第1章

光致微纳米空化气泡导言

激光诱导水中空化气泡产生过程中,随着激光能量的增加,液体水会产生不同 的物理响应。根据其产生机制将光致空泡细分为激光诱导光致击穿空化气泡(简 称光致击穿空泡)以及纳米颗粒介导的热致空泡(简称热致空泡)。高功率密度脉 冲激光聚焦在液体中时,聚焦区域吸收激光能量,通过多光子电离、碰撞电离等形 成等离子体,随后空化气泡也随即产生,该空泡称为光致击穿空泡。热致空泡的产 生过程通常为,一定波长的激光通过表面等离子体共振效应加热纳米颗粒,能量沉 积引起的热效应在纳米颗粒周围形成微小空化气泡,该空泡范围多为微米纳米量 级,故称为微纳空泡。该类空泡在生物医学领域有广泛的应用,诸如辅助药物递 送、增强治疗效果及直接作用的细胞手术等。下面将具体介绍两类空化气泡的研 究现状。

1.1 激光诱导光致击穿空化气泡

击穿通常也称为电介质击穿,是指加在电介质上的电场强度超过某一临界值 时,电介质绝缘性能完全丧失的现象。加在电介质上的电场既可以是直流电场也 可以是交变电场。依据所加电场的性质不同(如电场强度、电场频率),击穿现象又 有很多物理分支^[1,2]。人类最早从闪电中观察到了大气击穿现象。自然界中暴风 云的底层为阴电,顶层为阳电。正电荷和负电荷彼此相吸,但空气不是良好的导 体,所以不能发生电荷中和。正负电荷逐渐累积,到一定程度时正负电荷形成的电 场强度超过空气电离阈值,空气电离化,形成闪光。就其物理本质而言,该现象是 云层中聚集的正负电荷形成的巨大直流高压,在高压作用下空气中共价带电子被 激发到导带,并经雪崩效应短时形成巨大的自由电子流。此时绝缘体空气变为导 体。这种由直流电压引起的击穿叫直流击穿(DC breakdown)^[3]。

随着交流电的发明,人们发现,高频高压电路或继电保护中原本用来绝缘的材料在交流电压超过一定阈值条件下开始变得导电。这种由交流电压引起的击穿现象称为交流击穿(AC breakdown)。目前亚纳秒高压脉冲引起的电介质击穿是一个研究热点^[4]。随着微波通信、雷达领域的发展,人们观察到高速振荡的毫米波在脉冲能量很高的条件下也能使绝缘体导电。这种由交变的毫米波引起的击穿现象称为微波击穿(microwave breakdown)^[5]。伴随着 1960 年激光的发明,人们首先观察到高能量激光脉冲对光学组件等宽禁带透明电介质形成击穿^[6]。这种由激光引起的击穿现象称为光学击穿(optical breakdown)或激光诱导击穿(laser-induced breakdwon)^[7]。本书沿用经典译籍中的术语——光致击穿^[8]。

纵观击穿现象发展过程,随着技术的演变,电磁波频率由低频逐渐发展到高频, 击穿现象也由直流击穿发展到光致击穿。人们对固体、液体、气体物质都进行了广泛 的研究^[7,9-12]。在气体中以惰性气体光致击穿以及多光子物理研究较广^[7,13]。在固 体中,以石英(SiO₂)为代表的宽禁带透明电介质研究相对广泛^[11,14]。液体光致击穿 的研究起步相对较晚,但随着生物医学光学的快速发展,近年来这一领域引起了广 泛关注^[15-19]。因此,如果以电磁波频率为横轴,以气、固、液为并列研究的纵轴,则 本书研究的是击穿现象中所涉及的光致击穿,如图 1-1 所示。



以上是从电介质击穿角度而言的。就激光与物质相互作用而言,光致击穿是 其中一个重要分支^[2]。伴随着激光技术的进步,激光脉冲能量的增大,以及激光电 场力强度的增大,所引起的物理现象也越来越剧烈。图 1-2(a)为激光功率密度历 史演变图,Maiman 最早发明的激光为红宝石连续激光。后来随着调 Q 技术的发 明,产生了微秒、毫秒以及纳秒脉冲激光。这些技术将激光带入医学领域,产生了 医学激光以及生物医学光学^[8,20]。

锁模技术的发明将激光脉宽压缩到皮秒甚至飞秒量级,同时也将激光技术带 入多光子物理和短脉冲激光医学领域。1985年,啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification,CPA)的发明为原子物理研究打开了大门^[21]。本书研究范畴属于生 物医学光学领域。



(c)

图 1-2 (a)激光功率密度历史演变图及激光医学;(b)激光与生物组织相互作用各种机制 及光致击穿效应;(c)短脉冲激光在水中诱导光致击穿效应产生的各种物理效应; 图(a)引自文献[2],图(b)引自文献[8],图(c)使用了文献[22]~文献[25]中的部分图片 (请扫][X页二维码看彩图)

在生物医学光学领域中,随着激光能量及脉冲脉宽的变化,激光与生物组织相 互作用的机制迥异^[8]。如图 1-2(b)所示,在连续激光作用下以光化学作用为主; 在毫秒脉冲激光作用下主要为光热作用;纳秒激光以光蚀除作用为主;纳秒以下 的短脉冲激光常发生等离子体诱导蚀除和光致击穿现象^[8,17]。

水中光致击穿现象本身并非单一物理现象,而是由如图 1-2(c) 及图 1-3 所示 很多物理现象耦联在一起的。随着激光能量的增加,相应地出现:激光诱导低密 度等离子体现象^[15];激光诱导微纳米尺度空化气泡^[24];激光诱导微米尺度巨型 空化气泡,空化气泡膨胀、闭合等流体力学现象^[28];空化气泡-空化气泡^[29]、空化 气泡-固体边界作用时微射流、湍流等复杂流体力学现象^[30];伴随空化气泡一起的 还有冲击波的形成,以及空化气泡坍缩时冲击波辐射等声学现象^[22];激光能量更 高时能观察到明亮的等离子体;在小数值孔径下能观察到等离子体自聚焦、非线 性传播及激光克尔效应等等离子体物理现象^[23]。这些现象构成了水中光致击穿 效应的有机整体,很多现象都是耦联在一起而无法分割的。



(a)自由场中的光致击穿过程示意图;(b)光致击穿初期的等离子体、空泡和膨胀冲击波图 像^[26];(c)空泡动态振荡过程(标尺为 200 μm);(d)Obreschkow等拍摄的有、无重力场下空泡 坍塌形成的冲击波及射流的形成^[27]

(请扫IX页二维码看彩图)

国内外学者在水中光致击穿理论和实验方面开展了广泛的研究。在理论建模 方面,1991年,Sacchi^[31]发表了第一篇关于水中光致击穿效应的文章。在这篇文 章中,他引用了 Boyle 和 Williams 关于水电离能为 6.5 eV 的观点,采用"幸运电 子"结合雪崩效应的数学模型解释了不同种类液态水或溶液中击穿阈值。1995 年,Kennedy^[32]在参考 Bloembergen^[1]及 Shen^[33]的思想上采用 Drude-Shen 雪崩 电离模型建立了较早的水中光致击穿理论模型。1997年,Kennedy 发表了水中光 致击穿领域相对全面的综述^[34],该综述对脉冲激光诱导水中光致击穿的形成机 理、物理模型、影响因素、击穿过程及实际的应用做了较为详细的阐述。1999年, Noack 和 Vogel^[35]在 Kennedy 的基础上改进了光致击穿模型,并将模型结果与实 验结果进行了系统比较。2005年,Vogel等^[15]在 Noack 模型的基础上采用一阶近 似雪崩电离模型对飞秒激光细胞微手术进行了研究。2015年,Linz等^[36]通过纳 秒光学参量振荡器(OPO)光致击穿实验证实了液态水能带中存在中间能级,提出 了液态水能带结构优化模型。 必须要提到的是,水中光致击穿理论的进步一直受益于透明电介质光致击穿 理论的发展。1995年,Stuart等^[37,38]采用福克尔-普朗克(Fokker-Planck)动力学 理论研究了飞秒-纳秒激光在石英光致击穿中的机理,较早地研究了电介质中导带 电子能量谱,推导出长脉宽条件下瞬态雪崩电离率近似于 Drude-Shen 模型。2004 年,Rethfeld^[39]仔细研究了飞秒脉冲诱导的瞬态雪崩电离过程,提出了多重速率方 程来描述反向轫致辐射吸收时间对雪崩电离率的影响。2009年,Christensen 和 Balling^[40]解决了多速率模型中碰撞电离后剩余能分配的问题。基于 Rethfeld 的 多速率方程,2016年,Linz等^[41]考虑液态水优化能带结构,计算了飞秒激光水中 光致击穿阈值随波长的变化关系,得到液态水的若干重要参数。基于 Christensen 和 Balling 的工作,2019年,Liang等^[42]详细研究了多速率模型中的剩余能分配问 题,得到了雪崩电离率和导带电子平均动能的渐近解析解,提出了适用于飞秒激 光-生物分子改性研究的多速率模型。基于液态水优化能带结构及液态水若干关 键参数,近年来 Liang等^[26,43-45]建立了一个涵盖等离子形成、空化气泡振荡和冲 击波辐射的多物理耦合模型。

随着计算机计算能力的提高,光致击穿模型开始朝着时空域模拟方向发展。 2002年,Fan 等^[46]延续了 Noack 在 1999年的工作,将时间域扩展到一维空间中, 计算了击穿阈值并研究了参数对阈值的影响。2007年,Zhou等^[47]采用几何光学 传输模型,将等离子体密度分布计算扩展到三维时空域,主要阐述激光参数对等离 子屏蔽和等离子长度的影响。2010年, Jiao 等^[48]在 Noack 模型的基础上采用热 辐射传输理论中的控制方程,结合离散坐标算法,计算了等离子体密度在空间的分 布,解释了飞秒、纳秒激光在水中诱导等离子体动力学上的差异。2016年,Jukna 等^[49]在时空域模拟了 50 fs,800 nm,290 mJ 的飞秒激光脉冲通过 NA=0.07 的物 镜在水下产生的成丝现象。他们采用非线性薛定谔(Schrödinger)方程模拟激光脉 冲传播过程,采用 Noack 模型^[35]模拟了激光诱导水中等离子体形成。2019年, Hernandez-Rueda 等^[50]采用麦克斯韦(Maxwell)方程结合有限时域差分算法 (FDTD),模拟了飞秋激光在水表面引起的非线性能量沉积过程,发现能量主要沉 积在表面以下 70 nm 的浅层,能量密度高达 5.7 kJ/cm³,压力高达 4×10^3 MPa。 针对空泡振荡和冲击波发射等方面,Ohl等^[51]对空泡的振荡过程、冲击波的传播 及空泡坍塌引起的发光现象进行了详细的介绍和总结; Lauterborn 和 Kurz 对液 体中的空泡振荡过程、研究进展及相互作用展开论述^[28]。2013年,Lauterborn和 Vogel 对光致击穿过程所形成的冲击波进行了综述性的介绍^[52]。在实验研究方 面,Docchio等利用超高速扫描摄影机拍摄到了水中光致击穿的移动击穿现象^[53], 随后研究了不同脉宽激发下等离子体的发光过程^[54]。Vogel 课题组在激光诱导 等离子体形成^[23,55]、飞秒激光诱导微纳米尺度空化气泡^[15,24]、空泡相关冲击波形

成及辐射^[22]、光致空泡-固体边界相互作用^[30]、空化气泡-空化气泡相互作用^[29]等 方面开展了广泛深入的研究。Venugopalan 课题组深入研究了纳秒激光在水^[56] 和水基媒介中[57]诱导的等离子体大小、冲击波压力以及空泡半径随激光能量的变 化关系。Schaffer 等^[58]利用超快阴影摄影术结合散射光技术,在 100 fs~10 µs 时 间范畴研究了光致空泡半径及冲击波压力演变曲线,获得了水中电子-离子能量转 移时间约为 20 ps 这一重要参数。Baumert 课题组在另一独立实验中通过时间分 ·辨反射频谱仪证实了这一参数的准确性,并获得了电子-空穴复合系数^[59]。此外, 该课题组利用整形飞秒激光,通过超快光谱干涉仪测量了瞬时等离子体密度以及 自由电子平均碰撞时间^[59-61]。Hammer、Nahen 及 Vogel 等^[55,62],对不同脉宽、不 同能量的脉冲激光产生的等离子体屏蔽效率进行了较为系统的研究。Schaffer 等[58]利用两束飞秒激光记录了光致击穿过程中,等离子体时域上的动态变化过 程。对于空泡振荡和冲击波发射方面,Lim 等^[63]利用空间光调制器分束激光脉 冲,在水中产生了多个形状和尺寸的空化气泡。Vreugdenhil 等^[64]利用多束激光 脉冲在空气/水表面产生了多个空化气泡及伴随冲击波辐射,研究了多冲击波辐射 特性。Vogel 课题组系统地研究了击穿过程中空泡能量分布^[65-67]、击穿阈值^[35]、 空泡及冲击波演变过程^[68,69],以及弹性壁对空泡振荡的影响。同时,该课题组利 用紧聚焦的飞秒激光和散射光检测技术,成功地产生并精确地检测到百纳米量级 的空化气泡^[24]。

在空泡动力学中,用于描述空泡半径随时间变化的模型主要有 Rayleigh-Plesset模型^[70],Keller-Miksis模型^[71]和 Gilmore模型^[72]。早在 20 世纪初,瑞利 (Rayleigh)首先建立了在均匀无限远、无黏性及不可压缩的流体环境下的空泡动力学模型^[73]。Plesset在瑞利模型的基础上加入液体黏性、表面张力等对空泡运动的影响,改进瑞利模型形成 Rayleigh-Plesset 空泡运动方程;而 Keller-Miksis 模型则进一步考虑了液体的可压缩性和外源压力场的加入。Gilmore 模型则全面考虑了水-蒸气界面表面张力、黏性力及液体的可压缩,可以非常全面地描述空泡动力学、阻尼耗散及声场的发射等过程。

由于空泡振荡过程受到外界因素如壁、压力场及超声场等的影响非常大,许多 课题组也开展了相关方面的研究工作。Supponen等^[74]拍摄到空泡非对称坍塌时 会形成多个的坍塌冲击波,且其强度会衰减。Sankin等^[75]将一个外源性的强冲击 波作用于空泡上,最终导致空泡振荡周期被显著缩短而坍塌冲击波强度被明显增 强。Baghdassarian等^[24]通过测量光致击穿空泡坍塌时的发光光谱,推导出其坍 塌时的温度可达 7800 K,并发现坍塌过程会导致空泡内羟自由基(OH*)含量的 增加。Kurz等^[76]通过外源性的超声声场来控制空泡的振荡过程和空泡坍塌的发 光强度,发现空泡的射流方向及速度等与界面参数密切相关。Supponen等^[77]在

距离水面非常近的水中诱导光致击穿,形成的空泡在振荡过程中挤压水面破裂发 生溅射,形成一个非常强的指向水面的射流。Yang 等^[78]研究了无量纲的位置参 数对空泡第一振荡周期、重建空泡振荡周期及射流的强度的影响。Brujan 等^[79]通 讨改变固体壁的弹性模量及无量纲位置参数从而获得不同方向和速度的射流。 Tong 等^[80]发现,在固体界面形成的空泡溅射会形成一个指向固体界面且速度非 常大的射流,进而对固体界面产生明显的损伤。Gerold 等^[81]通过外源性的超声声 场来控制光致击穿空泡的射流方向。Tinne 等^[82]对单脉冲进行分束后,用同一个 物镜聚焦到水中形成两个击穿点,来研究不同位置、大小的空泡间的相互影响。南 京理工大学韩冰等^[29]利用两个脉冲激光器进一步研究了具有不同相位差、相对大 小及相对位置的双空泡振荡行为,特别对射流的形成进行了系统的研究。Chen 等[83]研究了在狭窄通道内多个固体壁影响下的双空泡相互影响行为。中国科学 院大学田野等^[84]研究了聚焦角度对等离子体形成的影响,并通过增加聚焦角度的 方式来增加等离子体的稳定性。陕西师范大学曹辉和尚志远^[85]开展了液体光致 击穿及光致声场辐射方面的研究。南京理工大学陈笑^[86]开展了高功率激光与水 下物质相互作用过程与机理的研究。南京理工大学朱微^[87]研究了激光诱导水中 击穿阈值。海军工程大学宗思光等[88]采用高速摄影的方法研究了水中激光击穿 产生的等离子体腔体、空泡脉动、声波特性等综合效应。江苏大学任旭东等^[89]系 统地总结了激光空化强化技术的理论、应用和发展现状,研究了激光诱导水下空化 效应在空化空蚀除、激光加工及流体机械等方向的应用。

在实际应用方面,学者们利用水中光致击穿效应在细胞和生物组织微纳米手 术中开展了广泛的研究。在细胞纳米手术方面,König 课题组首先开展了飞秒激 光细胞膜光穿孔以及染色体切割研究^[90,91]。张镇西课题组在激光细胞微手术方 面开展了一定的工作^[92-94]。Ben-Yakar 课题组利用飞秒激光照射秀丽隐杆线虫神 经轴突,研究线虫神经轴突再生^[95]。Shen 等^[96]开展了飞秒激光切割细胞线粒体 的研究。Schmalz 等^[97,98]利用飞秒激光照射细胞核内染色质,开展了活细胞飞秒 激光-DNA 损伤及修复研究。在生物组织微纳米手术方面,Yildirim 等^[99]利用 1.3 μm 飞秒激光对活鼠脑皮质进行多光子成像,并测量了深层脑皮质光致击穿阈 值。Orzekowsky-Schroeder 等^[100]利用激光脉冲在小鼠小肠上皮细胞中产生微米 尺度空化气泡,造成小肠损伤,利用多光子显微镜实时观察免疫系统修复损伤的过 程。Hutson 和 Ma^[101]利用纳秒激光在果蝇胚胎中产生空化气泡,研究空化气泡 半径随激光能量变化情况,分析 NADH 等生物活性分子在降低击穿阈值中所起到 的作用。在眼科屈光手术方面,Vogel 等^[102]开展了亚纳秒微芯片激光切割眼角膜 研究,发现亚纳秒微芯片激光切割精度不亚于飞秒激光切割精度。Freidank 等^[103]展示了微芯片激光切割角膜结合生物相容填充液用以矫正远视眼的新技

术。在光致击穿应用方面,Lazic和 Jovicevic^[104] 对液体中光致击穿光谱在元素检测方面的机理、方法及应用等进行了介绍。在生物组织消融方面,Vogel等^[17] 对脉冲激光在生物组织消融方面的机制和过程进行了详细的论述。Amendola和 Meneghetti^[105]介绍了脉冲激光在纳米材料制备方面的应用。Quinto-Su等^[106]利用 激光诱导的空化气泡产生的微射流致使红细胞发生形变,研究红细胞的形变能力。

1.2 纳米颗粒介导光热空化气泡

近十年来,各种纳米材料的研究和应用取得飞速的发展,大量具有开发前景的 新型纳米材料脱颖而出,许多纳米材料的组装体已经应用于诸多学科领域^[107]。 其中,贵金属纳米颗粒(nanoparticle,NP)具备宏观材料所不具备的物理特性,如量 子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应及介电限域效应等。除此之外,金纳米球(gold nanoparticle)和金纳米棒(gold nanorods)以其独特的物理化学性质、表面等离子 共振效应、良好的生物相容性、表面易修饰性,以及其制备方法成熟等特点,受到人 们的广泛关注,进一步促进了纳米颗粒介导的激光应用的发展,其应用涉及光化 学、光学、光电子学、分析化学以及生物医学等多个领域(图 1-4)。



图 1-4 激光与纳米颗粒相互作用的应用领域

图 1-5 为脉冲激光与纳米颗粒相互作用时所产生的多种效应示意图^[108]。当 特定波长的激光入射到纳米颗粒时,颗粒表面的自由电子通过共振吸收光子,随后 电子能量通过电子-声子耦合传递给原子;再通过声子-声子耦合,能量由高动能原 子传递给低动能的原子;最后温度由纳米颗粒表面传递到周围液体介质中,引起 固-液相表面温度升高,直至超过相变温度并引起介质相变^[108]。在此过程中,激光 通过表面等离子体共振效应加热纳米颗粒,纳米颗粒的电子通过共振吸收入射激 光光子,局域能量沉积引起的热效应引起纳米颗粒周围物质的相变,形成微纳尺度 空泡。本书将此基于激光热效应产生的空泡,称为激光热致空化空泡。需要说明 的是,国外研究者将上述现象所产生的空泡归为 plasmonic bubble^[109,110],直译为 等离子体激元空泡。国内研究者通常将等离子体空泡定义为由等离子体产生并诱 导空泡产生的现象^[88,111,112]。为了区分两者概念,本书采用"激光热致空泡"的概 念,与文献中的 plasmonic bubble 不再进行区分。



图 1-5 脉冲激光与纳米颗粒相互作用时产生的多种效应示意图^[108]

国外学者对短脉冲照射纳米颗粒进行了深入研究。Hartland 等^[113,114]利用 飞秒时间分辨率光谱法检测了飞秒激光作用下金纳米球周围能量分布的变化,并 建立了相应的热动力学模型。Kotaidis 课题组^[115]对经过超短脉冲激光照射后,金 纳米颗粒周围形成的纳米级空泡的形成机理进行了探究。在 Kotaidis 等的实验研 穷基础上,Ekici 等^[108]对飞秒激光与纳米金棒相互作用的机制做了深入的理论研 究,建立了水环境中纳米棒内、界面处以及周围环境的热能传导方程。Fales 等[116] 联合透射电镜、动态光散射及分光光度法等多种表征方式,开展了纳秒脉冲 激光照射下金纳米球损伤阈值的实验探究。Lapotko课题组^[110]从实验角度出发, 依次讨论了激光参数,金纳米颗粒的团聚态、尺寸及结构对热致空泡的光学与机械 性能影响。Lombard 等^[117]利用基于自由能密度的扩展水动力学模型,探讨了纳 米颗粒界面处的流体动力学问题,研究发现两相界面处形成的纳米空泡半径随着 时间的演变呈现非对称性,即在空泡演变的不同阶段,空泡将以不同的传热形式进 行热量传递,并由此推论空泡的膨胀运动属于绝热膨胀,而坍缩运动可以用等温演 化来描述。Neumann 和 Brinkmann^[118]利用时间分辨显微成像装置对微纳空泡对 脉宽依赖性进行了探究,研究发现,在12 ns 短脉宽激光激励下,空泡最大演化尺 寸随着能量密度的增加而增加,当把脉宽延展至240 ns 及1200 ns 长脉宽区域,随

着激光能量密度的增加,热化空泡的演变尺寸具有自限性,不再随着能量密度的变化而出现明显的变化。2016年,里昂大学的 Lombard 等^[119] 对影响微纳空泡的最大生存时间、最大演化半径及产生数量等因素进行了一系列探索,研究表明,微纳空泡的最长生存时间及最大演化半径主要由弹道热通量所控制,泵浦激光脉宽及能量密度可影响空泡的产生数量及振荡周期。Merabia 等^[120]利用水动力自由能模型(hydrodynamic free-energy model)探讨了纳米颗粒表面形成空泡的条件,发现拉普拉斯压力(Laplace pressure)、固液面的接触角、界面热阻等诸多物理因素都会对纳米颗粒周围液相面造成影响。

在实际应用方面,研究学者将纳米金介导的光热效应用于生物医学(如癌症诊 断与治疗)、成像(如光声成像)、基因工程(如基因转染)、能源转换^[121]等领域。利 用纳米颗粒光穿孔的方式可成功实现基因转染,Pistillides 等^[122]将 20 nm 纳米颗 粒与淋巴细胞经过抗原-抗体结合,经激光对结合体进行照射,提高了细胞膜的通 透性,从而将外源不透膜分子导入细胞内,同时对细胞成活率不造成影响。 Braeckmans 课题组^[123]利用 7 ns 脉冲激光照射产生热应力冲击波,与 70 nm 金纳 米颗粒共孵育后的 H1229 EGFP 细胞相互作用,使得转染效率提高到 80%以上。 除此之外,如果采用较高的激光辐射剂量,纳米颗粒介导的光热效应也可以用于蚀 除某些特定类型的细胞,例如混合细胞群的纯化,新生血管性疾病的治疗以及癌症 的诊疗。Durr等^[124]采用飞秒振荡器照射纳米颗粒-抗体螯合体进行原位成像,从 而识别出被激光活化处理的细胞群。Lukianova-Hleb等^[109-110]将金纳米颗粒导 入目标细胞后,通过激光照射纳米颗粒激发和调控细胞内热化产生的空泡,实现了 非损伤性光学散射成像。最近 Li 等^[125]采用程控空间光调制器(spatial light modulator)调制连续泵浦激光,将其作用于多孔金纳米盘阵列覆盖的微流体通道, 实现了在多个位点处同时产生微米空泡的技术。此项全新的光学技术诱导产生的 空泡具有位点任意可调、无需介导、振荡周期长可控等特性,适用于微流控等研究 领域。

国内学者针对激光与纳米技术结合的应用也开展了相关研究。颜晓梅课题 组^[126]以自行研发的高灵敏流式细胞仪为检测平台,利用金纳米颗粒表面的等离 子体共振特性,通过对纳米金进行单颗粒水平的逐一分析,发展了一种高效快速表 征纳米金的新方法。该方法最小可检测到粒径为 24 nm 的单金纳米球的散射光, 检测速度高达 100~200颗粒每秒,检测正确率最高可达 100%,从而实现飞秒至皮 秒浓度范围的金纳米颗粒的快速尺寸分辨及绝对计数。刘忠馨等^[127]利用 800 nm 飞秒激光对准球壳形纳米颗粒进行照射,使其变为管状结构,并探索了该现象发生 的可能性机制。邢达课题组^[128]利用自主研发的光声显微系统,实现了细胞内非 荧光标记的纳米棒的连续可视化观测,从而解析出纳米颗粒被细胞摄取的过程以