

二元光学

发布日期:2007-09-13 我也要投稿! 作者:COEMA (光电学堂 <http://coema.org.cn/study>)

二元光学是基于光波衍射理论发展起来的一个新兴光学分支,是光学与微电子技术相互渗透、交叉而形成的前沿学科。基于计算机辅助设计和微米级加工技术制成的平面浮雕型二元光学器件具有重量轻、易复制、造价低等特点,并能实现传统光学难以完成的微小、阵列、集成及任意波面变换等新功能,从而使光学工程与技术在诸如空间技术、激光加工、计算技术与信息处理、光纤通信及生物医学等现代国防科技与工业的众多领域中显示出前所未有的重要作用及广阔的应用前景。二元光学于20世纪90年代初在国际上兴起研究热潮,并同时引起学术界与工业界的极大兴趣及青睐。

随着近代光学和光电子技术的迅速发展,光电子仪器及其元件都发生了深刻而巨大的变化。光学零件已经不仅仅是折射透镜、棱镜和反射镜。诸如微透镜阵列、全息透镜、衍射光学元件和梯度折射率透镜等新型光学元件也越来越多地应用在各种光电子仪器中,使光电子仪器及其零部件更加小型化、阵列化和集成化。微光学元件是制造小型光电子系统的关键元件,它具有体积小、重量轻、造价低等优点,并且能够实现普通光学元件难以实现的微小、阵列、集成、成像和波面转换等新功能。

光学是一门古老的科学。自伽利略发明望远镜以来,光学已走过下几百年的漫长道路。60年代激光的出现,促进了光学技术的迅速发展,但基于折反射原理的传统光学元件,如透镜、棱镜等人都是以机械的铣、磨、抛光等来制作的,不仅制造工艺复杂,而且元件尺寸大、重量大。在当前仪器走向光、机、电集成的趋势中,它们已显得臃肿粗大极不匹配。研制小型、高效、阵列化光学元件已是光学界刻不容缓的任务。80年代中期,美国MIT林肯实验室威尔得坎普(Veldkamp)领导的研究组在设计新型传感系统中,率先提出了“二元光学”的概念,他当时描述道:“现在光学有一个分支,它几乎完全不同于传统的制作方式,这就是衍射光学,其光学元件的表面带有浮雕结构;由于使用了本来是制作集成电路的生产方法,所用的掩模是二元的,且掩模用二元编码形式进行分层,故引出了二元光学的概念。”随后二元光学不仅作为一门技术,而且作为一门学科迅速地受到学术界和工业界的青睐,在国际上掀起了一股二元光学的研究热潮。

二元光学元件因其其在实现光波变换上所具有的许多卓越的、传统光学难以具备的功能,而有利于促进光学系统实现微型化、阵列化和集成化,开辟了光学领域的新视野。关于二元光学概念的准确定义,至今光学界还没有统一的看法,但普遍认为,二元光学是指基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计,并用超大规模集成(VLSI)电路制作工艺,在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生两个或多个台阶深度的浮雕结构,形成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件。它是光学与微电子学相互渗透与交叉的前沿学科。二元光学不仅在变革常规光学元件,变革传统光学技术上具有创新意义,而且能够实现传统光学许多难以达到的目的和功能,因而被誉为“90年代的光学”。它的出现将给传统光学设计理论及加工工艺带来一次革命。二元光学元件源于全息光学元件(HOE)特别是计算全息元件(CGH)。可以认为相息图(Kinoform)就是早期的二元光学元件。但是全息元件效率低,且离轴再现;相息图虽同轴再现。但工艺长期未能解决,因此进展缓慢、实用受限。二元光学技术则同时解决了衍射元件的效率和加工问题。它以多阶相位结构近似相息图的连续浮雕结构。二元光学是微光学中的一个重要分支。微光学是研究微米、纳米级尺寸的光学元器件的设计、制作工艺及利用这类元器件实现光波的发射、传输、变换及接收的理论和技术的新技术。

微光学发展的两个主要分支是:

- (1)基于折射原理的梯度折射率光学,
- (2)基于衍射原理的二元光学。

二者在器件性能、工艺制作等方面各具特色。二元光学是微光学领域中最具活力、最有发展潜力的前沿学科分支。光学和电子学的发展都基于微细加工的两个关键技术:亚微米光刻和各向异性刻蚀技术。微电子学推动了二元光学学科的发展,而微电子工业的进步则得益于光刻水平的提高。此外,二元光学技术的发展又将促进微电子技术

的发展与提高。例如，目前在大规模集成电路的制作中所采用的移相模版和在制作光纤光栅中所用的相位模版也都是建立在二元光学的基础上的。二元光学技术一经提出就吸引了一些技术发达国家的注目，引起了各研究机构、大学及工业界的极大兴趣，并被 MIT 林肯实验室称为振兴和发展美国光学工业的主要希望，可见其在整个光学领域的意义。二元光学能获得如此迅速的发展，除由于具有体积小、重量轻、容易复制等显而易见的优点外，还由于具有如下许多独特的功能和特点。

一、高衍射效率二元光学元件是一种纯相位衍射光学元件，为得到高衍射效率，可做成多相位阶数的浮雕结构。一般使用 N 块模版可得到 $L(=2N)$ 个相位阶数，其衍射效率为： $\eta = |\sin(\pi/L)|^2$ 。由此计算，当 $L=2、4、8$ 和 16 时，分别有 $V=40.5\%、81\%、94.9\%$ 和 98.6% 。利用亚波长微结构及连续相位面形，可达到接近 100% 的效率。

二、独特的色散性能在一般情况下，二元光学元件多在单色光下使用。但正因它是一个色散元件，具有不同于常规元件的色散特性，故可在折射光学系统中同时校正球差与色差，构成混合光学系统，以常规折射元件的曲面提供大部分的聚焦功能，再利用表面上的浮雕相位波带结构校正像差。这一方法已用于新的非球面设计和温度补偿等技术中。

三、更多的设计自由度在传统的折射光学系统或镜头设计中只能通过改变曲面的曲率或使用不同的光学材料校正像差，而在二元光学元件中，则可通过波带片的位置、槽宽与槽深及槽形结构的改变产生任意波面，大大增加了设计变量，从而能设计出许多传统光学所不能的全新功能光学元件，这是对光学设计的一次新的变革。

四、宽广的材料可选性二元光学元件是将二元浮雕面形转移至玻璃、电介质或金属基底上，可用材料范围大；此外，在光电系统材料的选取中，一些红外材料如 $ZnSe$ 和 Si 等，由于它们有一些不理想的光学特性，故经常被限制使用，而二元光学技术则可利用它们并在相当宽广的波段作到消色差；另外，在远紫外应用中，可使有用的光学成像波段展宽 1000 倍。

五、特殊的光学功能二元光学元件可产生一般传统光学元件所不能实现的光学波面，如非球面、环状面、锥面和镯面等，并可集成得到多功能元件；使用亚波长结构还可得到宽带、大视场、消反射和偏振等特性；此外，二元光学在促进小型化、阵列化、集成化方面更是不言而喻了。国内外研究概况 80 年代中期，美国国防部领先科研项目处(DARPA)对 MIT 林肯实验室资助了名为“二元光学”的项目，其研究目标为：

(1)发展一种基于微电子制作工艺的光学技术，用以节约资金和劳动力，获取在设计和材料选择上更多的自由度，并开发新的光学功能元件；

(2)推动光电系统整体的计算机辅助设计；

(3)在美国工业界广泛应用衍射光学技术。

进入 90 年代，随着微细加工技术的发展，以及为了得到高衍射效率的二元光学元件，其浮雕结构从两个台阶发展到多个台阶，直至近似连续分布，但由于其主要的制作方法仍基于表面分步成形技术，每次刻蚀可得到二倍的相位阶数，故仍称其为二元光学，而且往往就称为衍射光学。在国内，许多单位都开展了二元光学研究。鉴于二元光学的潜在价值和国际上的研究状况，国内一些有影响的光学专家 90 年代初就向国家自然科学基金委员会建议开展这方面的研究。纵观国内外研究现状，目前二元光学研究重担集中在三个领域：超精细衍射结构的分析理论与设计；激光束或电子束直写技术及高分辨率刻蚀技术；二元光学元件在国防、工业及消费领域的应用。其中二元光学的 CAD、掩模技术、刻蚀技术和 LIGA(同步辐射光成形)技术是核心技术。

主要进展

经过近 10 年的研究，二元光学已经在设计理论、制作工艺和应用等方面取得了突破性的进展。

一、设计理论方面的进展

二元光学元件的设计问题十分类似于光学变换系统中的相位恢复问题：已知成像系统中入射场和输出平面上光场分布，如何计算输入平面上相位调制元件的相位分布，使得它正确地调制入射波场，高精度地给出预期输出图样，实现所需功能。近几年来，随着制作工艺水平的发展和衍射元件应用领域的扩展，二元光学元件特征尺寸

进一步缩小，其设计理论已逐渐从标量衍射理论向矢量衍射理论发展。通常情况下，当二元光学元件的衍射特征尺寸大于光波波长时，可以采用标量衍射理论进行设计。计算全息就是利用光的标量衍射理论和傅里叶光学进行分析的，关于二元光学元件衍射效率与相位阶数之间的数学表达式也是标量衍射理论的结果。在此范围内，可将二元光学元件的设计看作是一个逆衍射问题，即由给定的入射光场和所要求的出射光场求衍射屏的透过率函数。基于这一思想的优化设计方法大致有五种：盖师贝格—撒克斯通(Gerchberg-Saxton)算法(GS)或误差减法(ER)及其修正算法、直接二元搜索法(DBS 也称爬山法(HC))、模拟退火算法(SA)和遗传算法(GA)。其中模拟退火算法是一种适合解决大规模组合优化问题的方法，它具有描述简单、使用灵活、应用广泛、运行效率高和较少受初始条件限制等优点；遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应搜索算法，它将适者生存原理同基因交换机制结合起来，形成一种具有独特优化机制的搜索技术，而且特别适用于并行运算，已被应用到诸多领域。在国内，中国科学院物理研究所杨国桢和顾本源提出任意线性变换系统中振幅—相位恢复的一般理论和杨—顾(Y-G)算法，并且成功地应用于解决多种实际问题 and 变换系统中。在许多应用场合中，二元光学元件的特征尺寸为波长量级或亚波长量级，刻蚀深度也较大(达到几个波长量级)，标量衍射理论中的假设和近似便不再成立，此时，光波的偏振性质和不同偏振光之间的相互作用对光的衍射结果起着重大作用，必须发展严格的矢量衍射理论及其设计方法。矢量衍射理论基于电磁场理论，须在适当的边界条件上严格地求解麦克斯韦方程组，已经发展几种有关的设计理论，如积分法、微分法、模态法和耦合波法。前两种方法虽然可以得到精确的结果，但是很难理解和实现，并需要复杂的数值计算；比较起来，模态法和耦合波法的数学过程相对简单些，实现也较容易。这两种方法都是在相位调制区将电磁场展开，所不同的是它们的展开形式，模态法将电磁场按模式展开，而耦合波法则将电磁场按衍射级次展开。因而，耦合波方法涉及到的数学理论较为简单，给出的是可观察的衍射各级次的系数，而不是电磁场模式系数。但总的来说，用这些理论方法设计二元光学元件都要进行复杂和费时的计算机运算，而且仅适合于周期性的衍射元件结构。因此，当衍射结构的横向特征尺寸大于光波波长时，光波的偏振属性变得不那么重要了，仍可采用传统的标量衍射理论得到一些合理的结果。对于更复杂的衍射结构，还有待发展实用而有效的设计理论。

二、制作工艺方面的进展

二元光学元件的基本制作工艺是超大规模集成电路中的微电子加工技术。但是，微电子加工属薄膜图形加工，主要需控制的是二维的薄膜图形；而二元光学元件则是一种表面三维浮雕结构，需要同时控制平面图形的精细尺寸和纵向深度，其加工难度更大。近几年来，在 VLSI 加工技术、电子、离子刻蚀技术发展的推动下，二元光学制作工艺方面取得的进展集中表现在：从二值化相位元件向多阶相位元件、甚至连续分布相位元件发展；从掩模套刻技术向无掩模直写技术发展。最早的二元光学制作工艺是用图形发生器和 VLSI 技术制作二阶相位型衍射光学元件。到 80 年代后期，随着高分辨率掩模版制作技术的发展(如电子束制版分辨率可达到 $0.1\mu\text{m}$)，掩模套刻、多次沉积薄膜的对中精度的提高，可以制作多阶相位二元光学元件，大大提高了衍射效率。但是离散化的相位以及掩模的对准误差，仍影响二元光学元件的制作精度和衍射效率的提高。为此，90 年代初开始研究直写技术，省去掩模制作工序，直接利用激光和电子束在基底材料上写入所需的二维或三维浮雕图案。利用这种直写技术，通过控制电子束在不同位置处的曝光量，或调制激光束强度，可以刻蚀多阶相位乃至连续分布的表面浮雕结构。无掩模直写技术较适于制作单件的二元或多阶相位元件，或简单的连续轮廓，而利用激光掩模和套刻制作更适合于复杂轮廓和成批生产。在掩模图案的刻蚀技术中，目前主要采用高分辨率的反应离子刻蚀、薄膜沉积技术。其中离子束刻蚀的分辨率高达 $0.1\mu\text{m}$ ，且图案边缘陡直准确，是一种较为理想的加工手段。二元光学元件的一个很大的优点是便于复制，常用的复制技术有：铸造法(casting)、模压法(embossing)和注入模压法(injection molding)。其中电铸成型模压复制将是未来大规模生产的主要技术。根据二元光学元件的特点，其他一些新工艺，例如 LIGA、溶胶—凝胶(sol-gel)、热溶及离子扩散等技术也被应用于加工二元光学元件，还可利用灰阶掩模及 PMMA 紫外感光胶制作连续相位器件。

三、应用方面的进展

随着二元光学技术的发展,二元光学元件已广泛用于光学传感、光通信、光计算、数据存储、激光医学、娱乐消费以及其他特殊的系统中。也许可以说,它的发展已经经历了三代。第一代,人们采用二元光学技术来改进传统的折射光学元件,以提高它们的常规性能,并实现普通光学元件无法实现的特殊功能。这类元件主要用于相差校正和消色差。通常是在球面折射透镜的一个面上刻蚀衍射图案,实现折/衍复合消像差和较宽波段上的消色差。如美国珀金—埃尔马(Perkin—Elmer)公司成功地用于施密特(Schmidt)望远镜上消除球差;美国豪奈威尔(Honey-well)公司在远红外系统中,实现了复消色差,它们还采用二元光学技术制作出小型光盘读写头。此外,二元光学元件能产生任意波面以实现许多特殊功能,而具有重要的应用价值。如材料加工和表面热处理中的光束整形元件、医疗仪器中的 He-Ne 激光聚焦校正器、光学并行处理系统中的光互连元件(等光强分束 Dammann 光栅)以及辐射聚焦器等。

二元光学元件的第一代应用技术已趋于成熟,国际上有 50 多家公司正利用混合型特殊功能元件设计新型光学系统。

第二代,主要应用于微光学元件和微光学阵列。80 年代末,二元光学进入微光学领域,向微型化、阵列化发展,元件大小从十几个 μm 至 1mm。用二元光学方法制作的高密度微透镜阵列的衍射效率很高,且可实现衍射受限成像。另外,当刻蚀深度超过几个波长时,微透镜阵列表现出普通的折射元件特性,并具有独特的优点:阵列结构比较灵活,可以是矩阵、圆形或密排六方形排列;能产生各种轮廓形状的透镜表面,如抛物面、椭圆面及合成表面等;阵列透镜的“死区”可降到零(即填充因子达到 100%)。这类高质量的衍射或折射微透镜阵列,在光通信、光学信息处理、光存储和激光束扫描等许多领域中有重要的应用。比如二元微光学元件在多通道微型传感系统中可作为望远混合光学系统、光束灵巧控制、多通道处理、探测器阵列和自适应光互连。第三代,即目前正在发展的一代,二元光学瞄准了多层或三维集成微光学,在成像和复杂的光互连中进行光束变换和控制。多层微光学能够将光的变换、探测和处理集成在一体,构成一种多功能的集成化光电处理器,这一进展将使一种能按不同光强进行适应性调整、探测出目标的运动并自动确定目标在背景中的位置的图像传感器成为可能。Veldkamp 将这种新的二元光学技术与量子阱激光阵列或 SEED 器件、CMOS 模拟电子技术结合在一起,提出了“无长突神经细胞电子装置(Amacronic)”的设想,它把焦平面结构和局域处理单元耦合在一起,以模仿视网膜上无长突神经细胞的近距离探测,系统具有边缘增强、动态范围压缩和神经网络等功能。这一代微光学技术的典型应用是多层光电网络处理器。这是一种焦平面预处理技术,它以二元光学元件提供灵活反馈和非线性预处理能力。探测器硅基片上的微透镜阵列将入射信号光聚焦到阵列探测器的激活区,该基片的集成电路则利用会聚光激发砷化镓镉二极管发光,其发射光波第二层平面石英基底两面的衍射元件引导到第三层面硅基底的阵列探测器上,经集成电路处理后激发二极管发光……依次类推,得到处理后的信号。这种多层焦平面预处理器的每一层之间则利用微光学阵列实现互连耦合,它为传感器的微型化、集成化和智能化开辟了新的途径。发展趋势 二元光学是建立在衍射理论、计算机辅助设计和微细加工技术基础上的光学领域的前沿科学之一,超精细结构衍射元件的设计与加工是发展二元光学的关键技术。二元光学的发展不仅使光学系统的设计和加工工艺发生深刻的变革,而且其总体发展趋势是未来微光学、微电子学和微机械的集成技术和高性能的集成系统。

今后二元光学元件的研究将可能在以下方面发展。

一、具有亚波长结构的二元光学元件的研究(包括设计理论与制作技术) 这类元件的特征尺寸比波长还要小,其反射率、透射率、偏振特性和光谱特性等都显示出与常规二元光学元件截然不同的特征,因而具有许多独特的应用潜力,如可以作为抗反射元件、偏振元件、窄带滤波器和相位板。研究重点包括:建立正确和有效的理论模型设计超精细结构衍射元件;特殊波面变换的算法研究;发展波前工程学,以制作逼近临界尺寸的微小元件及开拓亚波长结构衍射元件的应用,推动微光学的发展。

二、二元光学的 CAD 软件包的开发至今尚未找到适合于不同浮雕衍射结构的简单而有效的理论模型，二元光学元件的设计仍缺乏像普通光学设计程序那样，可以求出任意面形、传递函数及系统像差、具有友好界面的通用软件包。但随着通用设计工具的发展，二元光学元件有可能成为通用的标准光学元件，而得到广泛的应用，并与常规光学结合，形成一代崭新的光学系统。

三、微型光机电集成系统是二元光学研究的总趋势微光电机机械系统微光机械微电子机械微机械 1991 年，美国国家关键技术委员会向美国总统提交了《美国国家关键技术》报告，其中第 8 项为“微米级和纳米级制造”，即微工程技术，它主要包括微电子学、微机械学和微光学这三个相互关联相互促进的学科，是发展新一代计算机、先进机器人及智能化系统，促进机械、电子及仪器仪表工业实现集成化、微型化的核心技术。二元光学技术则是发展微光学的重要支柱，二元光学元件有可能直接刻蚀在集成电路芯片上，并在一块芯片上布置微光学阵列，甚至完全集成化的光电处理单元，这将导致包含各种全新的超密集传感系统的产生。

微光电子学微光学微电子学图示描述了微工程技术的三个学科相互交*相互影响形成的交*学科。在微光学取得令人瞩目的进展的同时，另一门前沿科学——微电子机械(MEM)学取得了飞速的发展，这种结合三维集成电路处理技术的微机械方法已成功地用于改善传感器和执行器的性能，降低费用。基于这种新技术设计的微传感器和微机械执行器，至少在一个维数上的尺寸已达到微米量级，其他维数也小于几个毫米，对军用、工业和消费产品都有潜在的应用市场。MEM 和微光学技术的共同特征是它们都基于 VLSI 技术，两者的结合就能产生一个新的、更宽广的微光电机机械系统，它已经在激光扫描、光学开关、动态微透镜和集成光电—机电装置等方面显示出诱人的前景和产品市场，并将进一步开拓到微分光仪、微干涉仪和小型在线机械检测系统等领域。在微机械、微电子支撑下的微光学系统也更易商品化，从而形成二元光学产业。具有多层结构的 Amacronic 焦平面预处理器是微光学、微电子学和微机械集成系统的典型应用，它以并行光学处理方式降低了对电子处理速度和带宽的要求，增强了集成系统的处理能力和灵活性。多层微光电机机械装置的进一步发展甚至可以模仿生物视觉原理，这个方向的研究成果对于人类将有无法估量的意义。可以预见，光学工程师们能像今天的电子工程师们一样，坐在计算机终端前，通过按动鼠标或敲击键盘来设计组合二元光学元件以及各种光机电组合系统，这一天的到来为时不会太久。