

全息光镊

李 静 朱春丽 伍小平 编著



科学出版社

全息光镊

李 静 朱春丽 伍小平 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全息光镊是一门新兴学科,它涉及光镊技术、计算全息、傅里叶光学、电磁理论、光电测试技术等多门学科。全书共8章,主要包括全息光镊的产生和发展、不同尺度下光阱力的计算、全息光镊的形式、计算全息的算法、空间光调制器、全息光镊实验系统、光阱刚度的测量,以及全息光镊的应用。

本书可供生命科学、物理、力学和材料科学、纳米制造、微机械微流体等专业的研究生和科研人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

全息光镊/李静,朱春雨,伍小平编著. —北京:科学出版社,2015.3

ISBN 978-7-03-043544-6

I. ①全… ①李… ②朱… 伍… III. ①全息光学 IV. ①O438.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第042941号

责任编辑:张树华 余 丁 孔晓慧/责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩/封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:219 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

全息光镊是一门涉及光镊技术、计算全息、傅里叶光学、电磁理论、光电测试技术等方面的交叉学科。它采用计算机设计的衍射光学元件控制空间光调制器,对入射激光进行光调制,可以同时产生多个光阱和特殊功能光阱,具有三维动态控制样品的能力,因而被视为对传统经典光镊技术的革命,是国际上热门的研究课题。

作者及所在课题组在国家自然科学基金(50975271、91023049)、973 计划项目子课题(2012CB937500)和中国科学院科研装备研制项目(Y2201265)、企业资金(合肥天凿仪器公司)的支持下,对全息光镊技术进行系统的研究。本书从以下几个方面对该技术进行介绍。第 1 章为绪论,阐述全息光镊的产生和发展。第 2 章为光阱力的计算理论。第 3 章为全息光镊的形式,通过介绍常规的点阵光镊、LG 光束、可以捕获吸收性粒子的光瓶、无衍射现象的贝塞尔光束以及三维螺旋马达光阱,以扩大读者的眼界与认识。第 4 章为计算全息算法,详细给出作者对常用两大类算法的改进,以期使读者掌握计算全息图的设计。第 5 章为空间光调制器。对空间光调制器的结构、性能、原理及相位调制曲线测量进行介绍。第 6 章为全息光镊实验系统。首先介绍两种用于不同场合的全息光镊实验装置,然后介绍常用全息光镊实验装置的优化设计方法。第 7 章为光阱刚度的测量,介绍常用的几种光阱刚度测量原理。第 8 章为全息光镊的应用,列举全息光镊技术在生物学和纳米制造领域应用的两个实例,然后介绍作者研发的全息光镊仪及完成的系列科学实验。

本书在撰写中注重理论和实验相结合,强调理论指导实验,实验加深对理论的理解和充实。书中给出一些实验光路,希望对全息光镊技术感兴趣的读者能从中受益。

全息光镊仍处于发展中,一些技术还有待于进一步改善和解决,如鬼像问题、全息图计算速度等。

作者指导的多名研究生所做的相关研究工作构成了本书的部分内容,他们是胡耿军、赵旭东、施丽、曹杰、陶陶、许凯等。研究生朱春丽、李来利参与了部分章节的编写等工作。胡玉禧教授审阅了全书,在此表示感谢。

感谢国家自然科学基金委员会、中华人民共和国科学技术部、中国科学院、相关企业对全息光镊技术研究的支持!感谢刑晓正、黄文浩、李胜利、龙潜等老

师在工作上给予的帮助！感谢爱人杨义忠给予的宁静生活！

限于作者水平，本书难免存在不妥之处，恳请读者予以指正。

李 静

2014 年 11 月于中国科学技术大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光镊技术简介	1
1.2 全息术简介	5
1.2.1 全息术原理	6
1.2.2 计算全息图	6
1.3 全息光镊技术的产生和发展	7
参考文献	13
第 2 章 光阱力的计算理论	16
2.1 光镊的力学理论研究状况	16
2.2 瑞利模型	17
2.3 米散射模型	20
2.4 介于瑞利区和几何区之间的区域	22
2.5 FDTD 方法	25
2.5.1 三维直角坐标中的 FDTD	26
2.5.2 数值稳定性条件	30
2.5.3 边界条件	30
2.6 光源设置	37
2.7 利用 FDTD 方法计算光阱力	42
2.7.1 光阱力与光源参数和微球参数的关系	43
2.7.2 单光镊中双微球间的光阱力	46
参考文献	48
第 3 章 全息光镊的形式	51
3.1 点阵光镊	51
3.2 LG 光束	54
3.3 光瓶	56
3.4 贝塞尔光束	59
3.5 三维螺旋马达光阱	62
参考文献	66

第4章 计算全息算法	69
4.1 GS 算法原理	70
4.2 改进的多平面 AA 算法	72
4.3 DBS 算法	76
4.4 改进的 DBS 算法	77
4.4.1 临时相位水平的影响	77
4.4.2 临时像素数的影响	79
4.4.3 计算速度比较	83
4.5 生成 LG 光束的计算全息图	84
4.5.1 全息图的产生	84
4.5.2 光场再现	85
4.5.3 模式纯度分析	86
参考文献	90
第5章 SLM	92
5.1 SLM 的工作原理	92
5.2 SLM 相位调制曲线的测量	95
5.3 SLM 建模及全息再现仿真	97
5.3.1 SLM 的建模	98
5.3.2 全息再现过程的仿真	99
5.4 数字微镜装置	103
参考文献	106
第6章 全息光镊实验系统	107
6.1 采用光学图像大规模并行操纵单细胞和微粒	107
6.2 超连续白光光束的轨道角动量传递	111
6.3 全息光镊装置的优化设计	115
6.3.1 光学装置的设计	115
6.3.2 SLM 的配置	123
6.3.3 光路中的像差	127
6.3.4 实验结果	129
参考文献	130
第7章 光阱刚度的测量	132
7.1 几种光阱刚度测量方法的原理	132
7.1.1 功率谱分析法	132
7.1.2 流体力学方法	133

7.1.3 热运动分析法	134
7.1.4 外加周期力法	135
7.2 玻尔兹曼统计法	136
7.3 高速相机和四象限探测器用于光镊系统中位移测量的比较	140
参考文献	143
第 8 章 全息光镊的应用	146
8.1 全息照明光分解笼状神经递质	147
8.1.1 全息照明的原理	147
8.1.2 全息光束的轴向传播	150
8.1.3 全息照明激活大脑切片内的 AMPA 受体	151
8.1.4 小脑颗粒细胞上 AMPA 受体的功能测绘	151
8.1.5 讨论	153
8.2 三维光学捕获和操纵银纳米线	154
8.2.1 三维光阱装置	155
8.2.2 捕获单根银纳米线	157
8.2.3 捕获多根银纳米线	158
8.3 全息光镊仪和全息光镊实验	161
8.3.1 全息光镊光学系统	161
8.3.2 软件	162
8.3.3 仪器外观	163
8.3.4 全息光镊实验	163
参考文献	171

第 1 章 绪 论

1.1 光镊技术简介

随着物理光学的发展，人们认识到光可能是由光子构成。由于光子不仅携带能量，同时还具有线性动量和角动量，因此能在物体上产生辐射压与力矩。开普勒首次提出了辐射压力的概念，指出太阳的辐射压力是使彗星尾部发生偏转的原因。1873 年，麦克斯韦对辐射压力的概念作了进一步的描述^[1]。他说：“电灯的会聚光线所贡献的辐射能量要比太阳光线大得多。这样的光线打到薄金属盘上，会产生可观的机械效应，即金属盘会微妙地悬浮在真空中。”1901 年，Lebedev 搭建了一个光学装置，证明了麦克斯韦的陈述^[2]。

对于光镊技术，同样重要的是显微镜的发明。据记载，第一台复式显微镜是由荷兰眼镜制造商 Jansen 于 1595 年制造的。1670 年，荷兰学者 Leeuwenhoek 用简单的方法制造出了高品质倍率玻璃，并观察了细菌、红细胞和精子。

辐射压力的构想和显微镜的应用发展了几个世纪，一个显著的突破就是 Maiman 于 1960 年发明了第一台激光器^[3]。波长、方向和相位确定的相干激光光源可以确保实现高精度和具有分析价值的实验，自然便有了将辐射压力、显微镜和激光器结合起来的想法，于是光镊技术应运而生。

1970 年，Ashkin 经过估算，认为聚焦的激光有可能推动数微米大小的微粒。于是他将氩离子激光聚焦到水中，并在水中放入直径为 $0.6\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的透明塑胶微粒，结果发现这些微粒沿着光轴被加速推离。这个实验首次明显地观测到光压作用^[4]。

除了发现光轴方向的推力之外，Ashkin 还发现一个现象：接近光束的微粒也会被横向吸入光束中。改用气泡与液滴重新做光压实验得到如下结论：光束对折射率比周围介质高的微粒具有横向吸力，但对折射率比周围介质低的微粒则表现为横向推力。利用这种横向作用力，Ashkin 将两束激光相对入射，聚焦于同一处，结果在两束激光的轴向作用力相抵消处产生一个可以将微粒横向吸入并固定不动的势阱。这就是“双光束捕获”的雏形，同时也是“光学捕获”的首次实现。

在光压与光学捕获实验之后，Ashkin 和许多科学家于 1970~1980 年陆续发表了大量相关的研究论文，包括光学悬浮的发明与应用、用不同材质和形状的微

粒作为捕获对象等。

1985 年, 在研究以单束激光捕获原子时, Ashkin 尝试用类似的装置来抓取较大的粒子。结果发现: 仅将单束激光高度聚焦, 就可以稳定地捕获这些微粒。1986 年, Ashkin 等指出将单束激光高度聚焦, 在激光束焦点处可以将微粒稳定地捕获^[5]。这种单束激光的光学捕获称为“光镊”, 它可以抓取直径为数纳米至数十微米的粒子。图 1.1 为光镊工作原理图。当一束强会聚的高斯光场作用于一个透明的微粒时, 如果微粒的折射率大于周围介质的折射率, 无论它是在光的传播方向即 z 轴上, 还是在垂直于 z 轴的 x - y 平面内, 光束所产生的梯度力都将把微粒推向光场强度的最强处, 即激光焦点处。同时, 光与微粒相互作用时存在散射力, 使微粒偏离捕获位置, 当梯度力与散射力平衡时, 实现对微粒的稳定捕获。

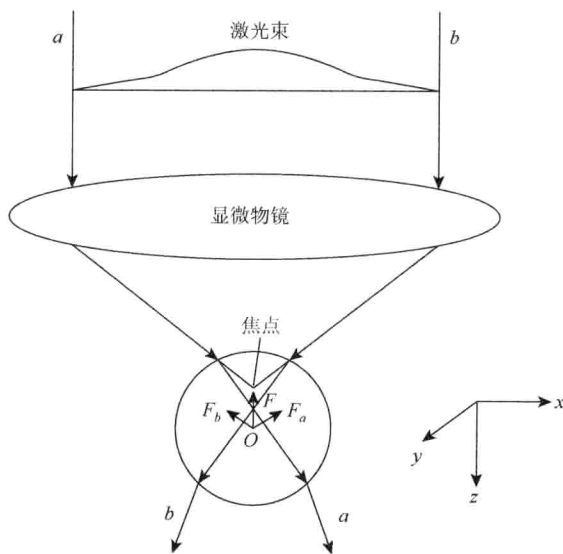


图 1.1 光镊工作原理图

1987 年, Ashkin 等首先将光镊用于捕获生命科学中的细菌病毒^[6]。朱棣文进一步发展了光镊技术, 采用激光制冷技术使光捕获范围推广到原子分子的尺度^[7], 实现了对原子的冷却, 并因此获得了 1997 年的诺贝尔物理学奖。

迄今为止, 对宏观微粒的辐射压力研究已取得了丰硕的成果。研究者们解释了各类光捕获、光悬浮的物理机制, 定量分析了光阱的特性及形成条件。目前, 以光捕获、光悬浮和光操纵技术为基础的“光镊”器件已成为相关研究领域的有力工具^[8]。光镊可以捕获小到 5 nm 的物体^[9,10], 能施加超过 100 pN 的力^[11~13], 力的分辨率可以达到 100 aN^[14~16]。当用于捕获和操纵微粒时, 与原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)、扫描探针显微镜(scanning probe microscope, SPM)等

手段相比,光镊具备许多优点,其中最为典型的是可实现远距离非接触式捕获及对活体样品无损伤操纵,因而在生命科学、物理、化学以及微纳制造、微流体等诸多领域有着重要的应用价值。例如,在生命科学领域^[17~19],利用光镊研究了单个生物聚合物(如DNA)、细胞膜、聚集蛋白纤维(如肌动蛋白)、细胞骨架中的纤维凝胶,以及复合结构(如染色质和染色体)的黏弹性,探测了分子马达,如肌球蛋白、驱动蛋白、加工酶和核糖体所施加的力。光镊为实现细胞内的手术操作(如修改活细胞内的染色体)提供了很大的希望^[20]。以下列举几个光镊应用的具体例子。

在生物学领域,将光镊用于单分子分析。如图1.2所示^[21],图1.2(a)表示单个DNA分子被拉伸,DNA的一端粘在滴液管吸住的微球上,另一端粘在被光镊捕获的微球上,由光镊测量拉伸力,拉伸长度是单链DNA片断和双链DNA片断之和;图1.2(b)为得到的单链DNA分子和双链DNA分子的受力和伸长比例曲线,图中箭头表示在聚合期间或力引起的核酸外切酶活动期间恒拉力作用时拉伸长度发生的变化。

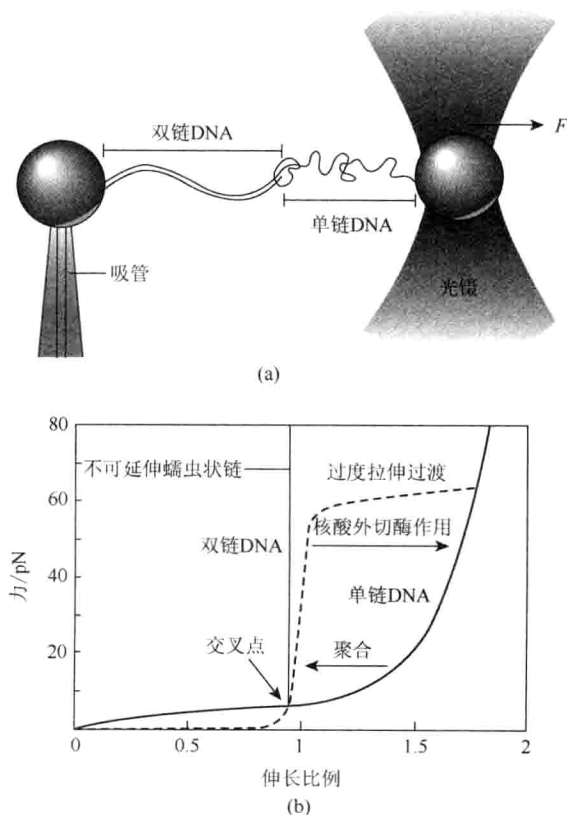


图1.2 采用光镊拉伸DNA示意图(a)以及力与伸长比例的关系(b)^[21]

在纳米技术领域，光镊由于能对微米级和纳米级的器件进行非接触式操纵，所以被用于纳米压印、纳米组装和微纳加工^[22, 23]。Urban 等^[23]将光镊用于纳米压印，对单个金纳米粒子进行定位，并通过范德瓦耳斯力将它们固定在基底上。对单个金纳米粒子的定位精度可以达到 50 nm。如图 1.3 所示，图 1.3 (a) 为实验装置示意图，采用的是暗场显微镜、浸油物镜、532 nm 的激光，100 倍浸油物镜用于收集散射光和聚焦激光至样品上，样品位置由压电驱动步进电机控制，图像通过数码相机获取；图 1.3 (b) 为一个金纳米粒子下降过程中受到的光阱力示意图；图 1.3 (c) 为计算得到的带正电的金纳米粒子在带正电的硅表面衬底附近所受静电力、范德瓦耳斯力以及它们的合力与距离的关系；插图表示为了压印金纳米粒子，要求光阱力大于合力，方向向下。图 1.4 采用光镊压印金纳米粒子，其中，图 1.4 (a) 为计算所得的高斯聚焦光作用于直径 80 nm 的金纳米粒子时径向和轴向光阱力与位置的关系，箭头为力的方向；图 1.4 (b) 为被压印的金纳米粒子暗场图像，两个图案分别为“CeNS”和“nim”。

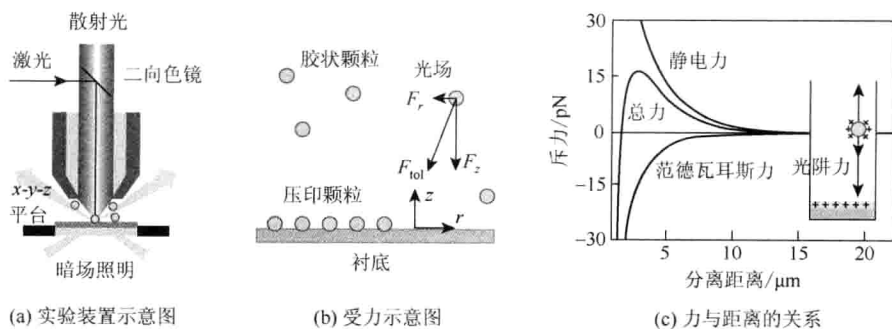
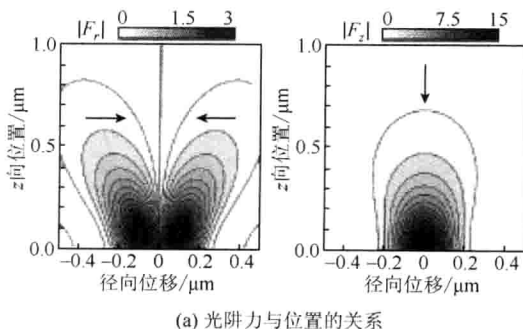
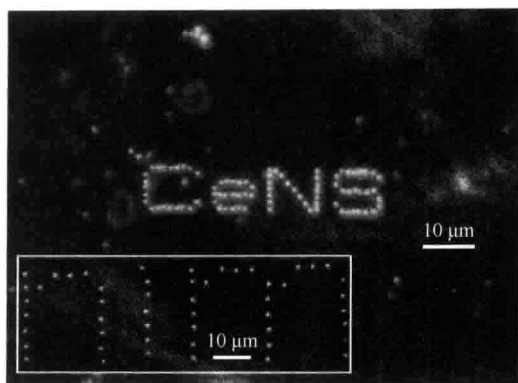


图 1.3 金纳米粒子的压印^[23]



(a) 光阱力与位置的关系



(b) 暗场图像

图 1.4 采用光镊压印金纳米粒子的结果^[23]

光镊技术在其发展过程中出现了一些新的形式和技术，如将整形后的贝塞尔光束聚焦产生的光阱控制微粒上下移动^[24]，利用拉盖尔-高斯（Laguerre-Gauss, LG）光束生成的光阱旋转微粒^[25]，在光镊光路中加入扫描镜二维控制微粒^[26]，采用光纤光镊捕获和移动粒子等^[27]。

随着光捕获及相关研究的发展，国内众多的研究小组也开展了相关的工作。在对光镊技术的研究上，起步较早的有中国科学技术大学物理系李银妹小组，他们研制出国内首台纳米光镊，进行了相应理论分析，并有相关译作出版^[28]。中国科学院物理研究所张道中小组采用光镊进行了 SpoIIE 蛋白在 DNA 上运转速度和移动步幅等方面的研究^[29]。西安大学喻有理小组提出了一种应用光镊技术测量细胞表面电荷的方法^[30]。中国科学院西安光学精密机械研究所对产生的类似贝塞尔光束的环形光束进行了理论分析和实验研究^[31]。天津大学超快激光实验小组利用飞秒激光实现了对人体血红细胞的稳定捕获^[32]。中国科学院上海光学精密机械研究所进行了脉冲光镊分离和捕获粒子的数值模拟^[33]。北京理工大学高明伟等利用 LG 光束实现了对微米级微粒的俘获和旋转^[34]。此外，还有清华大学、复旦大学、同济大学、大连理工大学等高校和科研机构也分别进行了相关研究或探讨。

1.2 全息术简介

全息术这个术语是由 Gabor 在 1948 年首先提出的^[35]。20 世纪 60 年代激光的问世，解决了高相干性与大强度光源问题，全息术得到了迅速发展，在许多领域获得应用。

1.2.1 全息术原理

全息术是利用“干涉记录、衍射再现”原理两步实现无透镜成像过程，用干涉记录一个三维物体发出的光波前，然后再通过衍射让它再现。第一步，把具有振幅和相位的物光波和参考光波相干涉，干涉条纹以强度分布形式记录成全息图；第二步，用再现照明光波照射在此全息图上，全息图后衍射光场中包含再现的物光波，它们叠加形成物体的再现像。图 1.5 为全息图记录 and 再现示意图。

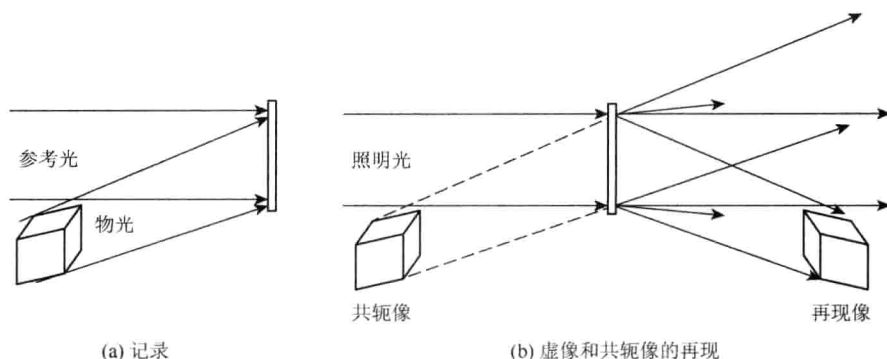


图 1.5 全息图记录和再现示意图

1.2.2 计算全息图

早期，记录全息图上条纹的方法是采用相干光源和高分辨率的光致抗蚀剂记录材料，此技术称为光学全息术，在全息图记录阶段，需要实际物体存在。1966 年，Lohmann 等引入第一幅计算全息图，实现了合成形状的全息重现^[36]。计算机产生的全息图不仅可以全面地记录光波的振幅和相位，而且能综合复杂的或不存在的物体。计算得到的全息图可以通过光刻、激光直写等技术转录到硅片、有机光聚合物等材料上，制成衍射元件，也可以将计算全息图下载到空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 显示，然后用相干光照明的光学系统来重构。计算全息已应用于二维和三维物体显示、光信息存储和处理、全息光学元件的制作、全息干涉计量等方面。图 1.6 给出了一幅作者设计的计算全息图及其三平面重构图像。

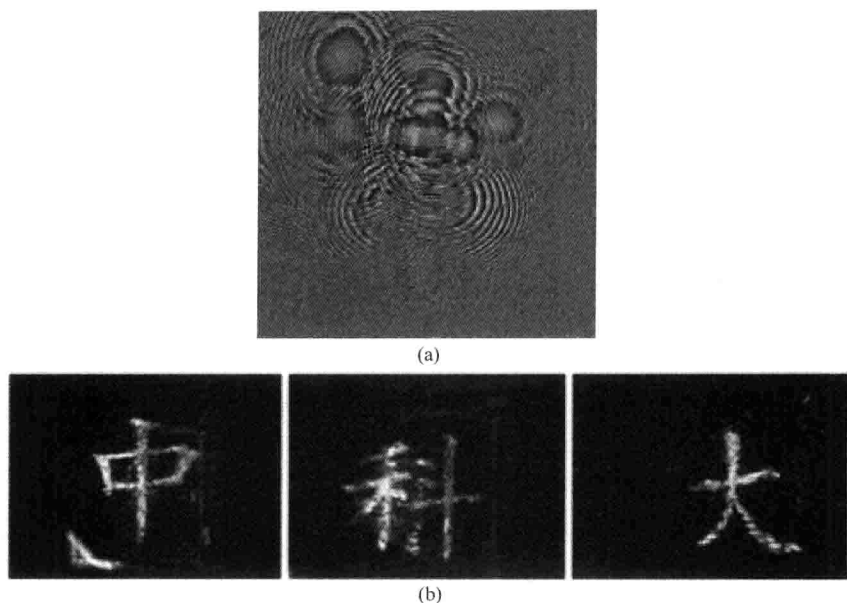


图 1.6 计算全息图 (a) 及其三平面重构图像 (b)

1.3 全息光镊技术的产生和发展

单光束光镊一次能操纵一个或两个离散的粒子,在很多领域得到了重要应用。但在一些情况下,需要一次多点地访问更普遍、更复杂的系统,单光束光镊便不再适用了。物理光学的最新进展表明,可以通过巧妙地修改单束光的波前来构建多光阱,实现一次多点的操纵。与一次只能捕获一个微粒的单光束光镊相比,多光束光镊不仅可以同时产生多个光阱,而且可以实时控制光阱的排列位置,大大提高了实验效率。基于多光阱的光学显微操纵可以为我们提供前所未有的访问微观世界的机会。

目前有很多种产生多光束光镊的方法,如最简单的利用多个激光器出射的光束耦合进同一个光镊系统形成双光镊、三光镊等^[37, 38],使用多光束干涉法产生多光点阵列形成多光束光镊^[39, 40],使用一簇光纤束产生阵列光点的多光束光镊^[41]。采用扫描镜或声光调制器产生的扫描光阱^[42]虽然是用单个快速扫描光镊对多个粒子进行捕获,但是单光镊在移动到下一个粒子之前,需要在每个粒子处作短暂停留,重新定位多游动对象中个体所需要的时间限制了多粒子图样复杂度。此外,扫描光镊还被限制在透镜的焦平面上操纵。目前,研究最多、应用最为广泛的方法是全息光镊。最早的全息光镊由芝加哥大学 Dufresne 等^[43]于 1998 年实现,他们使用衍射光学元件将准直的激光束分成多个独立的光束,通

过强会聚透镜聚焦后形成多光镊。全息光镊就是利用全息元件构建的具有特定功能的光场而形成的光镊。传统的全息元件是利用底片记录下物光波和参考光波相干涉形成的图样,用原始的参考光波照射全息元件,就能再现出物光波光场。但是,这种相干光干涉制作的全息元件存在衍射效率低、制作程序费时和通用性差等缺点,所以并不适合在全息光镊中广泛应用。

随着科技的发展,采用计算机控制的器件如 SLM,通过加载编制的全息图,生成所需的衍射元件,取代专门制作的衍射元件,不仅降低制作成本,而且使全息光镊具有动态控制能力,功能和灵活性大大地提高,因而被看成是光镊技术的第二次革命。

目前的全息光镊系统中,SLM 分为相位型和振幅型两种,常见的主要有扭曲向列液晶空间光调制器、铁电质液晶空间光调制器、数字微镜阵列、磁光空间光调制器、声光调制器和多量子阱空间调制器等。

计算机寻址的液晶空间光调制器工作时,先由计算机程序生成一幅数字全息图,该全息图以电信号的方式输入 SLM 中,改变其液晶层中液晶分子的光学性质,从而实现对入射光场的调制。一束平行光经过 SLM 后,它的振幅或者相位,或者这两者,都可能发生改变;不过,对光波的振幅和相位同时独立控制的结构不容易实现,所以,一般应用的 SLM 只对光波的振幅或者相位之一进行调制。如果利用多个 SLM 分别对光波的振幅和相位进行调制,那么能获得更复杂的光场分布。

图 1.7 为全息光镊装置示意图^[44]。激光经过扩束准直后入射到光学衍射元件上,反射或透射的光束经过衍射被调制成事先设计好的多光束。多光束耦合进显微系统,聚焦在样品中成为多光阱阵列。图 1.7 左下方为计算机生成的全息图,用于显示在 SLM 上。图 1.7 右下方为得到的 20×20 光阱阵列,400 个直径 800 nm 的聚苯乙烯微球被捕获。

利用全息技术可以获得多达几百个光阱^[45]的全息光镊阵列,结合计算机技术,还可以对其中单个光阱的特性进行动态的改变。这样产生的实时光阱可以对运动的和高分散的物体进行捕获,如病毒、小胶体以及游动的细菌。

全息光镊还可以产生贝塞尔型^[46]光阱以及带有角动量的光学漩涡^[47]光阱等。这些非寻常的光阱可以在像平面或光轴方向调整、旋转物体。这些功能进一步扩大了全息光镊的应用范围,使之成为交叉科学研究殿堂中的一朵奇葩。

全息光镊的特点是可以自由控制多个粒子,使得粒子的融合、吸附以及粒子间或粒子与表面的相互作用的研究得到简化,如将病毒植入细胞或将精子植入卵细胞,以及用多功能的小球和表面探测分子结合等。通过观察光阱中物体的行为,还可以对物体或周围环境的特性进行精确测量。多光阱可用于单分子、细胞膜等拉伸或弯曲实验。这类实验可以获取许多系统中弹性模量、表面能以及吸附力等

信息，同时简化了微观尺度机械特性的研究。

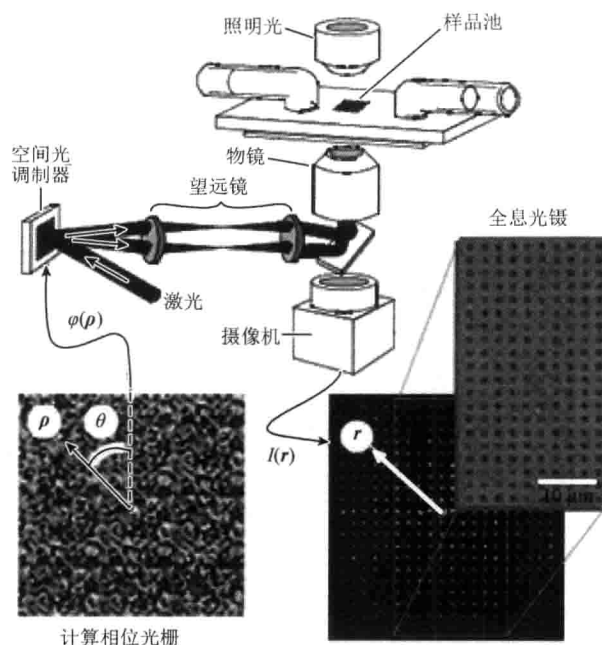


图 1.7 全息光镊装置示意图^[44]

全息光镊可以直接将介观物质组装成不同成分、结构分层的三维功能系统，如光子回路元件、集成传感器阵列和高密度数据存储装置。将这种组织能力和基于光镊的高空间分辨光化学法结合，为光学组装特征尺寸从纳米到毫米以及超越这一范围的新材料和新装置带来了前景。

在微机械和微流体中，采用全息光镊适当地修改光的波前，可以很容易实现运动和流量的控制。光学微机械可以加快芯片实验室器件用于诊断、传感、检测、病理和药物研发。同样的波前整形技术可以分类和净化微小液流中的材料，并将它们引向进一步的净化和分析，可以将光学测试和光学制造高度集成。因此，使用一台全息光镊仪器便可实现液流、分类、组织、合成和装配。

在所有这些领域中，全息光镊技术将宏观世界和基于物理、化学和生物学的微观系统应用连接起来。

国际上发达国家采用全息光镊技术开展了一系列的研究工作。例如，美国纽约大学的 Plewa 等采用全息光镊技术加工碳纳米管^[48]，英国格拉斯哥大学的 Sinclair 等和牛津大学合作开展了采用全息光镊将微粒组装成三维晶体结构等方面的研究^[49~52]。2005 年，美国加利福尼亚大学伯克利分校的 Chiou 等^[53]将全