

液晶空间光调制器及其应用

王康俊 上海瞬渺光电技术有限公司, 上海 201108

空间光调制器是一种对光波的光场分布进行调制的元件, 广泛地应用于光信息处理、光束变换、输出显示等诸多应用领域。液晶空间光调制器(SLM)以制作简单, 价格低, 耗能低, 易控制, 易制成二维器件, 且易构成并行光学信息处理器件等优点, 倍受国内外研究学者的关注。液晶空间光调制器又称光学快门阵列(OSAs), 它将液晶层作为光调制材料, 液晶层采用向列型液晶的混合场效应工作模式, 在晶层上各区域施加不同的电场, 可以引起液晶分子排列方向和位置的变化, 从而导致其光学性质的变化, 实现对光信号的调制。本文简要介绍了Holoeye的液晶空间光调制器, 并列举其目前在光镊技术、螺旋位相相衬成像、飞秒脉冲整形、自适应光学、光学投影等方面的应用。

Holoeye的空间光调制器主要是基于透射或反射类型的液晶微显示技术, 通过液晶分子的旋光偏振性和双折射性来实现入射光束的波面振幅和相位的调制(如图1), 可作为动态光学元件, 实时地调制光强和相位的空间分布。Holoeye SLM系列产品一般可分为相位型、振幅型和振幅相位复合型。纯相位型调制范围都可达 2π 以上, 振幅型对比度典型值为2500:1, LC-R 1080可达10000:1。Holoeye SLM系列产品分辨率高, 像素单元小, 填充因子高, 衍射效率高, 这样, 实际应用中可获得高精度的波前控制。同时, 帧频可达到180Hz, 有利于实时控制。Holoeye还提供了良好的软件控制界面, 通过灰度图象控制SLM面板像素单元对应的相位或振幅。目前, Holoeye的空间光调制器已在许多领域得到应用, 下面仅作一些简单的介绍。

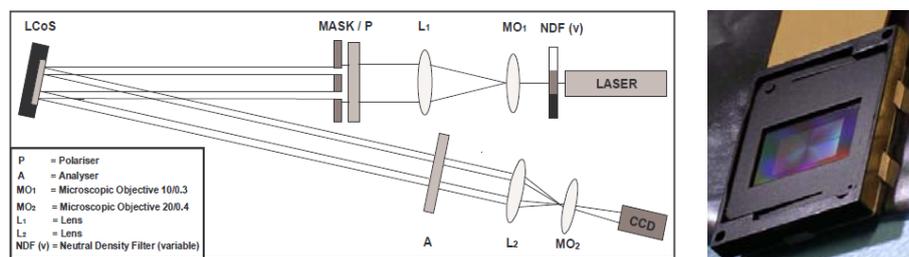


图1 相位调制特性测量示意图

Locs即SLM, 空间光调制器, P=起偏器 A=检偏器 MO=显微物镜 L1, L2=透镜 NDF=中性密度滤光片
Mask=掩模板 Laser=激光器

全息光镊

光镊技术是利用光的力学效应实现对微观粒子的操控, 具有非接触、无损伤特性, 在分子生物学、胶体科学、实验原子物理等领域中具有极其重要的作用, 光镊本身也不断发展并产生许多衍生光镊技术。利用全息元件或空间光调制器(SLM)所形成的全息光镊, 在多粒子操控方面的优势, 为光镊技术走向实用化、规模工业生产打开了新局面, 是目前光镊家族极具活力的成员。

利用空间光调制器, 可以灵活地实现光束的变换, 获得所需的阱域分布。所谓阱域, 就是具有高梯度光强分布的区域, 该区域可形成对微粒的三维束缚(如图2)。Andreas.H等的实验装置中¹⁾, 采用了Holoeye HEO 1080P II SLM, 其分辨率为 1920×1080 , 像元大小 $8\mu\text{m}$ 。该实验中, 为解决一般光镊系统高数值孔径物镜带来的短工作距离问题, 设计出Twin双光束技术, 即另一部分光通过载波片的反射, 形成与原会聚光对应的反向会聚光。这样, 可以减小散射光的影响, 提高轴向作用力, 在低数值孔径物镜下也可形成光

阱。另外，通过SLM可以产生多个阱域^{2, 3)}，实现多粒子的操控，并且还可用于微粒间相互作用力的测量。值得一提的是，利用SLM可将基模Gaussian光束转换成Laguerre-Gaussian光束，由于Laguerre-Gaussian具有轨道角动量，可以实现对微粒的旋转操控，该研究引起了广泛的兴趣⁴⁾。

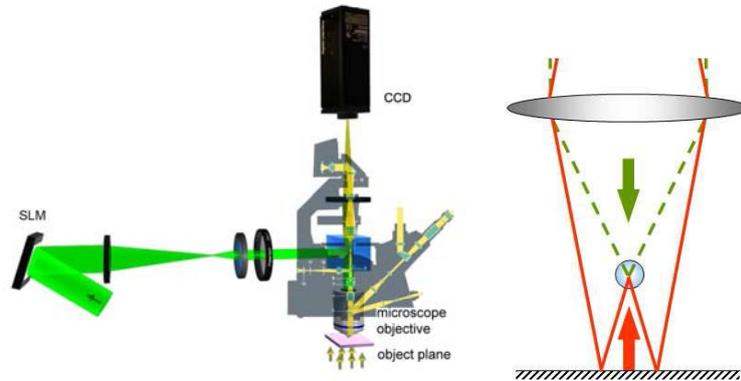


图2 Twin光阱全息光镊装置

microscope objective=显微物镜 Object plane=物平面

螺旋位相相衬成像

在光学显微镜中，暗场或相衬方法常被用来提高物体成像的对比度。实质上，这些方法都可看作是傅立叶平面上的光学滤波。类似于微分干涉相差显微技术，螺旋位相相衬法也是利用对相移的敏感性来提高成像的清晰度，特别是边缘。由于光束的对称性，还可以对各向均匀介质物体成像进行对比增强。并且，较传统相差显微成像，边缘对比度要提高几个量级。如图3，Severin.F等采用了Holoeye 3000反射型SLM，分辨率 1920×1080 ，像元大小 $10\mu\text{m}$ 。通过它产生闪耀光栅执行滤波处理⁵⁾。这里，进行螺旋相位滤波的全息光栅，中心有一个分叉，对应于位相不连续奇点。

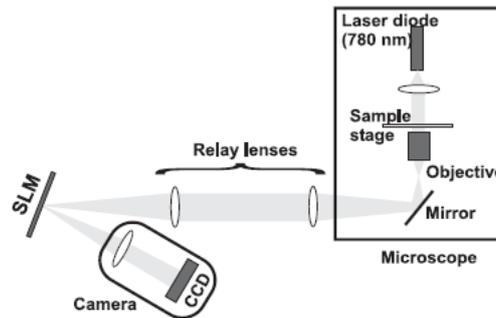


图3 螺旋位相光束在成像中用于提高边缘对比度的实验装置

Laser diode=激光二极管，Sample stage=样品台，Objective=物镜，Mirror= 反射镜，
Microscope=显微镜，Relay lenses=中继镜，camera=相机

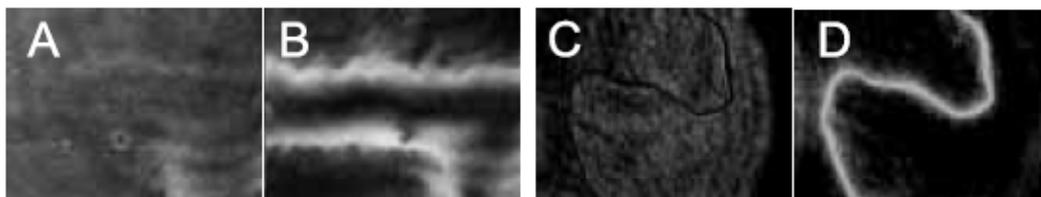


图4 相位物体的对比增强。A-C为明场成像，B-D为螺旋位相滤波成像

飞秒脉冲整形

飞秒脉冲整形的基本原理是频域和时域是互为傅里叶变换的，所需要的输出波形可由滤波实现。图5是脉冲整形的基本装置⁶⁾，它是由衍射光栅、透镜和脉冲整形模板组成的4f系统。超短激光脉冲照射到光栅和透镜上被色散成各个光频成份。在两透镜的中间位置上插入一块空间模式的模板或可编程的空间光调制器，目的是调制空间色散的各光频成份的振幅和位相，光栅和透镜看作是零色散脉冲压缩结构。超短脉冲中的各光频成份由第一个衍射光栅角色散，然后在第一个透镜的焦平面聚焦成一个小的、衍射有限的光斑。这里的各光频成份在一维方向上空间分离，在光栅上从不同角度散开，在第一个透镜的后焦平面上进行了空间分离，第一个透镜实现了一次傅里叶变换。第二个透镜和光栅把这些分离的所有频率成份重新组合，这样就得到了一个整形输出脉冲，这个输出脉冲的形状由光谱面上模板的模式给出。

这里，E.Frumker等只使用了一个透镜和光栅进行脉冲整形。其中，SLM为Holoeye HEO 1080P，承受功率密度可大于 $2\text{W}/\text{cm}^2$ 。在制冷的状态下，可进一步提高光功率。

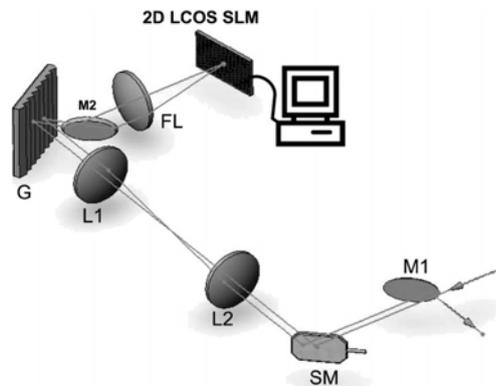


图5 飞秒脉冲整形实验光路图

FL=聚焦透镜，M1,M2=反射镜，G=光栅，SM=扫描镜，L1,L2=透镜

自适应光学

自适应光学技术，是一种能够实时校正光学系统随机误差并使系统始终保持良好工作性能的新技术，早期在天文观测中是用来修复大气湍流等因素对光波波前的扭曲，通过动态地对波前误差的实时探测-控制-校正，来改善成像质量。目前，在眼底视网膜成像、大视场显微成像等方面也得到应用。自适应光学系统中，关键部件是哈特曼波前传感器与变形镜⁷⁾或空间光调制器（图6）。

另外，SLM还可用来模拟大气扰动，为实验室里研究大气中光学成像提供有力支持⁸⁾。

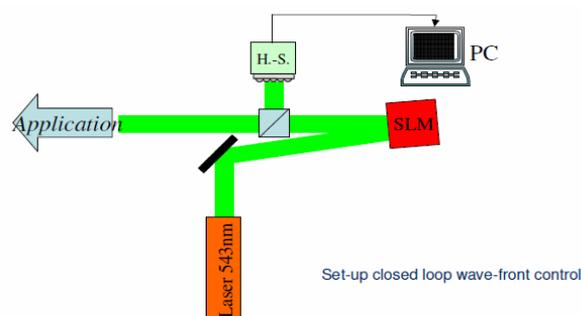


图6 光波前闭环控制示意图

光学投影

光学投影,特别是三维成像,可以利用空间光调制器通过全息计算生成。Alexander.J认为物光的复振幅光场由两个相位衍射模式P1,P2组成⁹⁾,分别处于4f系统中的两个共轭平面上,P1通过迭代优化建立傅立叶平面上的振幅分布,P2用来建立所需要的相位分布函数。如图7,P1,P2都是由Holoeye HEO 1080 SLM来完成,凹面反射镜类似透镜作用进行傅立叶变换。实验上,建立了一个Logo图象。与一般衍射元件相比较,SLM可以对成像方便地进行优化处理。

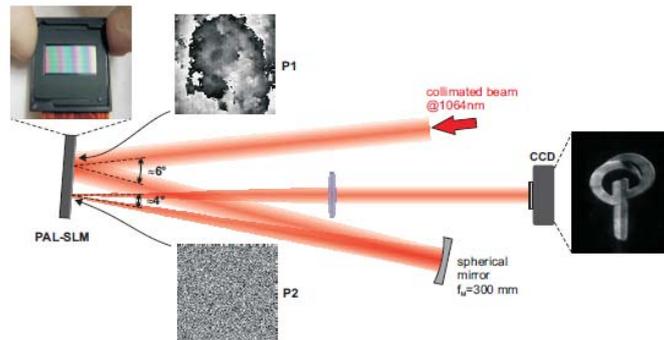


图7 图象的全息重建实验示意图

Collimated beam@1064nm=1064nm准直光束, Spherical mirror=球面反射镜

液晶空间光调制器,由于具有线形度好、分辨率高、响应速度快、可编程性强等优点,不仅在上述领域中得到广泛应用,而且还可应用于光相关处理¹⁰⁾、光束空间整形¹¹⁾、激光打标或扫描¹²⁾、全息测量¹³⁾,并且,随着加工工艺的提高和成本的降低,将会在更多的领域发挥其优势。

参考文献:

- 1) Andreas H, "Holographic optical tweezers with real time hologram calculation using a phase-only modulating Lcos-Based SLM at 1064nm", Proc. SPIE, Vol. 6905(2008)
- 2) Roberto D L, "Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays", Vol.15, No.4, Optics Express, 1913-1922(2006)
- 3) Jennifer E G, "Dynamic holographic optical tweezers", Optics communication, Vol.207, 169-175(2002)
- 4) L Allen, "Optical tweezers and optical spanners with Laguerre-Gaussian modes", Journal of Modern Optics, Vol.43, No.12, 2485-2492(1996)
- 5) Severin F, "Spiral phase construct imaging in microscopy", Vol. 13, No.3, Optics Express, 689-694(2005)
- 6) E.Frumker, "Femtosecond pulse shaping using a two-dimensional liquid-crystal spatial light modulator", Optics Letters, Vol.32, No.11, 1384-1386(2007)
- 7) Michael W, "Adaptive optical imaging correction using wavefront sensors and micro mirror arrays", Photonik international 2008/1, 46-49
- 8) Liesi B, "Simulating atmospheric turbulence using a phase-only spatial light modulator", South African Journal of Science 104, 129-133(2008)
- 9) Alexander J, "Near-perfect hologram reconstruction with a spatial light modulator", Vol.16, No.4, Optics Express, 2597-2603(2008)

- 10) 胡文刚等, "在光学相关器中测试滤波空间光调制器的相位调制特性", 光子学报, Vol. 36, No. 9, 1602-1605 (2007)
- 11) 陈怀新等, "采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形", 光学学报, Vol. 21, No. 9, 1107-1111 (2001)
- 12) Pierre M L, "Fiber-optic confocal microscopy using a spatial light modulator", Optics Letter, Vol.25, No.24, 1780-1782(2000)
- 13) Kiyofumi Matsuda, "Holographic vibration measurements of rough surfaces using a LCsLM", Optics Communications, Vol.275, Issue 1, 53-56(2007)