

Subwavelength Grating Optics

亚波长光栅光学

赵华君 ○ 著

亚波长光栅光学

Subwavelength Grating Optics

赵华君 ○ 著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本书运用严格耦合波法详细分析光栅的理论与算法,并给出了模态法、传输矩阵法、有效介质理论、LC 电路模型分析法等多种光栅分析与设计的方法,据此分析了亚波长及共振域光栅的衍射特性、偏振特性、分束特性、闪耀特性、电磁增强特性及表面等离子效应等光栅的特性及相关应用,同时还简要介绍了光栅的制造与检定方法。本书对共振域及亚波长光栅的研究、设计、制作和应用具有一定的参考价值。

本书可作为高等学校光学工程、光电信息工程、微电子技术、电子信息科学与技术等相关专业本科高年级学生及硕士研究生的学位课教材和相关选修课教材,并可供从事光学、光电子、微电子、微光机电系统等领域专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

亚波长光栅光学 / 赵华君著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5643-5977-5

I. ①亚… II. ①赵… III. ①光栅 IV. ①O437.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 317642 号

亚波长光栅光学

赵华君

著

策划编辑 秦 薇 祁素玲 胡 军
责任编辑 李芳芳
助理编辑 赵永铭
封面设计 何东琳设计工作室

印张 8.75 字数 115千

成品尺寸 170 mm × 230 mm

版次 2017年12月第1版

印次 2017年12月第1次

印刷 成都蜀通印务有限责任公司

书号 ISBN 978-7-5643-5977-5

出版发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价 48.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

光栅因其功能独特、性能优异，在光学、光电子学等许多领域被广泛应用，成为现代仪器仪表中不可或缺的重要功能器件。近几十年来，国内外出版过较多与光栅相关的书籍，但多数介绍的是传统的光栅，或通常偏重在光栅的某一方面，目前尚没有全面介绍亚波长光栅方面的专门书籍。本书作者将十余年的研究成果编辑成书，并吸收了国内外同行的研究成果，全面介绍了亚波长光栅理论、计算分析方法和相关应用，内容全面系统、新颖和切合实用，反映当前光栅研究最新进展，具有较高的理论意义和工程应用价值。

冯国英

2017年11月
于四川大学

前 言

光栅的应用主要基于光栅的色散、分束、偏振及相位匹配四个基本性质。传统的光栅其尺度通常远大于入射光波长，随着微纳加工技术的不断进步，目前已能够加工尺度远小于入射光波长的亚波长光栅。光栅周期尺度更小的亚波长及共振域光栅由于其优良的光学及电磁学特性，如偏振、分束、表面等离子体效应等，将发挥越来越大的作用。

目前，对亚波长及共振域光栅的相关研究已深入开展，相关理论已日渐成熟，部分相关研究成果已被广泛运用。近几十年来，我国曾出版过不少关于光栅方面的书籍，但多数介绍的是传统的光栅，或通常偏重在光栅的某一方面，目前尚没有全面介绍亚波长及共振域光栅方面的专门书籍。编著一本内容新颖，反映当前光栅研究最新进展，并具有理论意义和工程背景的亚波长及共振域光栅方面的专著就显得尤为重要。本著作主要涵盖亚波长及共振域光栅近年来的研究进展、相关理论与特性、计算分析与设计方法、典型器件设计示例、光栅制造与检定等，该部分内容是近年来学科的研究热点，属于学科的基础与前沿。

本书作者在亚波长及共振域光栅领域进行了多年的研究，已在该领域发表相关专业研究论文几十篇。本书以作者多年相关研究成果为基础，系统总结亚波长及共振域光栅领域的基础理论及分析设计方法，重点介绍了亚波长及共振域光栅的多种设计方法。目前，书中内容在亚波长及共振域

光栅的理论、特性、计算分析、设计及相关器件的设计应用等多个方面国内外未有系统出版，具有一定的学术创新及应用价值。

本书的研究和形成，得到了四川大学冯国英教授、中国科学技术大学明海教授的悉心指导和帮助，也是他们把我引入光栅领域。单位领导、同事，本人家人及西南交通大学出版社工作人员也给予不少帮助，作者在此向他们表示深深的感谢。本书的出版得到了重庆市财政局、重庆市教育委员会及重庆文理学院的资金支持，在此对以上单位给予的支持表示感谢。

由于作者水平及能力所限，书中难免存在问题和不足，恳请读者批评指正。

赵华君

2017年10月

目 录

第 1 章 导 论	1
1.1 光栅分类与特性	1
1.2 衍射光栅	5
1.3 光栅衍射特性	7
1.4 亚波长光栅的研究进展	8
第 2 章 光栅衍射理论与计算方法	12
2.1 光栅理论的发展历史与现状	12
2.2 严格矢量耦合波理论	15
2.3 任意面形光栅计算分析	21
第 3 章 光栅设计方法	30
3.1 模态法	31
3.2 传输矩阵法	42
3.3 有效介质理论及薄膜抗反射设计结合方法	45
3.4 LC 电路模型分析法	55
第 4 章 光栅型光电子器件设计	57
4.1 二元亚波长偏振光栅	57
4.2 亚波长偏振闪耀光栅	59

4.3	金属-非线性介质结构光学双稳器	63
4.4	金属-介质结构气体传感器	69
4.5	偏振调控全光开关	75
第 5 章	异质光波导 SPP 效应及传输特性	83
5.1	金属-介质-金属光波导	85
5.2	介质-金属-介质光波导	91
第 6 章	介质隔层金属光栅局域磁共振场增强特性	101
6.1	磁共振效应	102
6.2	磁共振局域场增强特性	104
第 7 章	光栅制作与检测	108
7.1	光栅制作技术	108
7.2	光栅检测	116
参考文献		121

第 1 章 导 论

最早的光栅是 1821 年由德国科学家 J·夫琅和费用细金属丝密排地绕在两平行细螺丝上制成的，因形如栅栏，故名为“光栅”。光栅其实是由大量等宽等间距的平行狭缝构成，如图 1.1 所示。该示意图为典型矩形狭缝光栅，具有显著的衍射效应，因此光栅也称为“衍射光栅”^[1, 2]。对光栅衍射效应感兴趣的读者可以参阅光栅与光学的相关书籍。

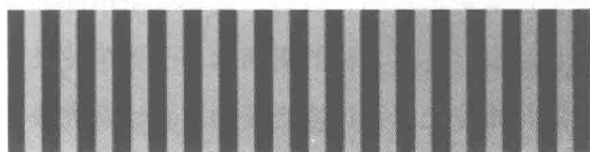


图 1.1 典型狭缝光栅示意图

光栅的应用主要基于光栅的色散、分束、偏振及相位匹配等基本性质，目前已大量用于激光器、光通信、光学检测、集成光路、光学互连、光计算、光学信息处理和光学精密测量控制等方面，成为现代装备、仪器仪表中不可或缺的重要器件。

1.1 光栅分类与特性

光栅的种类繁多，按不同的特性有不同的分类方法。按入射光波长与光栅周期尺度相对关系分为亚波长光栅、共振域光栅及常规光栅。当光栅

周期远小于入射光波长,则称之为亚波长光栅($\Lambda \ll \lambda$),这里 λ 为入射光波长, Λ 为光栅周期;当光栅周期远大于入射光波长,则称为常规光栅($\Lambda \gg \lambda$);而当光栅周期与入射光波长接近($\Lambda \approx \lambda$),则称为共振域光栅。光栅处于共振域通常 $0.2\Lambda < \lambda < 2\Lambda$ 。不同类型的光栅有不同特性,需采用不同的分析计算方法。

按调制方式分为相位光栅和振幅光栅。相位光栅和振幅光栅的称谓来源于经典的标量光栅理论,这种理论认为相位(振幅)光栅对入射光波的作用只表现为对经光栅反射和透射后的光波的相位(振幅)按照光栅的复数反射率和透射率分别加以调制。以现代光栅理论的观点来看,这两个术语的含义是含混不清的,因为真正的光栅既不是纯相位的也不是纯振幅的。不过,这种分类法在历史上曾经起过积极作用,因为旧时的光栅周期长、刻槽浅,标量理论通常是适用的。然而,现代应用中的许多光栅的周期与使用波长在同一数量级,甚至光栅的周期远小于使用波长,标量理论是根本不适用的,因此,相位光栅和振幅光栅的概念也就失去了成立的基础。

按折射率调制位置分为浮雕光栅和体光栅。体光栅是靠光栅材料体内折射率的周期性变化衍射光的,而浮雕光栅靠的是均匀材料的表面轮廓的周期性变化。因为体光栅的折射率调制非常小,而且折射率的分布是连续的,所以相对于浮雕光栅而言,其数学模拟要容易得多,但从使用角度来说,浮雕光栅比体光栅更耐用,更能抵御环境的变化,因而应用更广泛。

亚波长光栅按光栅周期的空间变化可以分为一元、二元、准周期和连续四种结构光栅^[3-5],如图1.2所示。一元光栅其周期的空间变化(光栅矢量)只有一个方向,如图1.2(a)所示,光栅周期为小于入射光波长($\Lambda < \lambda$)的亚波长结构。二元光栅在一个周期 $d(d > \lambda)$ 内包含了两个刻槽方向互相垂直的一元亚波长周期结构,如图1.2(b)所示,空间变化周期 d 大于入射光波长 λ ,即 $d > \lambda$ 。准周期结构光栅在一个周期 $d(d > \lambda)$ 内包含多个刻

槽方向离散变化的一元亚波长周期结构,如图 1.2 (c) 所示。连续结构光栅其光栅矢量在一个周期内 $d(d > \lambda)$ 连续变化,如图 1.2 (d) 所示。光栅的这种特殊结构可以对光波偏振态进行周期性调制,并实现偏振光的控制。

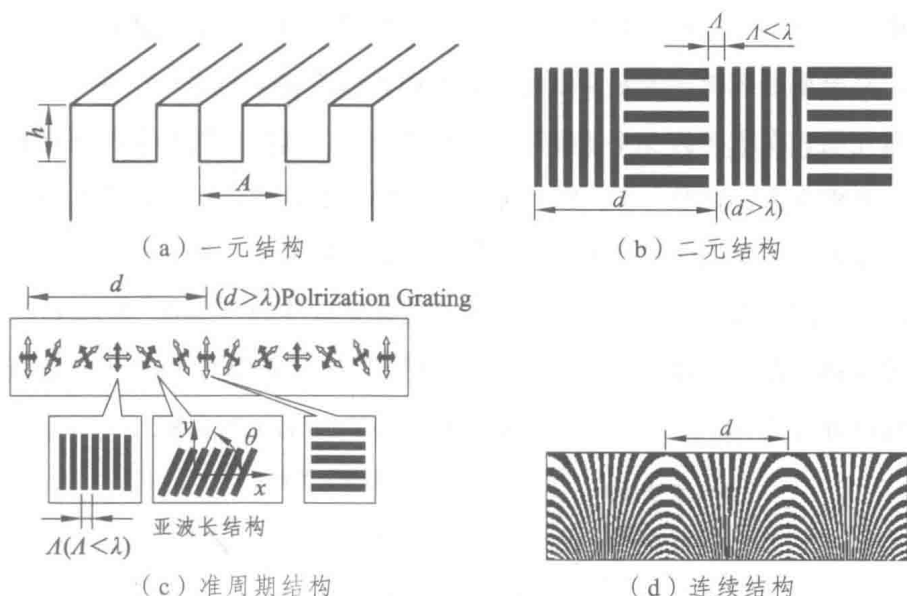


图 1.2 不同光栅周期结构示意图

按光栅材料分为金属光栅和介质光栅;按使用衍射光的方向分为透射光栅和反射光栅;按光栅周期性分为周期光栅和准周期光栅;按面形分为平面光栅和凹面光栅;按槽形分为三角形光栅、正弦光栅、矩形光栅、阶梯光栅等;按制作方法分为机刻光栅、全息光栅、全息-离子蚀刻光栅、母光栅、复制光栅等;按使用波长分为红外光栅、可见光栅、X 射线光栅;按应用领域分为光谱光栅、测量光栅、脉冲压缩光栅、激光光栅等,可以说是不胜枚举。

从 1888 年 Heinrich Hertz^[6]首次使用金属丝制作的光栅测量无线电波至今,人们就对金属光栅具有偏振特性的认识已有 100 多年。当金属光栅的周期小于入射光波长时,将表现出偏振特性。金属光栅结构具有偏振性

能的原因在于垂直于光栅矢量的 s 偏振 (TE 偏振) 和平行于光栅矢量的 p 偏振 (TM 偏振) 偏振光的边界条件不同, 其等效折射率也不同。图 1.3 为矩形金属偏振光栅的结构示意图, s 偏振入射光激发金属线的电子而产生电流, 使得该方向的偏振光反射, 而 p 偏振入射光由于该方向上有空气间隙将金属线隔离而无法引发电流, 此时光波会透射过去^[7]。不同种类的金属光栅具有不同的 TM 偏振透射率和消光比, 选择合适的金属是首要问题。张娜等人^[8]对铝、铬、银、金、铜五种金属光栅在相同光栅参数下的 TM 偏振透射率和消光比进行了研究, 通过比较得出, 铝、铬、银三种金属的特性曲线有一定规律, 其中铝的性能又是最佳的。张亮^[7]等对 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性进行了研究, 发现光栅对 1 000~2 000 nm 的近红外光的 TE 波完全反射, 对 TM 波具有 90% 的透过率。

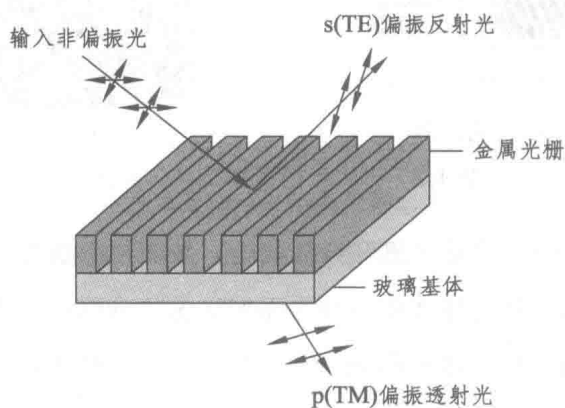


图 1.3 矩形金属偏振光栅结构图

介质偏振光栅的研究相对金属偏振光栅更为广泛。介质偏振光栅的偏振特性主要在于均匀介质表面的加工所形成的结构双折射^[9], 从而产生偏振效应。介质偏振光栅拥有优良的偏振特性, 具有广泛的应用前景。傅克祥、王植恒等人^[10]研究了亚波长光栅的抗反射特性, 并分析了光栅的结构参数 (光栅深度、基底厚度、占空比等) 对反射率的影响, 发现光栅基底

厚度对反射率有巨大影响。鲁建业等人^[11]对二元位相型光栅分束器的设计提出了改进方法,改进方法中考虑了入射光参数的影响,使设计结果与实际结果更符合。傅克祥等人^[12]分析了亚波长表面正弦介质光栅的高反射特性,发现表面正弦光栅具有全反射的特性,能够在较宽的带宽范围内实现99.9%的高反射,另外他们还对亚波长正弦介质光栅用于设计 $1/4$ 波片进行了研究^[13],发现在一定精度范围内TE波与TM波的相位差能够在一段较大的槽深区域满足设计要求,从而降低了实际制作光栅的难度。长春光学精密机械与物理研究所的曹召良等人^[14]对亚波长介质光栅的制作误差进行了分析,并采用硅刻蚀的等离子体辅助刻蚀系统制作了红外 $30\text{ }\mu\text{m}$ 亚波长抗反射光栅。国内对亚波长光栅的研究主要集中在一元和二元结构,而对连续结构的亚波长光栅的研究相对较少。

1.2 衍射光栅

理想的衍射光栅可以认为由一组等间距的无限长无限窄狭缝组成,狭缝之间的间距为 d ,称为光栅常数。波在传播时,波阵面上的每个点都可以被认为是一个单独的次波源;这些次波源再发出球面次波,根据惠更斯原理以后某时刻的波阵面,就是该时刻这些球面次波的包迹面。当波长为 λ 的平面波垂直入射于光栅时,每条狭缝上的点都扮演了次波源的角色;从次波源发出的光线沿球面方向传播(即球面波)。由于狭缝为无限长,则在该平面上沿某一特定方向的光场是由从每条狭缝出射的光相干叠加而成。在发生干涉时,由于从每条狭缝出射的光的在干涉点的相位都不同,它们之间会部分或全部抵消。然而,当从相邻两条狭缝出射的光线到达干涉点的光程差是光的波长的整数倍时,两束光线相位相同,就会发生干涉加强现象。这种现象可以表示为

$$d \sin \theta = k \lambda \quad (1.1)$$

这里 d 为狭缝间距, θ 为衍射角, k 为整数, 取值为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。该方程即为著名的光栅方程, 可用于计算、表征光栅的衍射特性。光栅衍射过程如图 1.4 所示。当满足式 (1.1), 衍射光将在衍射角为 θ 时取得极大, 可见, 光栅是利用多缝衍射原理使光发生色散的光学元件。

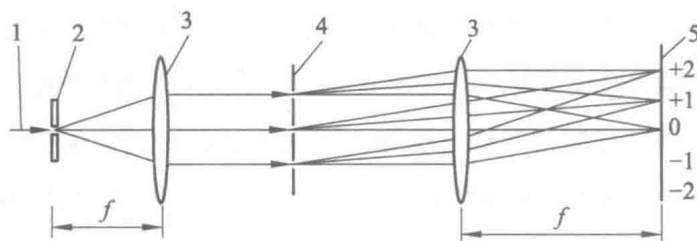


图 1.4 光栅衍射过程示意图

1—光源；2—狭缝；3—凸透镜；4—平面透射光栅；5—光栅衍射光谱

通常光栅是一块刻有大量平行等宽、等距狭缝（刻线）的平面玻璃或金属片。光栅的狭缝数量很大，一般每毫米几十至几千条。单色平行光通过光栅每个缝的衍射和各缝间的干涉，形成暗条纹很宽、明条纹很细的图样，这些锐细而明亮的条纹称作谱线。谱线的位置随波长而异，当复色光通过光栅后，不同波长的谱线在不同的位置出现而形成光谱，如图 1.5 所示。

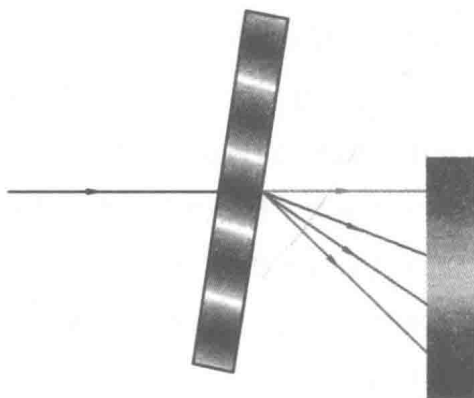


图 1.5 光栅衍射光谱示意图

1.3 光栅衍射特性

衍射光栅是利用多缝衍射原理,使入射光发生色散的光学元件。光通过光栅形成光谱是单缝衍射和多缝干涉的共同结果。光栅衍射计算公式采用 $d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = k\lambda$ 表示,其中 d 是光栅常数、 α 是入射角、 β 是衍射角、 k 是衍射级次、 λ 是衍射波长;式中取“+”表示为透射光栅,取“-”表示为反射光栅;式中 k 可取 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 相应得到的光谱称零级光谱、正(负)一级光谱、正(负)二级光谱、……,“正”表示入射角和衍射角在法线的同侧,“负”则表示为异侧,光栅衍射示意图如图 1.6 所示。入射光垂直入射时 $\alpha=0$, 此时光栅方程可以简化为 $d \sin \beta = k\lambda$, 即为上述光栅方程 (1.1)。光栅产生的衍射条纹具有强度大、条纹窄、彼此间隔宽的特点,有极好的分辨性能。光栅方程表明不同波长的同级主极大出现在不同方位,长波的衍射角较大,短波的衍射角小;对入射单色光的某级谱线的位置由光栅常数和入射角决定,与光栅刻槽形状无关。因此利用光栅衍射效应可以精确地测定波长。衍射光栅的分辨本领为 $R = kN$ 。其中 k 为谱线的级数, N 为狭缝数,狭缝数越多明条纹越亮、越细,光栅分辨本领就越高。

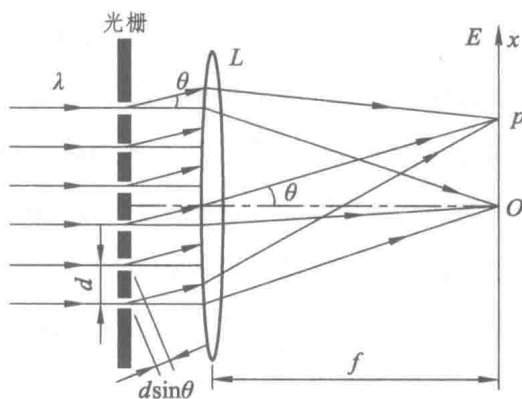


图 1.6 光栅衍射示意图

1.4 亚波长光栅的研究进展

在过去的几十年中,以法国、美国为代表的少数几个发达国家对光栅理论、光栅分析与应用进行了详尽的研究,并取得了大量的成果。20 世纪 60 年代由法国科学家 Marechal 和 Petit 等人创立了严格光栅理论,并发展了积分法^[15]和微分法^[16]两种光栅计算方法。70 年到 90 年代初涌现出了模态法^[17]、严格矢量耦合波理论(RCWA)^[18,19]和杨-顾(Y-G)算法^[20]等大量的光栅理论。90 年代初以来,研究重点转向改善现有算法的数值稳定性和收敛性,清华大学李立峰教授对该次转向作出了重要贡献^[17,21,22]。在偏振光栅的研究方面,Torodov 等人最早研究了全息相位偏振光栅的衍射效率与偏振态之间的依赖关系^[23],P. Pellat-Finet 等人研究了正弦光栅的偏振特性及衍射效率^[24],随后 Gori 通过研究提出正弦偏振光栅可以将任意偏振态的单色平面波分解成具有三种偏振态的子光波^[25],可用于测量斯托克斯(Stokes)参量,他的研究成果开启了偏振光栅研究的大门,具有里程碑意义。从此光栅科研人员对偏振光栅产生了浓厚兴趣,并开展了大量研究。近期研究人员逐步将研究转入对光栅的设计与应用方面,如重庆文理学院赵华君等人^[26-40],该课题组主要围绕亚波长光栅的设计与应用开展了卓有成效的研究。同时,Bomzon 等人研究了偏振光栅用于光偏振态的实时分析^[41],Cincotti 对偏振光栅应用于光开关与偏振模补偿进行了初步探索^[42],Lajunen 等人研究了基于偏振光栅的高效宽带衍射光学元件^[43],上海光学精密研究所周常河研究员和学生共同发明了圆环达曼光栅、深刻蚀偏振分束光栅、双倍密度光栅飞秒压缩等一系列新技术、新方法,产生了重要影响^[44-46]。

在偏振光栅的加工方面,有多种方法可以用于制作偏振光栅,Bomzon 等人报道了采用光刻的方法制作亚波长光栅的方法^[47,48],B.Wen 等人采用液晶显示技术成功研制出了偏振光栅^[49]。另外采用计算全息方法加工偏振

光栅的方法也有所报道^[50]。

就偏振光栅研究方面而言,20世纪80年代Nevdakh等人^[51]通过实验的方法对光栅的偏振特性进行了早期的研究,同时Flanders^[52]和Enger^[53]等人分别通过X射线光刻和全息方法制作了1/4波片光栅。随后,Finet等人^[54]研究了正弦光栅的偏振特性及衍射效率,指出光栅周期小于入射波波长的亚波长正弦光栅具有优良的偏振特性。Torodov等人^[55]研究了全息相位偏振光栅的衍射效率与偏振态之间的依赖关系。Gori^[56]和Tervo^[57]等人通过研究提出连续亚波长偏振光栅可以将任意偏振态的单色平面波分解成具有三种偏振态的子光波,可以获得近100%的衍射效率,不但可用于设计偏振光分束器,还可用于测量光束的斯托克斯(Stokes)参量。

近些年,科研人员逐步将研究重点转向偏振光栅的设计与应用方面。Bomzon等人对偏振光栅用于偏振态的实时分析进行了研究,发现通过亚波长偏振光栅并分析光束的斯托克斯参量可以实时分析光束的偏振态,同时他们还对基于亚波长偏振光栅的偏振光分束器进行了理论分析和实验研究^[58],并采用计算全息图光刻术方法分别制作了金属和介质偏振光栅,研究发现基于计算全息图光刻术法制作的光栅精度更高及特性更优良,如图1.7所示。Cincotti^[59]对偏振光栅应用于光开关与偏振模色散测量进行了初步研究;Lajunen^[60]等人研究了基于偏振光栅的高效宽带衍射光学元件,发现偏振光栅在较宽频带范围内均可获得接近100%衍射效率。另外,Dahan等人^[61]使用偏振光栅成功实现了热像编码,如图1.8所示。他们的研究进一步拓展了偏振光栅的应用领域。在偏振光栅的加工方面,有多种方法可以用于制作偏振光栅,Bomzon和Zeitner^[62]等人报道了采用光刻的方法制作亚波长光栅的方法,Wen^[63]等人采用液晶成功研制出了偏振光栅,另外采用计算全息的方法加工偏振光栅的方法也有所报道。另外,光栅在高强度激光加工方面也有较好的应用^[64]。