普通高等教育“十一五”国家级规划教材辅助教材

《物理光学与应用光学(第三版)》学习指导书

石顺祥　马　琳　王学恩　编著

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材辅助教材

《物理光学与应用光学(第三版)》
学习指导书

石顺祥　马琳　王学恩　编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是与石顺祥教授等编著的普通高等教育"十一五"国家级规划教材《物理光学与应用光学(第三版)》配套的教学参考书。

本书根据"物理光学与应用光学"课程的教学大纲，提出了学习《物理光学与应用光学(第三版)》的基本要求，指出了重点和难点；对《物理光学与应用光学(第三版)》的基本概念和公式，进行了归纳、精述；精选并讲解了典型例题；对书中部分习题给出了解答。

本书可以作为工科高等院校光电子技术、电子科学与技术、光学工程、光信息科学与技术等专业的"物理光学与应用光学""物理光学""光学"等课程的教学参考书，也可以作为其它相近专业学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

《物理光学与应用光学(第三版)》学习指导书/石顺祥，马琳，王学恩编著.
—2版. —西安：西安电子科技大学出版社，2014.11
普通高等教育"十一五"国家级规划教材辅助教材
ISBN 978-7-5606-3485-2

Ⅰ. ①物… Ⅱ. ①石… ②马… ③王… Ⅲ. ①物理光学—高等学校—教学参考资料 ②应用光学—高等学校—教学参考资料 Ⅳ. ①O436 ②O439

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 249225 号

责任编辑　夏大平　云立实
出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)
电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　　编　710071
网　　址　www.xduph.com　　电子邮箱　xdupfxb001@163.com
经　　销　新华书店
印刷单位　陕西天意印务有限责任公司
版　　次　2014 年 11 月第 2 版　2014 年 11 月第 2 次印刷
开　　本　787 毫米×1092 毫米　1/16　印张　13.5
字　　数　315 千字
印　　数　3001～6000 册
定　　价　24.00 元
ISBN 978-7-5606-3485-2/O

XDUP 3777002-2

***** 如有印装问题可调换 *****

前　　言

本书是与西安电子科技大学出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《物理光学与应用光学(第三版)》(以下简称教材)配套的学习指导书。

根据编写学习指导书的指导思想，我们对《物理光学与应用光学(第二版)学习指导书》的使用情况进行了了解和研究。为了有利于《物理光学与应用光学(第三版)》的学习，有利于提高教学质量，我们对《物理光学与应用光学(第三版)学习指导书》的编写内容主要进行了如下调整：加强了光的电磁场理论知识体系的系统描述，更有利于读者对光波在各类介质中传播特性的理解和掌握；根据教学大纲的要求，增加了各章典型例题的讲解，更有利于对《物理光学与应用光学(第三版)》的学习；为避免内容的重复，对各章的习题进行了参考性的选解。

教材及本书的责任编辑夏大平再次对教材及本书内容特别是习题解答进行了仔细甄核，在此谨向他表示诚挚的感谢。

希望这本学习指导书的出版能对《物理光学与应用光学(第三版)》的教学和读者的学习有益。

编　者
2014 年 5 月

《〈物理光学与应用光学(第二版)〉学习指导书》

前 言

21 世纪，人们进入了一个崭新的时代——信息时代。信息时代鲜明的时代特征是，支撑这个时代的重要基础产业，如能源、交通、材料、信息等都已或将得到高度发展，能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。

与信息产业相应的信息科学的基础是电子学与电子技术和光子学与光子技术。众所周知，电子学与电子技术是 20 世纪发展起来的科学技术，现已处于高度发展的水平，广泛地应用于社会各个领域，并且已渗透到家庭生活之中，目前正由微电子学与微电子技术向纳米电子学与纳米电子技术、分子电子学与分子电子技术发展。光子学与光子技术可以认为是从 1960 年激光器诞生开始出现的一个新型的科学与技术，目前正处于成长与发展时期。光子学的概念是在 1970 年由荷兰科学家 Poldervaat 首先提出来的，我国著名科学家龚祖同、钱学森在 20 世纪 70 年代就已指出，“光子学是一门与电子学平行的科学”。作为光子学与光子技术发展过程中的一个阶段，光电子学与光电子技术正日新月异地迅猛发展。

一般认为，光电子学与光电子技术是光学与电子学的结合。光电子学与光电子技术作为高新科学技术的产生和发展始于激光器的诞生，它是伴随着物理学、电子学、材料学等诸多科学发展起来的，它的快速发展和遍及各个领域的广泛应用，不断地向其它学科领域渗透，又推动着其它学科的发展。

从光电子学与光电子技术的科学内涵来看，它主要是研究光与物质的相互作用。理论上，对于光与物质的相互作用通常采用极化理论处理，具体有三种理论研究体系：经典理论体系、半经典理论体系和全量子理论体系。在经典理论体系中，视介质由经典粒子组成，采用经典(牛顿)力学描述介质的极化作用；认为光是经典电磁波场，采用麦克斯韦理论描述光辐射特性。在半经典理论体系中，视介质由具有量子性的粒子组成，采用量子力学描述介质的极化作用；认为光是经典电磁波场，采用麦克斯韦理论描述光辐射特性。在全量子理论体系中，视介质由具有量子性的粒子组成，采用量子力学描述介质的极化作用；认为光是量子化场，采用量子光学描述光辐射特性。对于目前的实际应用，利用经典理论、半经典理论已能够较好地处理所遇到的大部分光电子学与光电子技术问题。

随着激光器的诞生、激光技术的发展，光电子学与光电子技术作为高新技术在科学技术和国民经济中起着越来越重要的作用，并与电子学和电子技术平行发展。从光电子学与光电子技术的学科内涵看，其主要研究内容是光，特别是相干光的产生、传输、控制、探测及各种应用。而从目前大部分的实际应用来看，利用光的电磁理论均可较好地解决光传输的实际问题。正因为此，目前国内大多数工科高等院校设立的与光电子学和光电子技术相关的电子科学与技术、光信息科学与技术、光电子技术、光学等专业，都是以光的电磁理论为基本教学理论体系，并以此为基础，制订教学大纲，设置相关课程的。其中，“物理光学与应用光学”或“物理光学”“ 应用光学”“光学”是最主要的专业基础课程。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材《物理光学与应用光学(第二版)》，是在 2000 年出版的高等学校电子信息类部级重点规划教材《物理光学与应用光学》的基础上，经过修改重新编写而成的，是作者长期在西安电子科技大学从事光电子技术专业的教学和科研工

作的基础上，适应光电子技术的发展，为电子科学与技术、光信息科学与技术、光电子技术等专业的专业基础课“物理光学与应用光学”编写的教材。这本教材以光的电磁理论为理论教学体系，其特点是：

(1) 全书内容均直接从光的电磁理论出发，主要研究光在各向同性介质、各向异性介质和介质界面上的传播特性，以及光波传播的控制特性；

(2) 全书研究的是光波在介质中传播的线性光学现象，着重于光的干涉、衍射、偏振等波动性特性，它们均满足光的独立传播原理和线性叠加原理；

(3) 在讨论光在介质中传播的物理特性的基础上，将光在各种光学系统中的传输视为光线成像，作为光的波动性的特例进行分析，并构成了这本教材的应用光学内容；

(4) 为适应光电子技术，特别是激光技术的实际应用，特别强调了光波的相干特性；

(5) 为了反映光电子技术的发展，增加了傅里叶光学、微光学和近场光学等基础内容。

这本教材在编写过程中，注意到相关专业学生已学过电磁学或电磁场理论等先导课程，已具有电磁场理论的基本知识，直接从麦克斯韦基本方程出发进行讨论，既避免了内容的重复性，又保持了整体内容的连续性。这本教材在撰写中特别注意研究内容的系统性、逻辑性、严谨性和概念的准确性，便于实施教学。

这本教材出版后，受到我国高校广大教师和学生的欢迎，特别是受到光电信息类、光学工程类专业师生的厚爱，已被许多学校选为“物理光学与应用光学”、“物理光学”或“光学”等课程的教材或参考书。多年来，有许多读者通过信函、电子邮件或来电建议，希望编写一本与《物理光学与应用光学》教材配套的教学参考书。考虑再三，在西安电子科技大学出版社的盛情相邀下，我们编写了这本与《物理光学与应用光学(第二版)》配套的教学参考书，希望能对使用《物理光学与应用光学(第二版)》教材的老师教学和学生学习以及相关专业学生考研复习有所帮助。

根据编写教学参考书的指导思想，本书内容包含四部分：

(1) 根据相关专业的教学大纲，对《物理光学与应用光学(第二版)》教材各章内容提出了基本要求，以及重点和难点；

(2) 根据基本要求，对《物理光学与应用光学(第二版)》教材各章内容进行了归纳，精述了基本概念和基本公式；

(3) 根据各章的基本要求，精选并求解了若干典型例题；

(4) 对《物理光学与应用光学(第二版)》教材各章的习题进行了部分选解或全解。

特别要指出的是，本书给出的典型例题和习题选解并非标准答案，它只是该题的一种解法，除此而外，可能还有更好的求解方法，本书只是抛砖引玉，以期大家共同探讨。

为了使用方便，本书中的公式、符号及引用的图表，未加特殊说明，均采用《物理光学与应用光学(第二版)》教材中的形式。

本书由马琳执笔编写第 1～6 章内容，王学恩执笔编写第 7～10 章内容，全书由石顺祥统稿。在编写过程中，得到了西安电子科技大学激光教研室老师和研究生的热情帮助，本书责任编辑夏大平对本书内容特别是习题解答进行了仔细甄核，在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些不足，殷切期望广大读者批评指正。

编　者

2010 年 2 月

目　录

第 1 章　光在各向同性介质中的传播特性

本章根据光的电磁场理论，讨论了光波的基本属性，重点讨论光在各向同性介质中的传播特性，光波在介质界面上的反射和折射特性。这是全书讨论内容的基础。

1.1　基 本 要 求

1. 基本要求

(1) 熟练掌握平面光波的基本属性：能量、速度、偏振；

(2) 熟练掌握平面光波在界面上的反射定律、折射定律、菲涅耳公式、反射率和透射率，掌握平面光波反射和折射的相位、偏振特性和全反射特性；

(3) 了解光波在金属表面上的反射和折射特性。

2. 重点和难点

(1) 重点：平面光波的基本属性，平面光波在各向同性介质中的反射和折射特性。

(2) 难点：平面光波反射和折射的偏振特性，全反射特性。

1.2　基本概念和公式

众所周知，麦克斯韦建立的经典电磁理论，把光学现象与电磁现象联系了起来，指出光波是一种光频电磁波，从而产生了描述光学波动现象的基本理论——光的电磁理论。任何光波电场和磁场的传播特性，均可在时空域和时空频率域中描述。本章基于光的电磁理论讨论了光波在各向同性介质中的传播特性：通过求解波动方程，得到了平面光波、球面光波、柱面光波及高斯光波等几种特殊形式光波的电场表示式，对于任意复杂的光波电场都可以看成是这些特殊光波电场的线性叠加；较详细地讨论了平面光波的横波特性和偏振特性、能量和能量密度(或坡印廷矢量)、光波相速度和能量传播速度特性；详细讨论了描述平面光波在介质界面上传播方向的反射定律和折射定律以及描述入射光、反射光和折射光间的振幅、强度和相位关系，重点讨论了不同介质界面上的偏振特性和全反射现象。这些内容构成了众多光电子技术应用的理论基础。

1. 光波的基本属性

1) 麦克斯韦方程组

光的经典电磁理论认为，光是一种光频电磁波，采用 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 描述其时空电磁场，为了包含电磁场对物质的作用，还应引入电位移矢量 $\boldsymbol{D}$ 和磁感应(强度)矢量 $\boldsymbol{B}$。如果描述的光波场在无穷大、均匀、各向同性介质中，并限定所讨论的光电磁波区域远离辐射源、不存在自由电荷(ρ)和传导电流(J)，则光电磁场矢量满足如下麦克斯韦方程组：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = 0$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$$

2) 物质方程

光波在各向同性介质中传播时，应满足如下物质方程(本构方程)：

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E}$$

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}$$

式中，$\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon_r$，为介质的介电常数，描述介质的电学性质，其中，$\varepsilon_0$ 是真空中的介电常数，ε_r 是相对介电常数；$\mu=\mu_0\mu_r$，为介质磁导率，描述介质的磁学性质，其中，μ_0 是真空中的磁导率，μ_r 是相对磁导率；σ 为电导率，描述介质的导电特性。通常，我们只研究介质的电学特性，如果介质是均匀各向同性的，则介电常数为一常数量 ε，电位移矢量 $\boldsymbol{D}$ 与电场矢量 $\boldsymbol{E}$ 同方向；如果介质是非均匀的，则介电常数为空间位置的函数 $\varepsilon(\boldsymbol{r})$，这种情况在本书第 6 章中简单讨论；如果介质是均匀各向异性的，则介电常数是一常张量 $\boldsymbol{\varepsilon}$，在一般情况下，电位移矢量 $\boldsymbol{D}$ 与电场矢量 $\boldsymbol{E}$ 方向不同，这种情况是本书第 4 章所讨论的内容。

3) 波动方程

基于麦克斯韦方程组和物质方程，光波在各向同性介质中传播时所满足的波动方程为

$$\begin{cases} \nabla^2 \boldsymbol{E} - \mu\varepsilon \dfrac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \boldsymbol{H} - \mu\varepsilon \dfrac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

凡是能够在介质中传播的电磁波一定满足该方程，反之，若某光波场不满足该方程，则这个光波场一定不存在。

4) 光波

光波的频率极高，为方便起见，通常采用波长表征。光波的光谱范围为 1 mm～10 nm，包含红外线、可见光和紫外线。真空中可见光的波长范围为 380～780 nm，正常视力的人眼对波长为 550 nm 的绿光最敏感。

光波在真空中的传播速度大小为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

光波在介质中的传播速度 v 取决于介质的光学性质，其大小可表示为

$$v = \frac{c}{n}$$

式中，n 是光波在该介质中的折射率，且 $n=\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}$。实际上，这个速度指的是光波的相速度，其方向为光波的波矢方向。

除铁磁性介质外，大多数介质的磁性都很弱，可以认为 $\mu_r\approx 1$。因此，介质折射率可表示为

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}$$

对于一般的介质，ε_r 或 n 都是频率的函数，具体的函数关系取决于介质的色散特性。

5）光矢量

在通常应用的情况下，光波对介质的磁作用远小于电作用，所以常将光波中的电场矢量 $\boldsymbol{E}$ 称为光矢量，将光电场 $\boldsymbol{E}$ 的振动称为光振动，讨论光波的传播特性时常常只考虑其光电场特性。

6）特殊光波

求解光波在无穷大、均匀、各向同性介质中传播的波动方程，可以得到几种特殊形式的光波：平面光波、球面光波、柱面光波及高斯光束，任何一种复杂的光波都可视为这些特殊光波的线性叠加。

（1）平面光波。沿着任一波矢 $\boldsymbol{k}$ 方向传播的单色平面光波电场的表示式为

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \cos(\omega t - \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r} + \varphi_0)$$

若单色平面光波沿 z 方向传播，则

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0)$$

这种单色平面光波是一个在时间、空间上无限延伸的正弦简谐光波动，其时间周期性用周期 T、频率 ν、圆频率 ω 表征，且有 $\nu=1/T$，$\omega=2\pi/T$；空间周期性用空间周期 λ（波长）、空间频率 $1/\lambda$、空间圆频率 k 表征，有 $k=2\pi/\lambda$。单色平面光波的时间周期性与空间周期性相关，可由 $\nu=v/\lambda$ 联系。

为了理论运算的方便，常将沿着波矢 $\boldsymbol{k}$ 方向传播的单色平面光波电场表示为复数形式：

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t - \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r} + \varphi_0)} = \widetilde{\boldsymbol{E}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}$$

式中，$\widetilde{\boldsymbol{E}}$ 称为光场的复振幅。

应当指出的是：① 光场除了采用上述形式外，还可采用 $\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}+\varphi_0)}$ 的形式，两种不同形式得到的结果形式可能不同，但其物理结论相同；② 光场的复数表示仅有数学意义，对于这种复数形式量的线性运算，只有取实部才有物理意义。

（2）球面光波。由点光源产生的单色球面光波电场的复数表示形式为

$$E = \frac{A_1}{r}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t - kr + \varphi_0)} = \widetilde{E}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}$$

式中，A_1 为离开点光源单位距离处的振幅值；球面光波矢径 $\boldsymbol{r}$ 的计算起点为光波的源点。可见，球面波的振幅随 r 成反比例变化。如果 $\boldsymbol{k}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 方向一致，则是发散球面波，相反，则为会聚球面波。

（3）柱面光波。由线光源产生的单色柱面光波电场的复数表示形式为

$$E=\frac{A_1}{\sqrt{r}}e^{-i(\omega t-kr+\varphi_0)}=\widetilde{E}e^{-i\omega t}$$

式中，A_1 是离开线光源单位距离处光波电场的振幅值。柱面光波电场的振幅与$\sqrt{r}$成反比。

(4) 高斯光束。基模高斯光束是以 z 轴为柱对称的光波，它也是波动方程的一种特解，是大体朝着 z 轴方向传播、等相位面的曲率半径不断变化、振幅在横截面内为高斯分布的特殊光波。

基模高斯光束的标量波光场表示式为

$$E_{00}(r,z,t)=\frac{E_0}{w(z)}e^{-\frac{r^2}{w^2(z)}}e^{i\left[k\left(z+\frac{r^2}{2R(z)}\right)-\arctan\frac{z}{f}\right]}e^{-i\omega t}$$

式中，E_0 为常数，其余符号的意义为

$$r^2=x^2+y^2$$

$$k=\frac{2\pi}{\lambda}$$

$$w(z)=w_0\sqrt{1+\left(\frac{z}{f}\right)^2}$$

$$R(z)=z+\frac{f^2}{z}$$

$$f=\frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

$w(z)$为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径；$w_0=w(z=0)$为基模高斯光束的束腰半径；f 为高斯光束的共焦参数或瑞利长度；$R(z)$为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径。

7) 光波的能量密度、能流密度

光波是一种携带能量在空间传播的电磁波，光波能量密度为

$$w=\frac{1}{2}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B})$$

光波能流密度(或称为坡印廷矢量)为

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}$$

$\boldsymbol{S}$ 描述了电磁能量的传播，其大小表示单位时间内、通过垂直于传播方向上的单位面积的能量，方向为能量传播的方向。在实际应用中，都是利用能流密度的时间平均$\langle\boldsymbol{S}\rangle$来表征光波的能量传播的，并称其值$\langle S\rangle$为光强，以 I 表示。对于单色平面光波，光强为

$$I=\langle S\rangle=\frac{1}{2}\frac{n}{\mu_0 c}E_0^2=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_0}}E_0^2=\alpha E_0^2$$

式中，$\alpha=\dfrac{n}{2\mu_0 c}=\dfrac{\sqrt{\varepsilon/\mu_0}}{2}$，是比例系数，光强的单位为 W/m^2。由此可见，光强与电场强度振幅的平方成正比。在同一种介质中，常常只关心光强的相对值，而将比例系数省略，把光强表示为

$$I=\langle E^2\rangle=E_0^2$$

当单色平面光波场采用复数形式表示时，光波能量密度的时间平均值为

$$\langle w\rangle=\mathrm{Re}\left[\frac{1}{4}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}^{*}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B}^{*})\right]$$

光波能流密度的时间平均值为

$$\langle\boldsymbol{S}\rangle=\mathrm{Re}\left(\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}^{*}\right)$$

上式中，通常定义

$$\boldsymbol{S}=\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}^{*}$$

为复坡印廷矢量。

2. 平面光波的传播特性

1）平面光波的横波特性

平面光波在各向同性介质中传播时，其电场矢量 $\boldsymbol{E}$ 和磁场矢量 $\boldsymbol{H}$ 均垂直于波矢 $\boldsymbol{k}$ 方向（波阵面法线方向）。因此，平面光波是横电磁波（TEM 波）。

2）平面光波的偏振特性

平面光波的偏振特性是指光矢量相对于传播方向的不对称性。

（1）平面光波的偏振态。对于一个单色平面光波，根据空间任一点光电场 $\boldsymbol{E}$ 的振动矢量末端在不同时刻的轨迹，可以将其分为线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。

① 线偏振光。线偏振光是指平面光波在垂直于传播方向的某一平面内，其光矢量只改变大小、不改变方向，末端的轨迹是一直线。由于在同一时刻，线偏振光传播方向上各点的光矢量都在同一平面内，所以又叫平面偏振光。通常，将光振动方向与光波传播方向构成的平面称为线偏振光的振动面。

② 圆偏振光。圆偏振光在垂直于传播方向的某一平面内，光矢量以 ω 角速度旋转，其大小不变，末端轨迹描绘出一个圆。

③ 椭圆偏振光。椭圆偏振光在垂直于传播方向的某一平面内，光矢量的大小和方向都在改变，其末端轨迹是一个椭圆。

（2）偏振光的表示。

① 三角函数表示法。任一线偏振光都可以看成是振动方向相互垂直、相位相同或相反、振幅比一定的两个线偏振光的合成，可表示为

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{i}E_x+\boldsymbol{j}E_y$$

$$\frac{E_y}{E_x}=\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}m\pi}\qquad m=0,\ \pm1,\ \pm2,\ \cdots$$

当 m 为零或偶数时，光场振动方向在Ⅰ、Ⅲ象限内；当 m 为奇数时，光场振动方向在Ⅱ、Ⅳ象限内。

沿 z 轴方向传播的圆偏振光，可以看做是 x 和 y 方向等振幅、相位差为 $\pm\pi/2$ 奇数倍的两线偏振光的合成：

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{i}E_x+\boldsymbol{j}E_y$$

$$\frac{E_y}{E_x}=\mathrm{e}^{\mp\mathrm{i}m\frac{\pi}{2}}=\mp\mathrm{i}m\qquad m=1,\ 3,\ 5,\ \cdots$$

式中，如果 $\pi/2$ 前取负号，即 y 方向的振动相位超前于 x 方向振动，则逆着光传播的方向观察时，光矢量沿顺时针方向旋转，称为右旋圆偏振光；如果 $\pi/2$ 前取正号，即 y 方向的

振动相位落后于 x 方向振动，则逆着光传播的方向观察时，光矢量沿逆时针方向旋转，称为左旋圆偏振光。

沿 z 轴方向传播的椭圆偏振光，可以看做是在 x、y 方向振动的、具有一定相位差且振幅不相等的两线偏振光的合成。合成光波光矢量末端的轨迹方程为

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

式中，$\varphi=\varphi_y-\varphi_x$。

椭圆的长、短半轴和取向与二分量的振幅和相位差有关，其旋向取决于 φ：当 $(2m+1)\pi>\varphi>2m\pi$，即 y 方向振动的相位超前于 x 方向振动时，逆着光传播的方向观察，为右旋椭圆偏振光；当 $2m\pi>\varphi>(2m-1)\pi$ 时，y 方向振动的相位落后于 x 方向振动，逆着光传播的方向看，为左旋椭圆偏振光。

② 琼斯矩阵表示法。偏振光的琼斯矩阵表示法是利用琼斯矢量来表示平面光波的偏振状态，琼斯矢量是用平面光波复振幅表示成的列矢量，即

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}E_x\\E_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}E_{0x}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\varphi_x}\\E_{0y}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\varphi_y}\end{bmatrix}$$

琼斯矢量包含有光电场矢量的振幅和相位的全部信息，因此，它可唯一地确定光波的状态。应当指出的是，琼斯矢量是一个复矢量，其元素是复数，因此，$\boldsymbol{J}$ 不是实际物理空间的矢量，而只是抽象数学空间中的矢量。例如，为了得到真实光电场的 x 分量，必须进行 $E_x(t)=\mathrm{Re}[J_x\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}]=\mathrm{Re}[E_{0x}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t+\varphi_x)}]$运算。

如果我们只关心光波的偏振状态，考虑到光强 $I=E_x^2+E_y^2$，可以采用标准归一化琼斯矢量表示偏振光。标准归一化琼斯矢量系用琼斯矢量的每一个分量除以$\sqrt{I}$得到，满足如下归一化条件：

$$\boldsymbol{J}^*\cdot\boldsymbol{J}=1$$

例如，x 方向振动的线偏振光、y 方向振动的线偏振光、45°方向振动的线偏振光、振动方向与 x 轴成 θ 角的线偏振光、左旋圆偏振光、右旋圆偏振光的标准归一化琼斯矢量形式分别为

$$\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix},\ \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix},\ \frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix},\ \begin{bmatrix}\cos\theta\\\sin\theta\end{bmatrix},\ \frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix}1\\\mathrm{i}\end{bmatrix},\ \frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix}1\\-\mathrm{i}\end{bmatrix}$$

一般偏振光的标准归一化琼斯矢量的矩阵可以查阅相关琼斯矩阵表得到。

互为正交的两个偏振光，满足如下关系：

$$\boldsymbol{J}_1\cdot\boldsymbol{J}_2^*=[E_{1x}\ E_{1y}]\begin{bmatrix}E_{2x}^*\\E_{2y}^*\end{bmatrix}=0$$

偏振光 $\boldsymbol{E}_\mathrm{i}$ 通过几个偏振元件后的偏振状态，可以采用如下琼斯矩阵运算表示：

$$\begin{bmatrix}E_{\mathrm{t}x}\\E_{\mathrm{t}y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_n&b_n\\c_n&d_n\end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix}a_2&b_2\\c_2&d_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_1&b_1\\c_1&d_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_{\mathrm{i}x}\\E_{\mathrm{i}y}\end{bmatrix}$$

式中，$\begin{bmatrix}a_n&b_n\\c_n&d_n\end{bmatrix}$为表示光学元件偏振特性的琼斯矩阵，可由光学手册查到。

应当强调指出，上述偏振光偏振状态的结论是针对本书所采用 $\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_0\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}+\phi_0)}$ 光电场表示式及逆光传播方向判别左右旋向的规定得到的，对于采用 $\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}+\phi_0)}$ 光电场

表示式或顺光传播方向判别左右旋向，处理方法相同，但其结论可能相反。

3）一般光波的偏振态与偏振度

（1）一般光波的偏振态。

① 实际上，由普通光源发出的沿某一方向传播的光波都不是单一的平面波，而是由大量平面光波组合而成的。它们具有一切可能的振动方向，各个振动方向上的振幅在观察时间内的平均值相等，初相位独立无关，通常称这样的光束为完全非偏振光，或自然光。

② 如果由于外界的控制作用，使得各个振动方向上的振动强度不相等，就变成部分偏振光。

③ 如果光场矢量有确定不变的或有规则变化的振动方向，则称为完全偏振光。

部分偏振光可以看成是完全偏振光和自然光的混合，而完全偏振光可以是线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光。

（2）一般光波的偏振度。为了表征光波的偏振特性，引入偏振度 P，它表示在部分偏振光的总强度中，完全偏振光所占有的比例，即

$$P = \frac{I_L}{I_{总}}$$

偏振度还可以表示为

$$P = \frac{I_{\mathrm{M}} - I_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{M}} + I_{\mathrm{m}}}$$

式中，I_{M} 和 I_{m} 分别为两个特殊（正交）方向上所对应的最大和最小光强。

对于完全非偏振光，$P=0$；完全偏振光，$P=1$；部分偏振光，$1>P>0$。P 值愈接近于 1，光的偏振程度愈高。

3. 光波场频谱

由光的电磁理论，光波场是时间和空间的函数，因此研究光波的传输特性可以在时间域和空间域中进行。根据傅里叶变换，许多关于光波传输特性问题的研究（例如光信息处理），还可以在时间频率域和空间频率域中进行，而且更方便，并引入时域频谱和空域频谱的概念。

1）时域频谱

（1）时域频谱。在一般情况下，若只考虑光波场在时间域内的变化，则可以表示为时间的函数 $E(t)$。根据傅里叶变换，它可表示为

$$E(t) = \mathrm{F}^{-1}[E(\nu)] = \int_{-\infty}^{\infty} E(\nu)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi\nu t}\,\mathrm{d}\nu$$

式中，$E(\nu)$ 随 ν 的变化称为 $E(t)$ 的（时域）频谱分布，或简称为（时域）频谱。该式表明，一个随时间变化的光波场振动 $E(t)$，可以视为许多单频（单色）成分简谐振荡的叠加，各成分相应的振幅为

$$E(\nu) = \mathrm{F}[E(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} E(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\nu t}\,\mathrm{d}t$$

该 $E(\nu)$ 为复数，它就是 ν 频率分量的复振幅

$$E(\nu) = |E(\nu)|\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi(\nu)}$$

式中，$|E(\nu)|$ 为复振幅模（大小）；$\varphi(\nu)$ 为辐角。光波场的功率谱为 $|E(\nu)|^2$。因此，一个时域光波场 $E(t)$ 的传输特性可以在频率域内通过它的频谱成分的传输特性描述。

(2) 准单色光波。实际上，理想的单色光波是不存在的，任何光源能够得到的均是包含有许多频率分量的复色光波，其频率分量愈少，愈接近于单色光波。对于一个实际的表观频率为 ν_0 的脉冲光波，若其振幅随时间的变化比振荡本身缓慢得多，则该光波的频率分量就集中在 ν_0 附近的一个很窄的频谱宽度 $\Delta\nu$ 内，可认为是中心频率为 ν_0 的准单色光波，其电场振动表示式为

$$E(t)=E_0(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi\nu_0 t}$$

对于一个表观频率为 ν_0、振幅为高斯函数的准单色光波，

$$E(t)=A\mathrm{e}^{\frac{-4(t-t_0)^2}{\Delta t^2}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(2\pi\nu_0 t+\varphi_0)}$$

在 $t=t_0$ 时，振幅最大，且为 A；当 $|t-t_0|=\Delta t/2$ 时，振幅降为 A/e，参数 Δt 表征了该准单色波持续振荡的有效时间。这种高斯型准单色光波的频谱分布为

$$E(\nu)=\frac{1}{2}\sqrt{\pi}\,\Delta tA\,\mathrm{e}^{-\frac{\pi^2\Delta t^2(\nu-\nu_0)^2}{4}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}[2\pi(\nu_0-\nu)t_0+\varphi_0]}$$

相应的功率谱为

$$|E(\nu)|^2=\frac{1}{4}\pi\Delta t^2A^2\mathrm{e}^{-\frac{\pi^2\Delta t^2(\nu-\nu_0)^2}{2}}$$

频谱宽度定义为最大强度 $1/\mathrm{e}$ 处所对应的两个频率 ν_2 和 ν_1 之差 $\Delta\nu$，

$$\Delta\nu=\nu_2-\nu_1=\frac{2\sqrt{2}}{\pi\Delta t}$$

它表征了高斯型准单色光波的单色性程度。

2) 空域频谱

(1) 空间频率。沿任意空间方向 $\boldsymbol{k}$ 传播的单色平面光波电场的表示式为

$$E=E_0\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}+\varphi_0)}=E_0\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t-k_x x-k_y y-k_z z+\varphi_0)}$$

因为 k 与描述光波空间周期性的波长 λ 的关系为

$$k=\frac{2\pi}{\lambda}$$

且 $\boldsymbol{k}$ 分量可利用方向余弦表示为

$$k_x=k\cos\alpha,\ k_y=k\cos\beta,\ k_z=k\cos\gamma$$

所以，通过定义空间频率(空间呈正弦或余弦变化的光场，在其某一方向上单位距离内所包含的空间周期数)

$$f_x=\frac{\cos\alpha}{\lambda},\ f_y=\frac{\cos\beta}{\lambda},\ f_z=\frac{\cos\gamma}{\lambda}$$

可将该平面光波表示为

$$E=E_0\mathrm{e}^{-\mathrm{i}[\omega t-2\pi(f_x x+f_y y+f_z z)+\varphi_0]}$$

在任意 $z=z_0$ 的 xy 平面上，其复振幅可表示为

$$\widetilde{E}=E_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_z z_0}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(k_x x+k_y y)}=\widetilde{E}_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}(k_x x+k_y y)}=\widetilde{E}_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi(f_x x+f_y y)}$$

式中，

$$\widetilde{E}_0=E_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_z z_0}$$

当研究任意垂直于 z 轴的一个平面上单色光波的复振幅分布时，每一组空间频率 (f_x, f_y) 值对应于一个沿一定方向传播的单色平面光波。

（2）空域频谱。在任一 xy 平面上复振幅分布为 $\widetilde{E}(x, y)$ 的单色光波，可以根据二维傅里叶变换，将 $\widetilde{E}(x, y)$ 分解成无数个形式为 $\exp[\mathrm{i}2\pi(f_x x + f_y y)]$ 的基元函数的线性组合，即

$$\widetilde{E}(x, y) = \mathrm{F}^{-1}[\widetilde{E}(f_x, f_y)] = \iint_{-\infty}^{\infty} \widetilde{E}(f_x, f_y)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi(f_x x, f_y y)}\mathrm{d}f_x\,\mathrm{d}f_y$$

式中，基元函数 $\exp[\mathrm{i}2\pi(f_x x + f_y y)]$ 为传播方向由空间频率 (f_x, f_y) 决定的平面光波，所占比例的大小由 $\widetilde{E}(f_x, f_y)$ 决定。通常，称 $\widetilde{E}(f_x, f_y)$ 随 (f_x, f_y) 的变化分布为 $\widetilde{E}(x, y)$ 的空间频率谱，简称为空间频谱（或角谱）。

于是，可以将任意单色光波场的复振幅视为沿空间不同方向传播的单色平面光波的叠加，其每一个平面光波分量与一组空间频率 (f_x, f_y) 相对应，

$$\widetilde{E}(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} \widetilde{E}_z(f_x, f_y)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi(f_x x, f_y y)}\mathrm{d}f_x\,\mathrm{d}f_y$$

因此，一个空间域光波场 $E(x, y, z)$ 的传输特性可以在空间频率域内通过它的空间频谱成分的传输特性描述。

4. 光波的速度

光波的速度表征了光波在空间中传播的快慢。光波速度有描述光波相位状态传播快慢的相速度和描述光波能量传播快慢的能量速度。若光波在各向同性介质中传播，则其相速度也即是能量传播速度；若光波在各向异性介质中传播，则相速度和能量速度不同，其特性在第 4 章中详细讨论。

1）单色光波速度

（1）相速度。相速度 $\boldsymbol{v}$（或表示为 $\boldsymbol{v}_p$）是单色光波所特有的一种速度，它指的是等相位面的传播速度。对于单色平面光波，其相速度为

$$\boldsymbol{v} = \frac{\omega}{k}\boldsymbol{k}_0 = \frac{c}{n}\boldsymbol{k}_0$$

式中，n 为表征光在介质中传播快慢特性的介质折射率，通常它是光频率的函数 $n(\omega)$，称为色散特性。

（2）光线速度。光线速度 $\boldsymbol{v}_r$ 指的是单色平面光波的能量传播速度。在各向同性介质中，光线速度等于相速度。

2）复色光波的群速度

复色光波的群速度 v_g 表征的是复色光波等振幅面的传播速度，也称为包络速度，其大小为

$$v_g = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k}$$

考虑到介质的色散效应，v_g 与 v 的关系为

$$v_g = \frac{\mathrm{d}(kv)}{\mathrm{d}k} = v + k\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}k}$$

$$v_g = v - \lambda\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}\lambda}$$

$$v_g = v\left(1 + \frac{\lambda}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}\right)$$