

非球面光学加工

——日益增长的需求和面临的工艺挑战

●张云庆

1 概 述

非球面光学在应用方面有诸多优点,例如可校正高分辨率透镜的像差,实现大视场和建立体积小且重量轻的光学系统。另外,在一些特殊应用场合,非球面光学能发挥作用,如透镜系统的全开孔径真实不晕成像或为眼镜设计递增型镜片。

自 1638 年 Descartes 提出用非球面实现无像差成像以来,该工业领域的科研人员就一直在考虑用何种方法完成这种非球面的加工。目前,基于不同技术的各种工艺已广泛应用于非球面光学加工。由于个体生产厂商的战略独立性和加工技术的多样性,故难以用详细的文字阐述和分析这些加工工艺,但人们还是能从已出版的几本专著中获得有关对非球面加工技术的描述,例如 Heynacher 先生的《非球面加工与技术要求》;Sanger 先生的《非球面的加工与检验》;Pollicove 先生的《新一代光学加工技术》;Fähnle 先生的《材料去除工艺及成形方法》;Corbett 先生的《超精密机械加工与纳米技术加工》。

通过分析卡尔蔡司公司的非球面光学加工工艺、技术要求及其应用,本文描述了现行非球面加工的潜在技术和所面临的挑战,同时对下列工业发展的必要性做以重点介绍。

●针对某一专题(如光刻和空间光学)开展国际间的合作,联合攻关;

●创建新的理念,目标是扩大现有加工能力和提高生产效率;

●发明新技术,有效降低非球面的加工成本。

如果采纳上述观点,非球面光学元件的加工成本将会得到进一步降低,会使更多的非球面光学产品用以代替球面光学产品,使光学系统在质量方面得到显著提高,从而扩大非球面市场的需求并推动应用技术向降低非球面成本和提高生产率的方向发展,同时还会有效地建立适应光学工业要求的可持续自我完善规程。

2 非球面光学的加工

100 多年来,光学加工方法基本上没有实质性变化,常规方法都是采用廉价的且要求熟练技工的劳动密集型机械加工方式,但随着计算机数控机床加工技术的发展,这种具有较高生产效率和较快加工速度的非劳动密集型加工方法在批量生产中凸显优势。目前,用于非球面光学加工的各种工艺和技术变化很大,可根据用户的不同需求而定。

2.1 用户需求

如表 1 所述,产品和用户需求包括具体精度要求、数量和价格,这些要求视非球面产品的最终用途而定。

用户对非球面光学产品表面粗糙度的要求要视产品的用途而定,在现有的一些非球面产品类型中可实现 4 个以上的粗糙度等级。此外,相机和紫外系统

表 1 根据不同的用户对非球面光学产品提出的要求(每种用途的详细说明参见表 2)

应用范围	数量(件)	质量(表面粗糙度, nm rms)	价格
光刻光学产品	100	超高精度, 表面粗糙度 $\ll 100\text{nm}$	极高
天文/空间光学产品	10	高精度, 表面粗糙度 $< 100\text{nm}$	很高
高端光学产品	10000	高/中精度, 表面粗糙度 $\approx 20\sim 500\text{nm}$	高~很高
消费类产品	> 10000	低~中, 表面粗糙度 $> 500\text{nm}$	低
微光学/混合光学产品		低~高	低~高

用反射镜这样的高端产品所要求的表面粗糙度是不同的, 这两项应用中的产品最终表面粗糙度的精度可分为三个等级。需要指出的是, 随着对光刻产品精度要求的提高, 表面粗糙度测量指标被进一步分为中空间频率范围(MSFR)、高空间频率范围(HSFR)和扩展的高空间频率范围(HSFR)。

2.2 技术

从表 1 和图 1 可以看出, 1990 年前是高端光学产品(照相机、望远镜和显微镜)、天文和空间光学、科研和军事应用推动非球面光学技术的发展, 此后, 非球面光学在光刻、天文光学和空间光学、超精密小型光学系统和具有中等精度和低造价的高级消费类光学产品中得到广泛的应用。无论非球面光学应用在哪些方面, 其加工方法可分为以下 4 类:

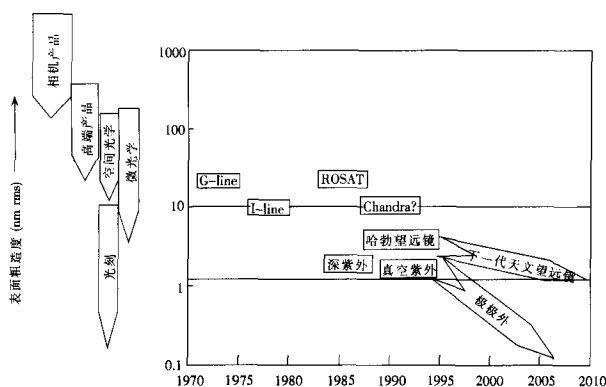


图 1 不同应用要求的非球面光学元件的表面粗糙度。超高精度: G-line, I-line, 深紫外、真空紫外和极紫外微光刻和天文/空间光学用光刻光学元件, 例如 ROSAT, Chandra, 哈勃望远镜和下一代空间望远镜。

材料去除:是指通过切削、研磨、抛光和成形加工去除材料获得非球面的方法, 这种方法也包括加工和复制非球面光学元件所需的磨头和母板(模具和插件等)。

模制和复制:是指用模制和复制(模压、注塑和铸塑)加工获得非球面的方法。

微加工:是指采用回流技术与光刻方法、激光加工、镀膜以及复制技术相结合获得微型非球面元件(透镜阵列)的加工方法。

混合加工:是指用玻璃和塑料(也称之为混合光学元件)制成的非球面光学元件, 包括在非球面上叠加一个衍射结构, 即把一层具有非球面的薄塑层或衍射表面叠压到一个玻璃或塑料的球形表面上所制成的混合非球面光学元件, 也可以将上述三种技术结合起来加工出衍射/折射混合非球面光学元件。

除上述分类外, 自适应光学和主动光学(变形反射镜和透镜)在某种程度上也属于非球面光学范畴。事实上, 自适应光学在波前控制、光束控制及在线校正光学系统性能等方面的应用正在增加。

相关的非球面测量/检验技术与加工技术同样重要, 高精度的非球面加工与非球面精度的测量密切相关。

2.3 加工工艺

为满足用户的需求, 不同的非球面光学加工应采用不同的加工工艺。一个生产厂通常都是根据其已掌握的工艺加工非球面光学元件。由于一些生产厂所采用的应用技术还存在着局限性, 因此开发出来的

生产工艺不一定是最佳工艺或降低加工成本的最理想工艺。目前,各生产厂正积极以伙伴或联盟形式联合开展研发项目,如 ESPRIT, ELLIPSE, EUCLIDES 和 EUV LIC 公司之间所开展的国际合作项目就是典型的实例。从早期联合研发 I-line 和深紫外微光刻扩展到现在国际合作研发的极紫外微光刻,表明这些跨国合作是必要而成功的。事实上,仅靠一个单一实体或一个国家的研究机构进行现代复杂的光刻技术的研究是不实际的。

虽然非球面光学加工不像制造一个光刻设备那样复杂,但考虑到成本压力和超高精密技术等问题,联合研发低成本非球面加工技术就如同研发光刻设备一样重要,成本因素在小批量(低于 1000 件/年)中等精密光学元件的加工中尤为关键。在工业发达国家,

高端技术都是由高素质和高薪水的专家们来完成。

表 2 给出了非球面加工技术、工艺及用途。鉴于每项工艺的复杂性,对应用范围和技术进行了分类,不同的公司可根据现行的具体要求和其自身的商务战略,选择不同的技术并制定不同的工艺来完成所要求的非球面光学元件的加工。

图 2 是卡尔·蔡司公司的研磨、抛光和成形技术的一个生产工艺链,所有的工艺属于“材料去除”的范畴。用该工艺能加工出符合用户需求的产品,并以尽可能低的成本在最短的时间内加工出符合质量要求的非球面产品。通过优化每一工艺步骤来减少工艺过程,从而实现产品的标准化生产。在整个加工过程中,需通盘考虑整个工艺,使每一工艺过程与其下一

表 2 与不同产品/用户需求有关的工艺和技术

	技术分类				用 途				
	材料 去除	模压与 复制	微工艺	混合 加工	光刻	天文学/ 空间光学	高端 产品	消费 产品	微光学、混 合光学元件
有关工艺因素					T	T	\$	\$	\$
系统设计	+	+	+	+	+	+	+	+	+
工艺模拟	-	+	+	-	+	+	-	-	-
CCP 方法的几何运算	+		+	-	+	+	+		
机械加工	+	+	+	+	+	+	+	+	+
光学材料(元件)	+	+	+	+	+	+	+	+	+
加工工件的磨头	+	+	+	+	+	+	+	+	+
检验	+	+	+	+	+	+	+	-	+
研磨	+			-	+	+	+		-
质量控制	+	+	+	+	+	+	+	-	+
用途(根据用户需求)									
光刻	+/T			-					
天文学/空间光学	+/T	-/T		-					
高端产品	-/\$	-	-	-					
消费产品		+/ \$	+	-					
微光学元件、混合光学元件	+	+	+/T/\$	+					

注释: +高依赖 -低依赖 T 高技术驱动、超高精密 \$大市场驱动、降低成本

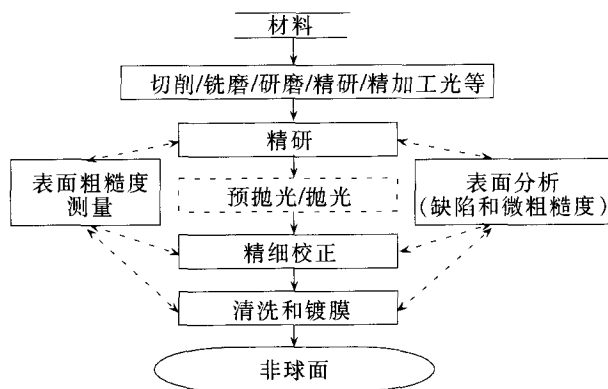


图2 采用经典研磨抛光和成形技术的关键生产工艺链。

项工艺最佳地结合十分重要。在抛光和成形过程中,导致亚表面损坏的关键参数、中频误差以及研磨时的工艺稳定性都会对整个工艺的好坏产生直接影响,研磨和抛光过程中产生的局部精细结构对成形极为关键。

数控抛光方法现已应用于精密校正(如图2所示),并在整个工艺链中起主导作用。下面对此进行讨论:

数控抛光法是在20世纪70年代开发的一种先进的加工技术,这是一种可完成高精密光学元件生产的关键方法,下列数控抛光方法已在非球面光学元件的加工中得到应用。

- 计算机数控抛光法(CCP);
- 离子束成形法(IBF)包括等离子辅助化学蚀刻法和原子/原子等离子反应技术及化学汽相加工;
- 磁流变抛光法(MRF)约在3年前作为生产工艺得到了应用,在加工高性能光学元件中起关键作用。

除上述技术外,流体喷射抛光和激光抛光及其应用正得到进一步的研究。如表4所示,不同技术及其应用的优点各异,例如流体喷射抛光在完成复杂光学元件(带有几何半球形的光学元件)抛光时具有一定的优越性。

表4给出了生产工艺链(见图2)用检验方法,大部分方法适用于非球面光学零件加工后检验;而像子

孔径压合法和三维表面轮廓法(例如由Loh Optixmaschinen AG公司制造的形貌检测装置和由Fries Research & Technology GmbH公司制造的光学表面检测系统)适用于光学零件加工后或在线检测。

3 卡尔蔡司公司的非球面加工

自1846年卡尔蔡司公司成立以来,作为世界上最佳的光学产品开发商和生产商之一赢得了崇高的声誉。当今的卡尔蔡司公司有6大贸易板块:消费类光学元件、医疗系统、光电系统、显微镜、半导体技术和工业计量。该公司在光学、精密工程与电子成像领域已经成为技术革新的领头雁,并提供应用于科研、医学、工业领域和休闲活动的高质量产品。

自卡尔蔡司公司于1912年生产出第1个非球面光学元件以来,其生产的各种非球面产品已经广泛应用于照明系统、显示技术、各种透镜、显微镜、相机镜头,其生产的极高精密光学元件已应用于天文学领域。

作为光学技术的先锋,卡尔蔡司公司开发了各种新型光学加工技术,其中小型计算机数控抛光技术和粒子束成形技术是加工高精密光学表面的基本方法,值得特别推荐。这两种技术不但可用于加工像天文和光刻系统(芯片加工的关键技术)所要求的极高精度的光学元件,还可用于开发其他领域应用的高效加工工艺。

3.1 光刻

卡尔蔡司公司于20世纪70年代开始与其主要战略伙伴-ASM光刻公司(荷兰)联合开发用于生产G-Line和I-line、深紫外/真空紫外/极紫外微光刻技术,其目的是开发出具有高生产能力的设备(分辨率为0.25~0.03 μm)和基本工艺,以及能够加工各种半导体设备的基本工艺。

在过去的2年中,卡尔蔡司公司作为极紫外光刻工业联盟的成员,已经生产出质量得到重大改善的非球面光学透镜(见表5)。该公司现生产的透镜的表面粗糙度已经达到了10nm到200nm的范围。

表 3 不同计算机数控抛光方法之比较

精密校正方法	数控抛光-研磨	粒子束抛光法	磁流变抛光法
基本性能	* 传统局部抛光 * 通用磨头和化学方法 * 取决于时间/压力/相对速度 * 需要了解设备工作性能和基本算法	* 溅射加工 * 不用化学抛光液 * 宽光束-掩模 * 窄光束-在数控加工中	* 把磁流体用作抛光磨料 * 子孔径的抛光和研磨
优点	+具有各种直径的可更换磨头 +没有微结构 +投资低	+具有较好的工作台和磨头 +光学元件之间没有机械接触	+磨头操作简单 +磨头在工作时间稳定 +快速和可重复加工 +加工期间, 光学零件上的磨头压力可忽略不计
缺点	-存在边缘区域问题 -不能确定什么时候磨头会磨损 -加工时间长	-在真空中加工 -受限于某种类型的光学材料 -加工时间长 -投资高	-对尺寸和曲率有一定的限制 -在光学零件的中心会出现问题 -投资高
备注	大型光学元件, 如超大型望远镜的精密抛光正在研发之中。	CVM;PACE 和 RAP 是潜在的有效加工方法	最近研发的磁流变抛光法主要用于不同材料光学零件的成形加工, 现正处于改进阶段。

表 4 2D-各向同性二维功率谱密度(PSD)的相对空间频率范围及相关检测方法, 包括 8 个不同量级(检测范围:2m 孔径的望远镜到 10nm 以下的高空间频率范围)

表面质量	空间频率范围 (低、高极限 f_1 和 f_2)	典型数值 (nm, rms)	检验方法
粗糙度	光学零件的通孔和(1mm)	降到 0.25	干涉仪、表面光度仪、坐标检测系统
中空间频率范围	在 1mm 和 $1\mu\text{m}$ 之间	降到 0.20	表面光度仪、干涉仪
高空间频率范围	在 $1\mu\text{m}$ 和 10nm 之间	降到 0.20	原子力显微镜

在开发微光刻设备方面,国际间的合作正加速开发步伐以确保此类设备早日研发成功。

* 由几个国家的一些公司成立的第 1 个研发联

盟的主要使命是研制出 193nm 的设备(用于 ESPRIT 项目的加工),此后又进行 157nm 设备和极紫外设备(用于 EUCLIDE/MEDIA/EUV LLC 项目的加工)的开

发。

* 技术创新已使现有技术突破了自身极限,可以获得比原来半导体目标期望值更高的技术。

由于在极紫外反射镜的加工方面(见表5)可获得越来越高的表面质量,因此极紫外设备的现在目标为32nm,这比1998年半导体的预期目标,即对极紫

外技术规定的50~40nm要高很多。又一实例说明,英特尔公司不用157nm技术写入具有45nm特征的芯片,而是使用浸没技术期望扩大193nm系统的使用,直到13nm极紫外光刻实现商业应用为止。但是,由于英特尔公司的技术革新还必须以其他半导体工业作支撑,所以157nm和极紫外步进设备的技

表5 卡尔蔡司公司生产的MET反射镜的表面质量(所有单位为纳米)

	表面质量	表面粗糙度	中空间频率范围	高空间频率范围
反射镜 编号1	Set1	0.41	0.23	0.49
	Set2	0.20	0.27	0.37
反射镜 编号2	Set1	0.25	0.34	0.38
	Set2	0.21	0.28	0.31
	Set3	0.20	0.20	0.20

术革新仍然存在压力。

3.2 空间与天文光学

自1962年以来,卡尔蔡司公司就开始加工天文和空间用非球面光学产品,这些产品包括所有的波长范围,从远红外到X波段。X波段光学产品的范围包括ASTRO8, ROSAT和ABRIXAS望远镜用反射镜系统和SAX, JET-X, WFXT, XMM, 星座-X和XEUS天文装置上的心轴, ROSAT的表面斜率误差 $<0.5\text{arc/s}$ 。

除了加工精度、轻量结构(每单位体积的重量)、自适应光学、分节镜界面、多反射镜光学系统以及检验所带来的常规挑战外,生产成本的压力也在不断增长。

预计2009年,美国宇航局将发射新一代天文望远镜,其孔径要比哈勃望远镜大5倍。由于发射设备功能的限制和预算的制约,新一代天文望远镜面临的挑战是要生产出比哈勃望远镜孔径面积大5倍、面积密度小10倍的一个主镜,使之符合NGST发射数据的要求和预算要求,也就是必须要生产出一个面积为哈勃望远镜5倍、成本只占哈勃25%的天文望远镜。

由于科学家们还需要时间来开发这项新技术,因此计划在2011年发射该望远镜(命名为James·

Webb天文望远镜)。

3.3 高端产品用非球面光学元件

卡尔蔡司公司以生产相机镜头、显微镜和数码投影机而闻名。以相机为例,该公司生产的相机已经使用了非球面镜头并获得了与球面镜头相同的功能,但体积比安装有球面镜头的相机更小,质量更轻。在数字电影领域,该公司生产的非球面镜头已用于解决图像的畸变问题,前部直径比广角镜头更小。在相机上安装混合非球面镜头是补偿像差的有效方法,可从角对角获得平均图像并使摄影师用先进的镜头直角平面来拍摄动态图像。

到目前为止,卡尔蔡司公司已经研发出每年可加工1000件用于高端产品的非球面镜头的加工工艺,并使之保持在可接受的加工周期和价格范围内,这些非球面镜头的表面粗糙度约优于50nm rms。具有革命性的加工后和在线检测方法(精度高于20nm rms)可取代计算机产生全息图干涉检测法,这不但加速了加工工艺的发展,还降低了加工成本。

3.4 眼镜片

卡尔蔡司公司设计加工非球面镜片的历史已近100年。近20年来,该公司生产的可旋转对称非球面

镜片是应用最广泛的单片可视镜片。由于对称性极少出现在镜片的应用数据中,所以直到今天,非对称性表面在镜头设计和加工中仍占主要地位。这些对称任意表面的设计首先是为了满足老花眼人群的需要,这些戴老化镜人群需要佩戴老化度从上(远视)到下(近视)增高的老花镜,这种镜片是一种“递增型”老花镜。这种老花镜至少有一个任意表面是卡尔蔡司公司用仿样数学方法设计的,由于技术和经济的原因,必须把镜片的这些表面设计成等均梯度状态。迄今为止,卡尔蔡司公司仍运用“Gradal Individual”技术开发设计这种镜片。这些镜片的每一个任意表面都是经过单独计算并加工出来的,目前该公司正在考虑采用更为具体的镜片抛磨方法,这不但能提高度数而且还能扩大顶点距离、出瞳距离、物镜距离和倾角等。在每周加工出来的几千个表面中没有两个表面是相同的,虽然卡尔蔡司公司每年要加工出大量的非球面镜片,但是每个表面的加工精度都可控制在几个毫米以下。

图3所示为单个任意表面的效果。这种递增型老花镜片由三个目视区组成,上部是远视区,下部是近视区,中间区可为每个距离之间提供校正,彩色/灰

色刻度表示戴镜人通过不同区域观看时所产生的模糊度,左侧镜片的设计比较理想,中间的镜片使用了不同用途的相同递增表面,这样会产生误差(如图3所示),使任意表面单独化(右侧镜片)是一种最接近理想镜片设计的方法。

3.5 微光学

目前,市场对微光学元件的需求是更加紧凑的组装,这就要求机械和电子元件的尺寸更小且精度更高,以使应用于照明系统、通讯系统和生化/生命系统中的光学元件更加小型化。基于以上原因,一个新型的“光学微型系统技术”已经诞生并正发挥日益重要的作用,虽然可用不同的技术来生产,但主要的生产方法还是通过材料去除法来获得这些小型化装置。

为了开发可用于通讯、生命科学、照明和成像系统的衍射/折射光学元件(如附在非球面上的衍射结构层),卡尔蔡司公司正与其德国伙伴共同研发BMBF项目。

4 非球面光学的加工

由于不同的用户要求和生产厂自身所存在的局限性,不同生产厂可使用不同的技术完成对非球面光

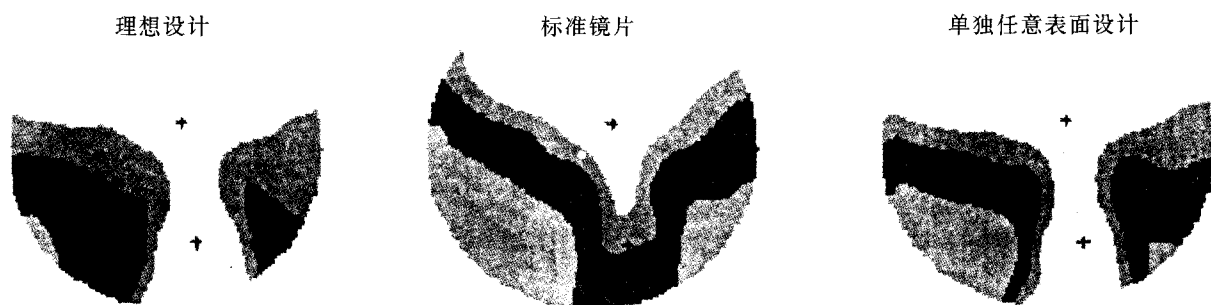


图3 递增型镜片的单独任意表面(直径:50mm)

学元件的加工。技术要求如下:

●用户要求

表面质量(剩余形状误差从几纳米到几毫米)

尺寸和重量(直径从几毫米到几米)

成本(每个非球面的成本从几欧分到成百上千欧

元)

数量(单件加工到大批量加工)

●技术分类

材料去除

模制与复制

微型工艺设计

混合技术

自适应光学

●加工工艺

工艺步骤(几个步骤到 10 个以上步骤)

加工时间(几秒钟到几个月)

目前卡尔蔡司公司正试图通过新的系统方法和非常规理念来开发新一代光学加工技术,开放性思路是新技术和现有综合性技术(如:数控机械加工、IBF 加工、MRF 加工、激光加工、FJP 加工、超声机械加工等)发明的源泉,现在与未来的设计将根据光刻和天文学的发展要求,运用具有稳定而可靠的精密加工方法使加工精度达到原子级。

加工工艺具有以下发展趋势:

* 生产设计:智能化设计理念应该是生产高度稳定和最大限度地降低成本,包括有效地减少加工步骤和提高生产效率。

* 检测设计:通过新设计方法降低检测的频率周期、难度和成本。

* 工艺过程设计和自动化:是指一个具有决定意义的集成工艺链的开发和现行标准加工工艺的优化,通过运用机加工工艺和一个上机测试来减少手动加工步骤,从而实现灵活的自动质量控制。

* 标准化:对所有元件和系统确定统一的标准,以便更广泛地进行合作开发,此外还应考虑以下关键点:

* 成本与技术的关系

在低成本的驱动下,现在许多公司都将生产厂从日本、韩国、中国台湾和新加坡转移到像中国、马来西亚和泰国这样具有较低生产成本的国家,这些刚进入工业化的国家生产成本较低固然可喜,但今后在市场上有统治力的还是高质量产品,这就要求所建立的这些公司必须进行技术改造和不断开发新的具有竞争力的技术。

加工低成本非球面光学元件不仅要解决成本问题,而且要展示其在提高质量和性能方面所具有的独特优势,这就是为什么即使用户能接受装有常规光学元件(如较便宜的球面光学元件)和非球面光学元件(在亚洲制造)的光学装置和系统,光学生产厂还要在新品上投放研发资金的主要原因。

* 紧急需要

“911”事件的发生和伊拉克战争严重影响了世界政治、经济和人们的日常生活,急需的光学产品类型(如:袖珍光学、任意光学和成像光学)是最有利可图的,特别是应用于军事领域的光学产品的需求量正在增加。

* 前景因素

虽然一些(如 NGST, OWL)元件的生产需要资金投入和更进一步的技术开发,但科学家们还是需要通过这些项目来判断其发展前景。

* 全球性联合攻关

国际间联合开发光学产品的趋势仍在继续,为了探索到适用于整个工艺链的系统方法,每个合作伙伴都以最多的人力和财力参与到研究中。(No.5)