;法国已经在使用偏振遥感探测器,我国也已经在高分辨率遥感等重大专项中部署偏振遥感探测器,国际天文学界对太阳、恒星、行星研究主要采用偏振方法。人们期待偏振在方兴未艾的遥感科学中发挥作用。

然而,应用目标的实现需要理论基础的建立、解释和突破。目前为止,国内外尚未有系统全面介绍光学偏振遥感机理、理论与应用的书籍。该书的面世,填补了这个领域的理论和实验空白,是我国科学家潜心研究基础理论、实现理论突破的重要范例,也是光学偏振遥感应用的物理基础。

作者的研究也已经融入国际重大科学问题解决的重要突破手段探索中。包括:恒星、行星天文偏振观测的客观性启示,以考虑天文领域与遥感领域偏振观测手段的互补与转换;全天空偏振矢量场与人们比较了解的重力场、地磁场的全域性比较与客观性启示,采用偏振观测手段证明遥感辐射亮度月球基准的不可替代性启示;全球植被生物量与 C、N 含量正-负相关的国际争论与偏振遥感独特性甄别启示,以及偏振遥感物理的系统化理论、方法与应用。

该书不仅在理论上有所突破,而且通过一系列的实际实验验证。基于作者研究团队 1988 年以来的 30 余万组野外实验数据分析,集成了 2001~2014 年间光学偏振遥感系列化理论成果,反映了该领域国内外研究的最新进展,系统阐述光学偏振遥感理论及应用发展。该书的主要素材来源于第一著者所带领的研究团队 10 余年来的理论成果和第五著者团队 20 余年实验积累,包括 40 余篇博士后、博士、硕士和学士论文的工作,也包含了少量其他团队的研究成果分析,成果系列化程度高。

北京师范大学
地理学与遥感科学学院 教授
中国科学院 院士

李士文

2014 年 11 月 6 日

前 言

偏振是地表反射信号中的重要组成部分,但偏振信息在目前遥感中并未得到应有的重视。目前,美国 NASA 已经认识到偏振遥感的意义,并已研制新型偏振传感器列入上天计划;法国已经在使用偏振遥感探测器,国际天文学界对太阳、恒星、行星研究主要采用偏振方法。偏振遥感在方兴未艾的遥感学科中必然会发挥巨大的作用。然而,国内外尚未有系统全面介绍偏振遥感理论与应用的书籍。因此,作者分析了国内外偏振遥感研究的现状及趋势,并将自己团队自 1988 年以来 20 余年的研究成果加以汇总整理,完成了本书的全文。

本书内容共 11 章分三大部分:偏振遥感的物理基础(第 1 章),主要针对地物反射波谱强度两端强弱限制和大气窗口的衰减误差效应两大瓶颈问题进行了剖析,给出了利用偏振遥感解决过亮过暗背景下的目标探测、大气窗口探测与偏振遥感的物理原理;第一部分是地物偏振遥感物理,主要阐述了偏振遥感的多角度反射物理特征(第 2 章)、多光谱化学特征(第 3 章)、粗糙度与密度结构特征(第 4 章)、信息-背景高反差比滤波特征(第 5 章)、辐射传输能量特征(第 6 章);第二部分是大气偏振遥感物理,主要包括全天空偏振模式图规律及物理特性(第 7 章)、大气偏振中性点区域规律与地-气参量分离(第 8 章)、全天空偏振矢量场规律下的大气粒子多角度观测立体层析(第 9 章);第三部分是偏振遥感物理新领域应用,主要包括基于地球偏振矢量场的仿生偏振自主导航(第 10 章)、先进空间探测与全球变化研究的偏振遥感手段(第 11 章),以证明偏振遥感物理的客观性、独特性和稳定可重复性,以承担起中国在国际偏振遥感物理理论、方法、应用上的引领责任。

本书全部构思、标题确立、各部分及各章前引导、地物偏振遥感五大特性归纳、大气偏振遥感三个规律特征提炼、偏振遥感五个国际前沿合作新领域的开辟由第一作者完成;第二作者陈伟博士创造性贡献主要在第 9 章,并配合第一作者对第 7~10 章进行了统稿;第三作者相云博士(高级工程师)创造性贡献主要在第 3 章,并配合第一作者对第 2~4 章进行了统稿;第四作者杨彬博士、第五作者赵云升教授的创造性贡献主要在第 5、6 章,并由杨彬博士统稿;其余部分由第一作者完成。最后对各章的文稿由第一作者审修均达三遍以上,相当部分超过五遍。

本书是第一作者和第五作者团队长期潜心基础研究与实验、教学积累的创造性成果结晶。本书特别感谢赵虎副教授对本书第 4 章、吴太夏副研究员对本书第 8 章、关桂霞副教授对本书第 10 章做出的创造性贡献,这些成就都是他们在北京大学第一作者团队里博士课题期间完成的。本书还有更多的贡献者,主要列举在书后致谢篇中,作者怀以敬畏之心向他们表示感谢。本书主要得到的国家资助项目也列举在致谢篇中,作者向国家相关部门的支撑表示感恩。

最后还要感谢国家出版基金的资助,感谢《地球观测与导航技术丛书》编委会和专家

评委对本书的审核认可;感谢童庆禧科学院院士、刘先林工程院院士、李小文科学院院士对本书的审查、建议和鼎力推荐。感谢焦健楠、贺丽琴、王雪琪三位硕士生和郭锁利副教授、徐振亮博士后、孙岩标博士生等在最后阶段对本书文稿、图表的加工和辛劳加班付出。

本书从 2011 年开始撰写,虽经近 4 年修改、筛选与提炼,但由于作者知识水平有限,仍难免有所错误与偏见。在此,恳切各方专家和广大读者不吝指教。作者电子邮箱:lyan@pku.edu.cn。

作 者

2014 年 10 月于北京大学未名湖畔

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序

前言

第 1 章 偏振遥感的物理基础	1
1.1 光的偏振	1
1.2 光在介质表面的偏振	5
1.3 偏振的表征	6
1.4 偏振遥感的物理基础及三个组成部分	9
1.5 章节组织及相互关系	20
参考文献	21

第一部分 地物偏振遥感物理

第 2 章 地表偏振反射的多角度物理特征	25
2.1 偏振物理探测几何及多角度偏振反射的物理基础	25
2.2 多角度偏振反射分析仪器与测量方法	28
2.3 入射角与地物样本多角度反射光规律及机理	34
2.4 多角度无偏光谱及偏振度特征及规律分析	39
参考文献	46
第 3 章 地表偏振反射的多光谱化学特征	47
3.1 偏振度与无偏光谱的规律关系	47
3.2 岩石表面在 2π 空间内的反射光谱模型	50
3.3 岩石参数光谱反演	60
3.4 岩石组成成分与偏振度的关系初探	62
参考文献	67
第 4 章 地表偏振反射的粗糙度与密度结构特征	69
4.1 岩石表面粗糙度与多角度偏振度波谱关系	69
4.2 表面粗糙度与不同散射角偏振度影响分析	77
4.3 地物反射比与地物密度关系理论	80
4.4 估测月球表面岩石的物质组成	85
参考文献	87
第 5 章 地表偏振反射的信息-背景高反差比滤波特征	88
5.1 暗背景下水体信息的偏振反射滤波特性(“弱光强化”)	88
5.2 强水体耀斑偏振剥离(“强光弱化”)及水体密度测算	92

5.3 土壤的偏振反射滤波特性	100
5.4 土壤含水量与偏振之间的高信背比滤波关系	104
参考文献	108
第6章 地表偏振反射的辐射传输能量特征	109
6.1 植被冠层的偏振反射特性	109
6.2 植被冠层反射光偏振度模型	112
6.3 植物单叶的偏振反射特性	118
6.4 几种农作物的偏振反射特性	123
参考文献	128

第二部分 大气偏振遥感物理

第7章 全天空偏振模式图规律及物理特性	133
7.1 天空偏振光模式图理论	133
7.2 天空偏振模式图测量及参量分布	137
7.3 不同条件下天空偏振度的影响因素分析	141
7.4 不同偏振角的适用性分析	145
参考文献	150
第8章 大气偏振中性点区域规律与地-气参量分离	152
8.1 大气偏振中性点区域理论及其性质	152
8.2 基于偏振模式图的大气偏振中性点区域观测	159
8.3 基于大气偏振中性点区域的地-气分离方法	162
8.4 基于中性点的地-气分离基本实验	171
参考文献	174
第9章 大气偏振特性及多角度观测立体层析	175
9.1 大气散射的物理基础	175
9.2 非球形气溶胶单次散射特征及偏振观测证明	179
9.3 基于非球形模型的多次散射及全天空偏振场多角度平面分布	183
9.4 基于天空偏振场理论的非球形气溶胶与地表信息分离反演	190
参考文献	196

第三部分 偏振遥感物理新领域应用

第10章 基于地球偏振矢量场的仿生偏振自主导航	201
10.1 基于蚂蚁路径整合行为的偏振模式图导航机理	201
10.2 偏振遥感的仿生导航理论基础与模型分析	207
10.3 仿生偏振导航测角装置设计与功能实现	210
10.4 基于云计算的仿生偏振导航模型与精度度量	218
10.5 仿生偏振导航的实验验证与精度分析	222
参考文献	225

第 11 章 先进空间探测与全球变化研究的偏振遥感手段 227

11.1 偏振 V 分量“相位”特征与天文偏振观测的客观性启示 227

11.2 天空偏振场与重力场、地磁场的全域性比较及客观性启示 230

11.3 偏振手段下的月球密度和辐射基准新观..... 235

11.4 植被生化含量遥感反演与全球气候变化关系理论的偏振甄别独特
手段..... 239

11.5 偏振遥感参量的基础地位和偏振遥感系统化理论展望..... 242

参考文献..... 244

跋..... 245

索引..... 249

致谢..... 250

彩图

第1章 偏振遥感的物理基础

偏振是与光强、频率、相位并列的遥感电磁波的四个主要物理特性,本章将系统介绍偏振遥感的物理基础。针对目前遥感观测中存在的地物反射电磁波谱强度两端强弱限制和大气窗口的衰减误差效应两大瓶颈问题,给出三个部分突破进展:其一,地物偏振遥感“弱光强化”、“强光弱化”的依据,以极大延伸遥感暗-亮两端探测区,并探索新的偏振遥感地物反演方法体系;其二,大气衰减的偏振手段精确刻画及规律发现,并探索大气偏振遥感的新大气窗口理论依据;其三,给出偏振遥感应用的最新进展,以证明偏振遥感物理的客观性、独特性和稳定可重复性,以承担起中国在国际偏振遥感物理理论、方法、应用上的引领责任。

1.1 光的偏振

近年来遥感科学与技术的发展,进入一个新的发展时期,从理论发展上说,正在从定性向定量迈进,从简单解释辐射测量值与地表现象间的关系到用辐射传输模型定量描述它们之间二向性反射与辐射的关系;从正向辐射传输模型发展到对辐射传输模型的定量反演;从分散(如局限于光学或热红外或微波)发展到集成多个波谱区间。从技术发展上来讲,从单一波段发展到多波段、多角度、多极化(偏振)、多时相、多模式,从单一遥感器发展到多遥感器的结合。偏振遥感也正是在这个大背景下发展起来的,是一个相对新的和待发展的遥感领域。

波的振动方向对于传播方向的不对称性称为偏振(姚启均,2008),是横波的特有现象。偏振(在微波谱段称为极化)是电磁波的重要特征。地球表面和大气中的目标在反射、散射和透射及发射电磁辐射的过程中,会产生由它们自身性质决定的特征偏振,即偏振特性中蕴涵着目标的多种信息。自然界中到处布满着各种各样的天然反射起偏器,如光滑的植物叶片、土壤、水面、冰、雪、云、雾等,太阳光经过它们反射后均能产生偏振现象。偏振遥感正是利用这一特征为遥感目标提供新的、潜在的信息,偏振遥感也是近来倍受关注的一种新兴的对地观测方法。

光的偏振现象最早是牛顿在1704~1706年引入光学的;马吕斯(Malus)在1809年,首先提出“光的偏振”这一术语,并在实验室发现了光的偏振现象;麦克斯韦(Maxwell)在1865~1873年建立了光的电磁理论,从本质上说明了光的偏振现象。按电磁波理论,光是横波,它的振动方向和光的传播方向垂直。按光振动的轨迹,光的偏振可以分成五种偏振态:自然光(非偏振光)、线偏振光、部分偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光(叶玉堂等,2005)。自然光是各方向的振幅相同的光,它的振动方向在垂直于光的传播方向的平面内可取所有可能的方向,没有一个方向占有优势。若把所有方向的光振动都分解到相互垂直的两个方向上,则在这两个方向上的振动能量和振幅都相等。线偏振光是在垂直于传

播方向的平面内,光矢量只沿一个固定方向振动。部分偏光可以看成自然光与线偏光混合而成,即它有某个方向的振幅占优势。圆偏光和椭圆偏振光是光矢量末端在垂直于传播方向的平面上的轨迹呈圆或椭圆。一般为了说明偏振光,把与光波传播方向垂直的两个分量(如 x, y 轴分量)的时间平均作为偏振状态。 z 方向传播的光,可以认为是由 x 轴(水平轴)和 y 轴(垂直轴)方向振动的两支光波合成的。偏振光电矢量的大小,可用 x, y 轴上两个分量的合成来表示,在一个定态的单一频率的振动中,两个分量也是定态的,且保持一定的相对关系,因此合成的电矢量的端点将描绘出三维的轨迹,其某一瞬间的位置称为时刻迹。

平面电磁波是横波,电场和磁场彼此正交。因此当光沿 z 方向传输时,电场只有 x, y 方向的分量。平面波可以取如下形式:

$$E = E_0 \cos(\tau + \delta_0) \quad (1.1)$$

式中, $\tau = \omega t - kz$, 写成分量形式为

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y = E_{0y} \cos(\tau + \delta_2) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

为了求得电场矢量的端点所描绘的曲线,把上式中参变量 τ 消去即可,这时可得

$$\left(\frac{1}{E_{0x}}\right)^2 E_x^2 + \left(\frac{1}{E_{0y}}\right)^2 E_y^2 - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (1.3)$$

式中, $\delta = \delta_2 - \delta_1$, 式(1.3)为一椭圆方程,因其系数行列式大于零,说明电场矢量的端点所描绘的轨迹是一个椭圆。即在任一时刻,沿传播方向上,空间各点电场矢量末端在 xy 平面上的投影是一个椭圆。这种电磁波在光学上被称为椭圆偏振光。其他的偏振态都是椭圆偏振光的特例。图 1.1 即为相位差取不同值时的椭圆偏振示意图。

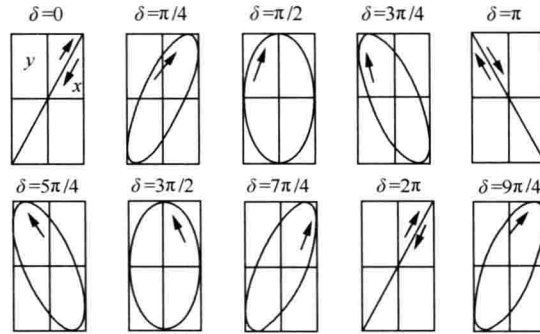


图 1.1 相位差为不同取值时的椭圆偏振

1. $\delta=0$ 或 $\pm\pi$ 的整数倍

当 $\delta = \delta_2 - \delta_1 = m\pi (m = 0 \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,椭圆就会退化为一 条直线,这时:

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^m \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (1.4)$$

电矢量 E 的方向永远保持不变,电矢量 E 就称为线偏振(亦称为平面偏振)。

线偏振光透过线偏振器后,当线偏器以入射光为轴转动时,透射光强度将有变化。根

据马吕斯定律,强度为 I_0 的线偏振光,通过检偏器后,透射光的强度(在不考虑吸收的情况下)为

$$I = I_0 \cos^2 \theta \tag{1.5}$$

式中, θ 为检偏器的偏振化方向与入射偏振光的偏振化方向之间的夹角(图 1.2)。

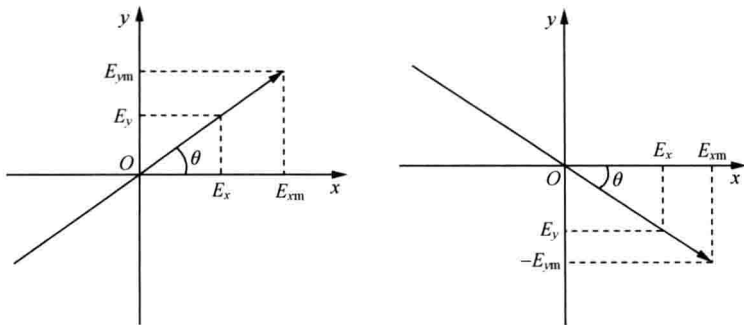


图 1.2 两种形式的线偏振光

2. $\delta = \pm \frac{1}{2} \pi$ 的奇数倍

如果 E_x, E_y 两分量的振幅相等,且其相位差为 $\pi/2$ 的奇数倍,即 $E_{0x} = E_{0y} = E_0, \delta = \delta_2 - \delta_1 = m\pi/2 (m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots)$, 则椭圆方程退化为圆,即

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \tag{1.6}$$

此时电场矢量 $\mathbf{E}$ 端点轨迹为一圆,电矢量 $\mathbf{E}$ 是圆偏振。根据电场矢量的旋转方向还可分为左旋偏振光和右旋偏振光。

按照垂直振动合成的理论,可沿任意一对相互垂直的方向将圆偏振光分解成振幅相等的两个偏振光,其中一个分量不能通过偏振器,另一个分量能通过它。则其通过线偏振器后强度变化与非偏振光的情况相同,光强为入射前的一半。

3. δ 为其他值

当 δ 为其他值时,由合成公式可知,合成光波为任意取向的椭圆偏振光。椭圆偏振光(或圆)有左旋和右旋之分(图 1.3)。

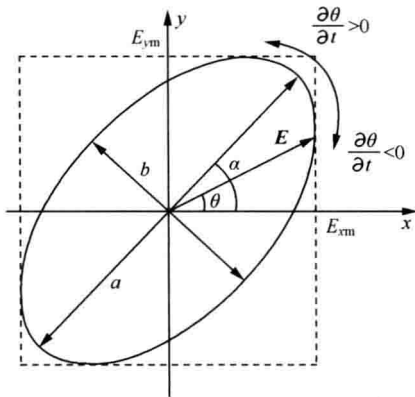


图 1.3 左旋与右旋偏振光示意图

由电矢量 $\mathbf{E}(z_0, t)$ 与 $\hat{x}$ 的关系可知二者的方向夹角为

$$\theta = \arctan \frac{E_{ym} \cos(\omega t - kz_0 + \phi_y)}{E_{xm} \cos(\omega t - kz_0 + \phi_x)} \quad (1.7)$$

$\mathbf{E}(z_0, t)$ 尾端的旋转速度为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega E_{xm} E_{ym} \sin(\phi_x - \phi_y)}{E_{xm}^2 \cos^2(\omega t - kz_0 + \phi_x) + E_{ym}^2 \cos^2(\omega t - kz_0 + \phi_y)} \quad (1.8)$$

当 $0 < \phi_x - \phi_y < \pi$ 时, $d\theta/dt > 0$, 电磁波为右旋椭圆偏振光。当 $-\pi < \phi_x - \phi_y < 0$ 时, $d\theta/dt < 0$ 电磁波为左旋椭圆偏振光。

4. 非偏振光(自然光)

普通光源中各个分子或原子内部运动状态的变化是随机的, 从统计规律上来说, 相应的光振动将在垂直于光速的平面上遍布所有可能的方向, 而且所有可能的方向上相应光矢量的振幅(光强度)都是相等的。这种在垂直于光传播方向的平面内沿各方向振动的光矢量呈对称分布的光就称为自然光。由于自然光的对称性, 自然光可分解为两个任意垂直方向上的、振幅相等的独立分振动, 它们的相位之间没有固定的关系, 不能把它们叠加成一个具有某一方向的合矢量, 两者的光强度各等于自然光总光强度的一半。

当非偏振光通过起偏器时, 与偏振片的透光轴方向平行的线偏振光完全透过, 而与偏振片的消光轴方向平行的线偏振光则不能透过。偏振片在这里实际上起着起偏器的作用。因此非偏振光经过偏振片后, 它的光强是原来的一半, 并且光矢量的振动方向与偏振片的透光轴方向一致。通常用图 1.4 表示自然光, 其中图 1.4(a)表示自然光在垂直于传播方向平面内光矢量的分布; 图 1.4(b)表示自然光可以用两个互相垂直的光矢量表示; 图 1.4(c)表示自然光可等效为相位关系不确定、振动方向互相垂直的两平面偏振光的叠加。

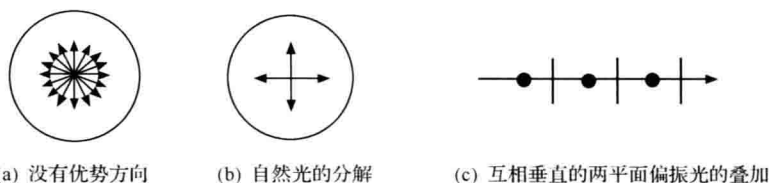


图 1.4 自然光的图示法

5. 部分偏振光

线偏振、椭圆偏振和圆偏振属于完全偏振, 一般情况下自然界的光线是完全偏振光和自然光的混合, 称为部分偏振光。部分偏振光在垂直于光传播方向的平面内沿各方向振动的光矢量都有, 但振幅不对称, 在某一方向振动较强, 而与它垂直的方向上振动较弱。部分偏振光的光矢量可分解为两个振幅不等、振动相互垂直的独立分振动。自然界大部分偏振光都是部分偏振光。

1.2 光在介质表面的偏振

太阳和普通光源发出的光一般都是自然光。自然光在任意两种各向同性介质的分界面上发生反射和折射时,除去入射天顶角为 90° 和 0° 的特殊情况下,反射光和折射光皆部分偏振光。反射波、透射波与入射波传播方向之间的关系由反射定律和折射定律描述,而它们之间的相位关系由菲涅耳(Fresnel)公式描述。

反射定律:

$$\theta_r = \theta_i \text{ (反射角等于入射角)}$$

折射定律:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (n = \sqrt{\epsilon_r}, \text{相对介电常数})$$

菲涅耳公式:如图 1.5 所示,将任意振动方向的电矢量分解为垂直于入射面振动的分量(s 分量)和平行于入射面的分量(p 分量)。

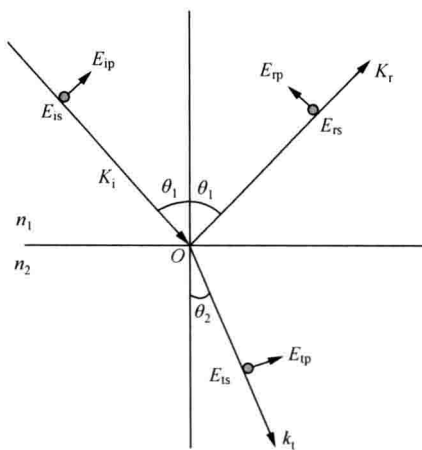


图 1.5 s 分量和 p 分量的正方向

s 分量(电矢量垂直于入射面)的反射系数为

$$r_s = \frac{E_{0rs}}{E_{0is}} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (1.9)$$

透射系数为

$$t_s = \frac{E_{0ts}}{E_{0is}} = \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (1.10)$$

p 分量(电矢量平行于入射面)的反射系数为

$$r_p = \frac{E_{0rp}}{E_{0ip}} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (1.11)$$

透射系数为

$$t_p = \frac{E_{0tp}}{E_{0ip}} = \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (1.12)$$

如果已知界面两侧的折射率和入射角,就可由折射定律确定折射角,再由菲涅耳公式求出反射系数和透射系数。

则入射光的反射率与透射率可以表示为

$$R_s = r_s^2 = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1.13)$$

$$R_p = r_p^2 = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1.14)$$

$$T_s = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} t_s^2 = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1.15)$$

$$T_p = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} t_p^2 = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (1.16)$$

当入射光为线偏振光时,有

$$R = R_p \cos^2 \alpha + R_s \sin^2 \alpha \quad (1.17)$$

$$T = T_p \cos^2 \alpha + T_s \sin^2 \alpha \quad (1.18)$$

当入射光为自然光时,有

$$R = \frac{1}{2}(R_s + R_p) \quad (1.19)$$

$$T = \frac{1}{2}(T_s + T_p) \quad (1.20)$$

则依据偏振度(degree of polarization, DOP)的定义,反射光的偏振度为

$$\text{DOP}_r = \left| \frac{I_{rp} - I_{rs}}{I_{rp} + I_{rs}} \right| = \left| \frac{R_p - R_s}{R_p + R_s} \right| = \left| \frac{\cos^2(\theta_1 + \theta_2) - \cos^2(\theta_1 - \theta_2)}{\cos^2(\theta_1 + \theta_2) + \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \right| \quad (1.21)$$

折射光的偏振度为

$$\text{DOP}_t = \left| \frac{I_{tp} - I_{ts}}{I_{tp} + I_{ts}} \right| = \left| \frac{T_p - T_s}{T_p + T_s} \right| = \left| \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{1 + \cos^2(\theta_1 + \theta_2)} \right| \quad (1.22)$$

1.3 偏振的表征

偏振度是表征偏振的最主要参数,其定义:部分偏振光的总强度中完全偏振光所占的比例,即

$$\text{DOP} = \frac{I_p}{I_{\text{总}}} \quad (1.23)$$

还可表示为

$$\text{DOP} = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m}$$

其中 I_M 和 I_m 分别为相位不相关且相互正交的两个特殊方向上所对应的最大和最小光强。

为了更好地描述偏振光,有电矢分量方法、琼斯(Jone)矢量方法、邦加球表示法以及斯托克斯(Stokes)矢量表示法。

1.3.1 电矢分量方法

电矢分量方法即为在 1.1 节描述光的偏振态时使用的光的描述方式。以经典波动理论为基础来描述偏振光的方法称作电矢分量方法,在笛卡儿坐标系里,设一束单色平面偏