

光波纳米推进技术中的表面等离激元增益光镊作用机理^{*}

于 博^{1,2}, 徐亚楠^{1,2}, 余水淋^{1,2}, 康小录^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要: 为研究天线不同结构对表面等离激元 (SPP) 增益光镊作用的影响, 建立天线-基底的电磁波传输耦合激元电场触发光梯度力的数值模型, 并利用数值模型分析天线不同结构对SPP电场的影响规律, 同时, 这种电场变化规律对光镊增益有直接的数学关系, 基于上述物理机制, 获得不同天线结构对光梯度力产生的优化策略。为验证上述物理机制与优化策略的有效性, 开展纳米颗粒的粒子图像测速 (PIV) 试验, 天线材料为银, 基底为二氧化硅, 纳米颗粒为银, 试验能够完好地观测到纳米颗粒在天线通道的运动情况。结果表明, 光梯度力的增益机制在于激元电场强度和梯度两方面因素, 前者随天线不对称性增强而先增大后减小, 后者呈现一直增大趋势; 纳米颗粒推动作用力的计算误差约为 5.5%~13.8%, 且试验值与计算值的趋势相符, 一方面验证本文研究机理及优化策略的有效性, 另一方面证明 PFP 技术的原理可行。

关键词: 光波纳米推进; 表面等离激元; 光镊作用; 数值计算; 粒子图像测速试验

中图分类号: V439+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 06-200787-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200787

Mechanisms of Optical Tweezing Enhancement by Surface Plasmon Polariton in Plasmon Force Propulsion Technology

YU Bo^{1,2}, XU Ya-nan^{1,2}, YU Shui-lin^{1,2}, KANG Xiao-lu^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: The enhancement of the optical tweezing by the surface plasmon polariton (SPP) has played an important role in the performance improvement of the plasmon force propulsion (PFP) technology. In order to study the effects of the antenna configurations on the optical tweezing enhancement by the SPP, a numerical model to solve the electromagnetic wave transmission and the optical gradient force induced by the SPP field has been established. Based on this model, the pattern of the SPP electric field under different antenna configuration was analyzed numerically, and a direct mathematical relationship was built between the SPP field pattern and the optical tweezing effect. According to the mechanism above, the optimization strategy of the optical gradient force under different antenna configurations was obtained. A nano-particle image velocimetry test was conducted to verify the mechanism and optimization strategy proposed by the present study. The antenna material was Ag, the sub-

^{*} 收稿日期: 2020-10-10; 修订日期: 2021-01-08。

作者简介: 于 博, 博士, 工程师, 研究领域为电推进技术。

通讯作者: 康小录, 硕士, 研究员, 研究领域为电推进技术。

引用格式: 于 博, 徐亚楠, 余水淋, 等. 光波纳米推进技术中的表面等离激元增益光镊作用机理[J]. 推进技术, 2022, 43(6):200787. (YU Bo, XU Ya-nan, YU Shui-lin, et al. Mechanisms of Optical Tweezing Enhancement by Surface Plasmon Polariton in Plasmon Force Propulsion Technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200787.)

strate material was SiO_2 , and the nano-particle material was Ag. The transportation of the nano-particle along the antenna channel could be clearly observed by the PIV test. The main conclusion shows as follow: (1) The enhancement mechanism of the optical gradient force is associated with two parameters, the SPP electric field intensity and the gradient of the field intensity. With the asymmetry of the antenna structure increasing, the former parameter increases first and then decreases, and the latter parameter is growing all the time. (2) The calculation error of the push force of the nano-particle ranges from 5.5% to 13.8% approximately, and the calculation results are consistent with the measuring results. On one hand, the mechanism and optimization strategy proposed by the present study can be validated; on the other hand, the PFP technology can be proved feasible.

Key words: Plasmonic force propulsion; Surface plasmon polariton; Optical tweezing effect; Numerical calculation; Particle image velocimetry test

1 引言

光波纳米推进(Plasmonic force propulsion, PFP)技术是一种结合表面等离激元(Surface plasmon polariton, SPP)与纳米颗粒光镊作用(Optical tweezer, OT)的微纳量级推进技术。主要适用于1~2kg级微纳/皮纳卫星平台。目前,在现有报道中,超声电喷^[1]、微阴极电弧^[2]以及微脉冲等离子体^[3]推进技术均面向于3~10kg级微小卫星平台,但对于3kg以下的卫星而言,仅有光波纳米推进技术^[4]最为适用,该技术特点为质量轻(单机质量<500g),推力小(<1 μN),体积小(<1 cm^3),一般可使用太阳光作为能量来源,是近几年来研制出的新型微推进技术,具有极高的应用前景和研究价值。目前,PFP技术仅完成了原理论证^[4-6]研究,在性能方面尚有较大提升空间,是微推进领域的研究热点之一。

2015年,Joshua等^[4]首次提出PFP的推进概念:当电磁波入射三角形金属-方形绝缘体基底时,在金属狭缝会产生表面等离激元作用^[7-9],狭缝中的激元电场光强是入射波的数十倍,并呈现不均匀分布特性,此刻,若在狭缝中引入金属纳米颗粒,则颗粒会在激元电场的作用下产生光镊作用^[10-12],颗粒沿狭缝垂直方向主要产生相等且反向的光压力,这组光压力作用相互抵消并使得颗粒束缚在光势阱中,而在沿狭缝平行方向主要产生光梯度力,受力方向指向场强下降方向。由此,纳米颗粒在金属-绝缘体基底组成的天线结构中,可以形成定向运动,产生推力。Joshua等^[4]从理论上展示出一个具有35层、86纵列、总长度为5mm的天线组装置,以聚焦的太阳光为光源,当每秒来流颗粒数量为 1×10^9 时,可以实现250nN的推力。2016年,焦蛟等^[5]针对不同天线结构对等离激元作用的影响进行研究,发现局部表面等离激元作用和复合衍射倏逝波作用是影响狭缝内光梯度力

的主要影响因素,并提出梯形天线所触发的激元电场强度高于三角形。2018年,于博等^[6]针对不同纳米颗粒粒径、材料以及空间级联方式对颗粒作用力的影响进行研究,发现纳米颗粒在输运过程中仅与狭缝内电场有关而与磁场无关,这是由于金属颗粒的电子偶极子磁矩为0的原因,并且在空间级联时会引发颗粒从漫游区向光势阱区迁移慢的问题,不利于稳恒推力的形成。

综上,研究人员已针对PFP技术进行了大量理论验证、仿真优化方面的工作,但距离在轨应用依然存在较大差距。根据PFP的研制进程,在当前状态下存在两点问题需要解决:(1)天线结构变化对激元电场的分布规律尚不清晰,并且激元电场特性对光梯度力的影响机制也处于研究空白,相关物理机制与优化策略需要进一步研究;(2)PFP的工作原理尚停留在理论与仿真层面,其可行性与有效性需要进一步验证。

本文建立描述表面等离激元与光镊作用过程的数值模型,针对不同天线结构下的通道内激元电场分布进行求解,获得结构影响电场平均值与电场梯度的变化规律(电场平均值与电场梯度是影响光梯度力的核心因素),进而与光梯度力的分布特性建立联系并讨论,基于这种等离激元诱导光镊作用的机制,提出提升光梯度力的天线结构优化思路与方案。为验证本文研究结果的有效性,开展PFP技术的原理与优化性能验证试验,纳米尺度金属天线由电子束刻蚀技术加工完成(其结构采用优化策略提出的方案),纳米Ag颗粒由柠檬酸钠与硝酸银光催化作用制备,并采用激光器作为光源,以高速摄像机对纳米颗粒运动进行拍摄,获得纳米颗粒运动过程的位移数据,并统计出对应推动作用力,将推动作用力的试验值和计算值进行对比。

2 数值模型

本文数值模型基于PFP天线中的等离子激元诱导光镊作用的物理过程,意在凸显出等离子激元过程对光镊作用的影响。金属-绝缘基底的天线模型如图1所示,入射电磁波取 $-y$ 方向,在金属表面会触发激元电磁场,但由于磁场对纳米颗粒光梯度力的产生几乎无贡献(下文有原因说明),故这里仅给出电场方面的描述,等离子激元电场 $E(y)$ 传输方程^[13]为

$$E(y) = E_0 \cdot \exp[i(k_z \times z + k_y \times y + \omega t)] \quad (1)$$

式中 E_0 为光源振幅, k_z 为沿 z 向波矢,即为等离子激元的表面波矢 k_{spp} , k_y 为沿 y 向的波矢, ω 为入射波角频率, t 为时间。

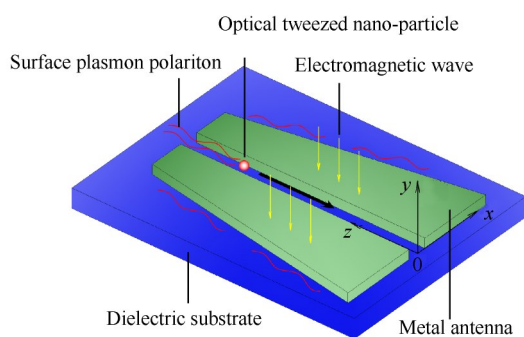


Fig. 1 Configuration of the metal-dielectric antenna system

入射电磁波的频率并不是随意选取,只有当表面波矢与入射电磁波波矢相等时,才会触发表面等离子体耦合^[14-15],因此,式(1)中 ω 需要由下式确定,即

$$k_{\text{spp}} = k_y + mG_y + nG_x \quad (2)$$

式中 G_y, G_x 分别为 y 向和 x 向的空间倒格矢; m, n 为整数。

进一步地,式(2)可求解引发激元共振(等离子体耦合)时的 ω 为

$$\frac{\omega}{c} = \frac{a_0}{m} \left(\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中 a_0 为格子周期; ϵ_d, ϵ_m 分别为基底和金属天线的介电常数。

通道电场中的纳米颗粒可以视为电偶极子,则颗粒体积元所受光梯度力为麦克斯韦张量应力,为电场梯度力和磁场梯度力的总和^[16-17]。

$$f_{\text{grad}} = (p \cdot \nabla) E(y) + \frac{dp}{dt} \times B(y) \quad (4)$$

式中 p 为电偶极子极化电场, $B(y)$ 为通道磁感应强度分布。

由于位移极化的电偶极子磁矩为0,故式(4)右

边第二项可以忽略, p 可描述为

$$p = \text{Re}(\alpha) \cdot E(y) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - ik_{\text{spp}}^3 \alpha_0 / (6\pi)} \quad (6)$$

$$\alpha_0 = 4\pi d_p^3 (\epsilon_p - \epsilon_0) / (\epsilon_p + 2\epsilon_0) \quad (7)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, α 为纳米颗粒的感应极化率, α_0 为纳米颗粒的固有极化率, d_p 为颗粒直径, ϵ_p 为颗粒介电常数。

因此,式(4)可以写为

$$f_{\text{grad}} = \text{Re}(\alpha) \cdot (E(y) \cdot \nabla) E(y) \quad (8)$$

颗粒整体所受光梯度力(对体积 V 进行积分)为

$$F_{\text{grad}} = \iiint \text{Re}(\alpha) \cdot (E(y) \cdot \nabla) E(y) dV \quad (9)$$

式(9)表明,光梯度力受到激元电场的两方面影响:(1)场强大小;(2)场强的梯度。但上述物理参数在不同结构天线中的变化规律较为复杂,很难通过理论推导直接获得,因此,需要通过数值分析来研究内在的物理机制以及相应的优化策略。

3 结果与验证

3.1 计算结果

根据对PFP技术以往的研究^[5],天线结构为双梯形结构时,所获得的激元电场强度要高于三角形天线结构^[4]。因此,本文将延续对双梯形结构天线进行研究。一般地,为使得入射波的波长能够处于太阳光辐射能量的峰值波段(520~580nm),天线通道长度 c 取350~400nm^[5-6],这里取 $c=400\text{nm}$,通道宽30nm。

根据式(8),影响光梯度力形成的核心因素为通道内电场强度和电场梯度,因而对光镊作用的增益机制主要在于获取上述两个物理参数的变化规律。而根据已有理论^[4-5],天线的不对称性结构是引发不均匀激元电场的条件,故本文将针对具有不对称性的天线结构与电场强度均值、电场梯度之间的规律与物理机制进行数值分析。梯形上底长度定义为 a ,下底长度定义为 b ,不同结构天线对激元电场分布特性的影响见图2,数值计算所采用的输入条件:金属天线材料为Ag,厚度5nm,基底材料为SiO₂,厚度100nm,透光率99.84%(制造商提供数据),折射率1.535(制造商提供数据),入射光功率0.1W,入射光与天线角度为90°,光强分布为匀强分布。

图2(a)~(h)均为 $a=40\text{nm}$, b 单独发生改变的情况,随着 b 增大,天线的非对称性逐渐增强,此时,伴随着两个方面的规律:(1)通道内的电场均值先增大,后减小;(2)通道内的电场梯度始终在增大。为

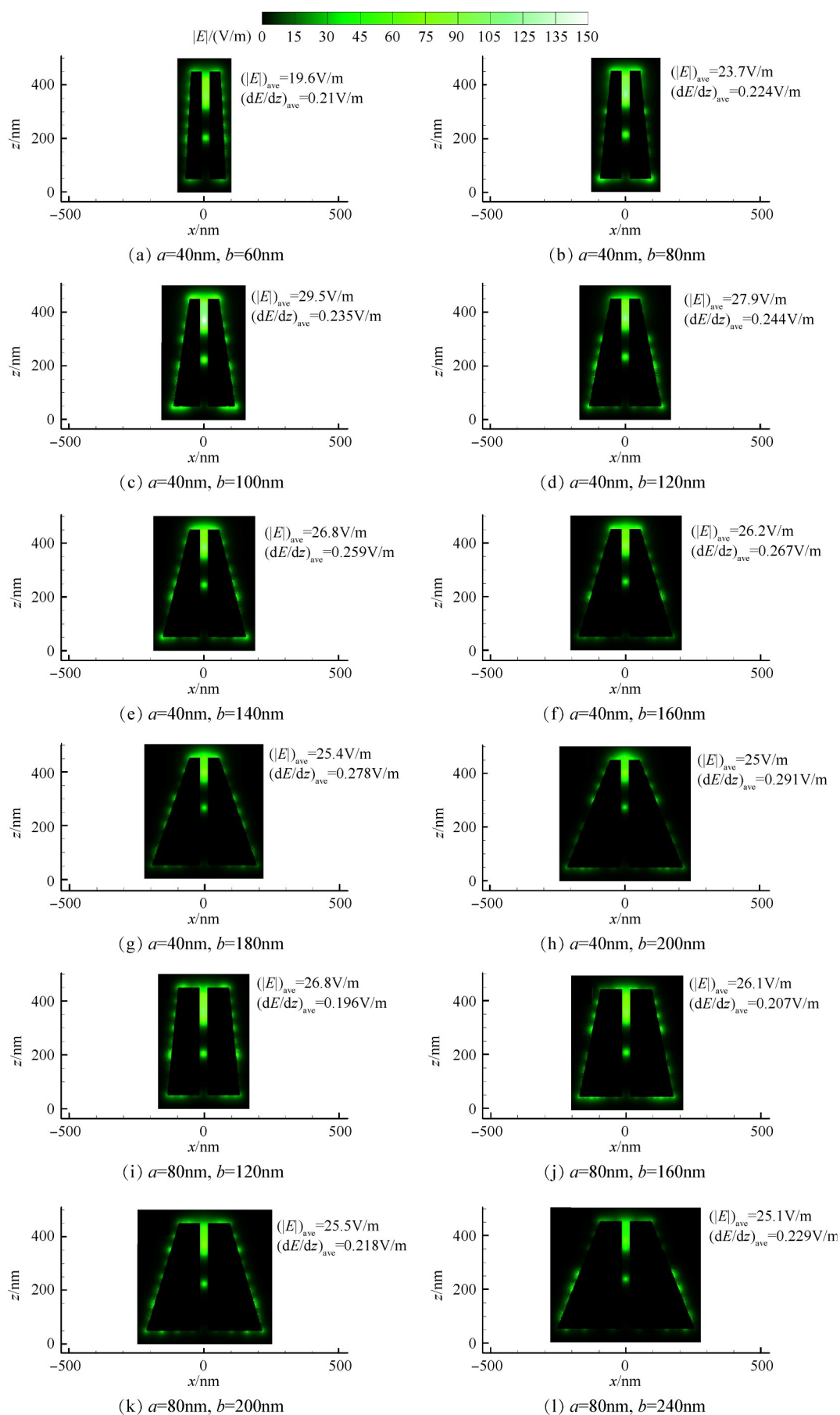
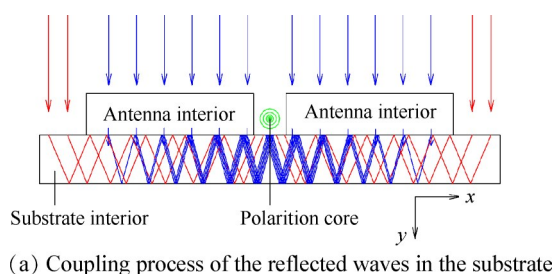


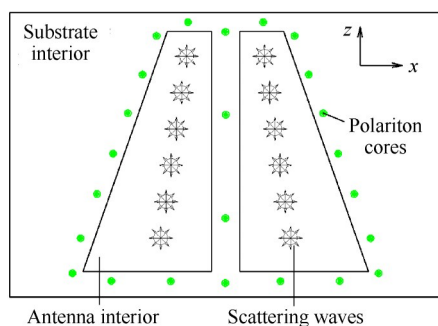
Fig. 2 Characteristics of the impact of the antenna configurations on both the average field intensity and the average of the field intensity gradient in SPP

考察其它工况是否也遵循此规律,又给出图2(i)~(l)的工况($a=80\text{nm}$, b 单独发生变化),此时,电场强度均值的变化规律与 $a=40\text{nm}$ 的工况有所不同,表现为始终降低,而电场梯度的变化规律是一致的。事实上,图2中天线结构非对称性增强的同时,天线的覆盖面积也在逐渐增大,而 $a=80\text{nm}$ 工况的面积均处于较大的数值。因而,本文推断 $a=80\text{nm}$ 工况可能错过了变化的极值点(极值点位于面积较小的区域),换言之,两者变化规律虽有不同,但可能指向相同的物理机制。

表面等离子激元的产生机制有两个主要过程:(1)如图3(a)所示,当入射波沿 y 向进入金属天线和基底时,会在基底中进行多次反射,最终在通道进行耦合增强,形成表面等离子激元,值得注意的是,当天线面积较小时,反射波在短光程中损耗较少的能量,会在通道形成较强的激元核心,而随着面积增大,基底中的反射过程会变得分散,无法在通道集中,甚至无法触发等离子激元。(2)如图3(b)所示,当入射波进入金属天线时,一小部分波会进入基底(进行反射波耦合),而大部分波与金属内部的自由电子相互作用,触发电子气震荡,这种震荡会引起向四周散射的波,这些波在金属表面边界也会形成等离子激元作用,但这种激元作用比较微弱,只有当金属天线面积较大时,激元核心数量才会逐渐上升。因此,这两个过程对天线面积有着不同的响应机制:基底内部的反射波在面积较小时会形成较强的等离子激元,而金属内



(a) Coupling process of the reflected waves in the substrate



(b) Coupling process of the scattering waves in the antenna
Fig. 3 Formation mechanisms of the surface plasmon polariton

部的散射波在面积较大时会在表面激发更多的等离子激元。

综上,电场梯度关于结构不对称性的机理比较明确,即无论反射波还是散射波,所制造的等离子激元都会受结构不对称性的制约,故在通道不同位置的光波耦合增强效果也不同,结构的不对称性越显著,通道内不同位置的光波耦合效果差异越大,电场梯度越大,上述机制与文献[5]基本一致。而电场均值关于结构不对称性的机理关系到反射波和散射波对天线面积变化的不同响应机制,只有当面积在某个合适的数值时,基底内部反射波和金属内部的表面波的联合效果才能达到峰值,即导致了电场强度均值随天线面积的增大而呈现先增大后减小的趋势。

综上,等离子激元对光镊作用的增益机制是比较复杂的:当天线结构不对称性增强时,光梯度力的影响因素之一激元电场梯度是存在单调递增规律,而另一个影响因素电场强度则呈现先增大后减小的趋势。故光梯度力的优化策略需要综合考虑上述两个因素,需要通过大量尺寸 a 与尺寸 b 所形成的工况网络来寻找优化策略,基于此,图4给出不同 a 与 b 对应的光梯度力的计算结果,其中 a 在 $40\sim 160\text{nm}$, b 在 $(a+20)\sim (2a+40)$,为保证非对称性, a 恒小于 b 。纳米颗粒取Ag,粒径为 20nm 。

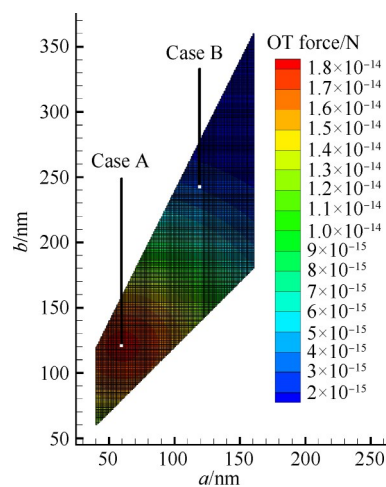


Fig. 4 Operation condition network of size a and size b

根据图4结果,面积较大的天线或面积较小的天线都不具备最高的光梯度力,这一点与电场强度均值受结构影响的复杂机制有关,这说明针对天线结构对光梯度力影响机制的研究必须基于同时考察电场强度均值和电场梯度两者。值得注意的是,最优值一般分布在面积较小的区域,本文最优值出现在 $a=60\text{nm}$, $b=120\text{nm}$ 附近,取 $a=60\text{nm}$, $b=120\text{nm}$ 为最优

点,记为 Case A;此外,再任意选取一个工况点 Case B ($a=120\text{nm}$, $b=240\text{nm}$)作为验证试验的对比工况。

3.2 试验验证

为验证不同天线结构对等离激元诱导光镊作用机制以及光梯度力优化策略的正确性,本文开展捕捉纳米颗粒运输的 PIV(粒子图像测速,下同)试验,针对颗粒运动速度与推动作用力进行测量和推算,对比最优工况 Case A 与另一工况 Case B(随机选取的一个加工难度较小的工况)的纳米颗粒运动状态,从间接上验证本文研究的物理机制和优化策略的有效性,以及光波纳米推进概念的原理正确性。

纳米颗粒的 PIV 试验系统布置如图 5 所示,试验在透明的密封舱内进行,密封舱的作用在于最大程度减少气体流动、噪音以及机械振动等因素的干扰。天线装置置于高速摄像机(性能参数见表 1)的竖直正下方,本文选用的拍摄速度为 $1\times 10^5\text{fps/s}$ 。激光触发器的探头与摄像机安装在一起,为天线提供光源(单色光,波段设定为 546nm 或 585nm (青绿色),恰好是 Case A 与 Case B 的激元耦合波段,功率为 0.1W)。在天线装置的水平左侧装有电动吹粉器(纳米颗粒置于其中),以 0.05m/s 的速率对天线装置喷射 Ag 纳米颗粒(由硝酸银与柠檬酸钠进行光催化作用制备,经过筛选器后,粒径控制在 $19.7\sim 20.3\text{nm}$),吹粉器喷嘴距离天线 50cm (设定这样远的距离是为了进入天线装置的颗粒足够少,这样可以保证高速摄像机抓

拍的纳米颗粒是同一个)。需要说明的是,在天线装置与吹粉器之间布置了用于颗粒定位的两台电子显微镜,显微镜的聚焦位置都在天线装置左侧 2mm 位置(如果距离天线太近,会来不及启动高速摄像机),两台显微镜分别与天线装置平面夹角 $+45^\circ$ 和 -45° ,具体定位画面如图 6 所示,如果观察到有纳米颗粒同时从两台显微镜左侧的定位线进入天线装置,则立即启动高速摄像机进行拍照。

Table 1 Operation parameters of the high-speed camera

Shooting speed/(fps/s)	Resolution ratio/pixel	Max recording time/s	Sensitivity	Grayscale
1×10^5	640×280	0.47	ISO 50000	12 Bit

在图 6 中,为了帮助判断天线通道的位置,在显微镜的电脑显示图像中添加了红色的双线作为参考,如果颗粒能够沿着双红线的方向进入双红线之间,则立即开启 PIV 摄像。值得注意的是,即使两台显微镜均能定位到颗粒,在绝大多数情况下,也会由于颗粒与天线通道的丝毫偏差而错过天线通道,无法被天线通道的光势阱捕捉;或者捕捉到的颗粒在进入通道内后的第一个图像不是通道初始入口位置,而是运动了一段距离后的位置;或者颗粒进入通道时的初速度较高,这些情况均无法利用 PIV 方法统计到精确的运动速度。所以,出现上述两种情况后,都要重新进行颗粒捕捉。因此,该试验的周期较长,捕捉到一个完好工况一般在 $5\sim 20\text{d}$ 不等。

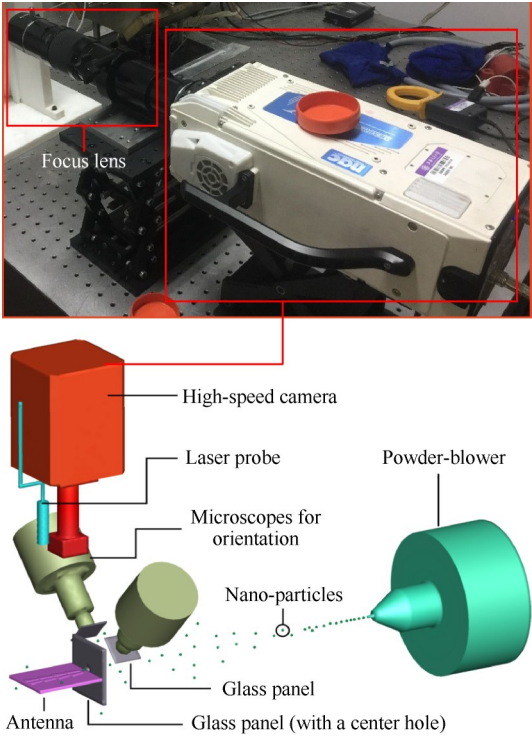
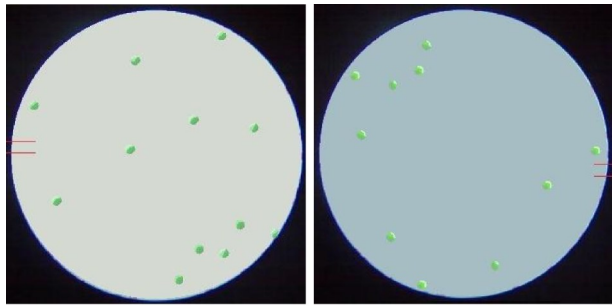


Fig. 5 Diagram of the PIV test system for nano-particles



(a) $+45^\circ$ azimuth microscope (b) -45° azimuth microscope
Fig. 6 Images of the positioning process for nano-particles by the electron microscope

天线装置采用电子束刻蚀进行加工,因为加工成本昂贵,经费受限,仅加工出两组不同结构的天线,Case A 结构: $a=60\text{nm}$, $b=120\text{nm}$, $c=400\text{nm}$,Case B 结构: $a=120\text{nm}$, $b=240\text{nm}$, $c=400\text{nm}$ 。天线为金属 Ag,基底为 SiO_2 (与计算工况统一)。由于电子束刻蚀工艺存在加工误差,各尺寸的加工误差在 $\pm 5\text{nm}$ 。在完

成对纳米颗粒的输运过程捕捉后,可推算出颗粒的平均速度,利用该速度可以推算出天线对单个纳米颗粒的推动作用力。

推动作用力 F_0 的计算基于牛顿定律“力为动量变化率”,可描述为

$$F_0 = m_0 (v_{\text{end}} - v_{\text{int}}) / \Delta t \quad (10)$$

式中 m_0 为颗粒的质量(20nm 直径的 Ag 颗粒对应为 $4.39 \times 10^{-20} \text{kg}$); Δt 为 3 次拍摄的时间间隔,取 $30 \mu\text{s}$; v_{int} 为颗粒在 $z=400 \text{nm}$ 位置的初速度,该速度默认为 0,但如果试验中可通过抓拍测算出来,则设定为测算值, v_{end} 为颗粒在 3 次拍摄间隔后的末速度。

由于纳米颗粒的运动属于变加速度的运动,故通过数值模型对颗粒在通道内的运动状态进行了计算,发现平均速度与末速度之间存在一定比例关系,近似为

$$v_{\text{end}} = 1.84 v_{\text{ave}} \quad (11)$$

式中 v_{ave} 为颗粒在拍摄间隔中的平均速度,可由图 7 和图 8 的数据推算出。

根据图 7 和图 8,一方面通道中的颗粒仅有一个,

可以确定 PIV 捕捉的轨迹所属同一个颗粒,测量值有效;另一方面,等离激元诱导光镊作用的效果比较显著,可明显观测到颗粒在天线通道中逐渐加速的过程。关于纳米颗粒运动参数的初步测量结果见表 2。

Table 2 Comparison of the nano-particle kinestate parameters in measurement and calculation

Parameter	Case A	Case B
$v_{\text{ave}}(\text{test})/(\text{cm/s})$	594.7	101.7
$F_0(\text{test})/\text{N}$	1.60×10^{-14}	2.7×10^{-15}
$F_0(\text{calculation})/\text{N}$	1.89×10^{-14}	3.3×10^{-15}
Relative error/%	18.1	22.2

3.3 试验结果的影响因素分析

本文所采用的纳米颗粒(粒径 20nm)属于微观分子尺度的颗粒,非常容易受到试验环境中各类因素的影响,例如布朗运动、天线受到光热而产生的附近气流扰动以及大气阻力等因素所产生的不确定效应,因此,这里需要对上述相关因素进行分析。

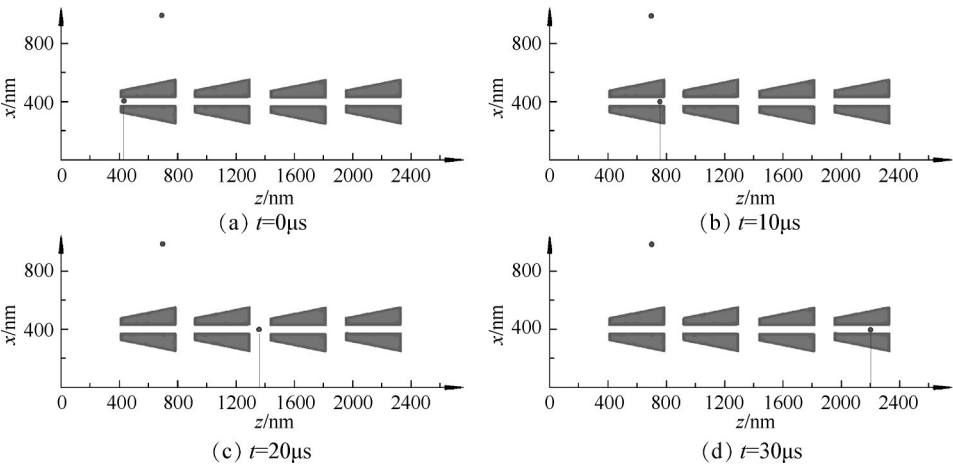


Fig. 7 PIV photos of the nano-particle transportation in case A

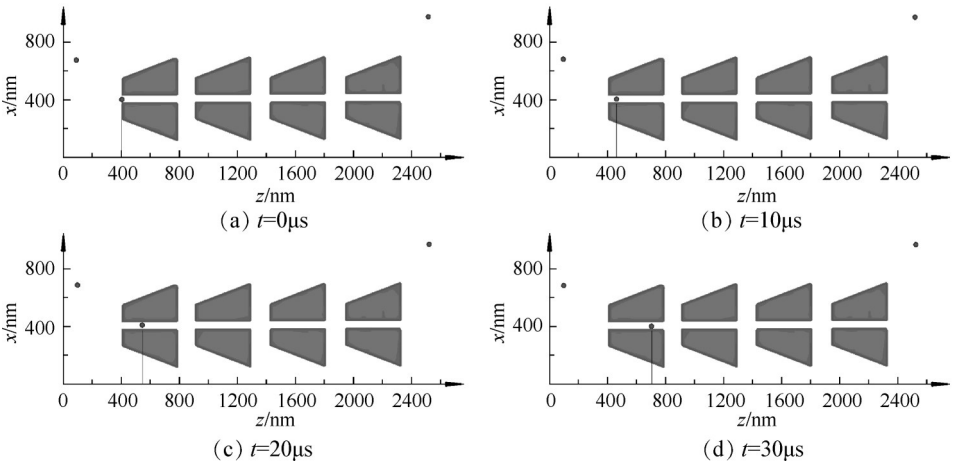


Fig. 8 PIV photos of the nano-particle transportation in case B

首先,从照片连续抓拍情况来说也未出现纳米颗粒突然的位移跳跃现象,这说明布朗运动较微弱,因此,忽略布朗效应的影响。

其次,激光照射带来的光热作用会影响天线附近气体流动,这种扰动是复杂的、甚至在作用力的方向上是多方向的,必然会导致纳米颗粒的运动受到影响,目前为止,该干扰机制是无法彻底排除的,但通过反向安装天线进行纳米颗粒的拍摄试验,发现纳米颗粒会在通道中先减速至静止、后反向加速(见图 9),并且运动方向几乎为一条直线,这种现象虽然无法证明气动作用没有影响,但至少可以说明光梯度力在各种外力影响中占主要地位。

大气阻力(F_{air})的计算式可参考式(12),由 20nm 粒径球形颗粒所计算得到的大气阻力的数量级在 10^{-15}N ,已经比较接近光梯度力的量级(10^{-14}N),因此,大气阻力的影响不可忽略。

$$F_{\text{air}} = 0.5\alpha\rho_{\text{air}}S_{\text{front}}v_{\text{nano}}^2 \tag{12}$$

式中 α 为迎风面形状系数,一般在 0~1 选取(完全垂直于来流的平面取 1,球体可取 0.35), ρ_{air} 为空气密度, S_{front} 为迎风面的截面积, v_{nano} 为颗粒运动速度。

因此,这里需要对试验结果进行修正,因为试验结果表征的是大气阻力影响下的纳米颗粒运动状

态,故对 F_{air} 在相应的 $v_{\text{int}} \sim v_{\text{end}}$ 区间内进行积分,将试验结果修正为:原结果加上大气阻力的积分值(大气阻力是反作用于光梯度力的负面作用力),所得到的结果见表 3,修正后的测量值要大于原测量值。

Table 3 Comparison of the corrected test result and the calculation result

Parameter	Case A	Case B
$F_0(\text{test, corrected})/\text{N}$	1.79×10^{-14}	2.9×10^{-15}
$F_0(\text{calculation})/\text{N}$	1.89×10^{-14}	3.3×10^{-15}
Relative error/%	5.5	13.8

表 3 主要展示了单个颗粒推动作用力的(修正后)测量值与计算值的对比,Case A 的 F_0 (试验值)确实高出 Case B 很多,可在一定程度上验证本文优化策略(图 4)的有效性,并从侧面证明等离子增益光镊作用机理的合理性。

需要说明的是,表 3 数据给出的是单个纳米颗粒能够实现的推动作用,在 PFP 现有的研制策略中^[4-6],一般采用大量天线空间级联的方式来设计整个推进装置,此刻,整个推进装置至少可容纳 $10^6 \sim 10^7$ 个纳米颗粒(装置体积小于 1cm^3),再结合本文试验数据,那么所产生推力可达到 $10 \sim 100\text{nN}$ 量级。

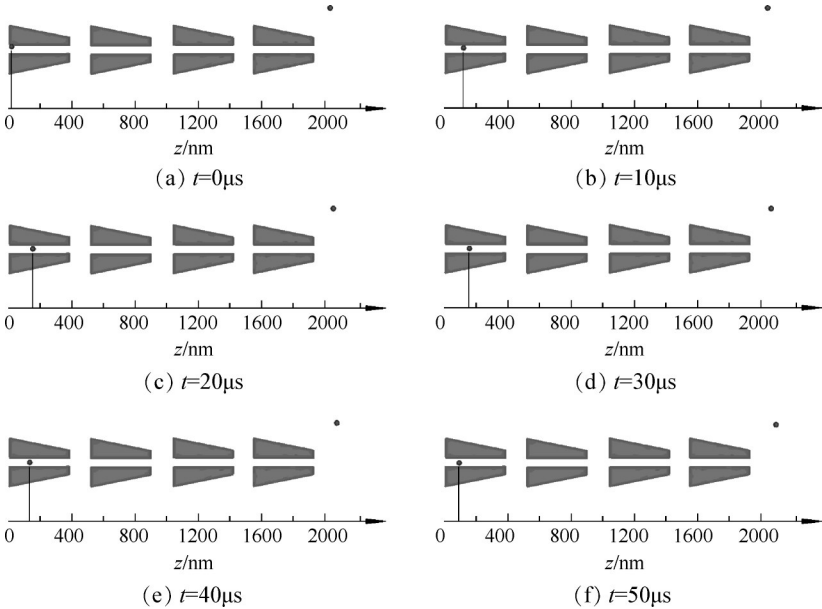


Fig. 9 PIV photos of the nano-particle transportation with the antennas installed reversely

4 结 论

本文针对光波纳米推进技术中的等离子增益光镊作用机理进行数值与试验研究,主要结论如下:

(1)表面等离子增益光镊作用机制的核心影

响参数为激元电场强度和场强梯度两参数,但两者对于天线结构不对称性变化的响应规律不同,前者随结构不对称性增强(天线不对称性增强伴随面积增大)呈现先增大后减小的趋势,而后者随天线结构不对称性增强而持续增大,会导致光梯度力关于天

线结构不对称性变化呈现出非单调性的变化规律。

(2) 激元诱导光梯度力的最优点位于天线面积较小的区域, 本文的最优点对应结构为: 梯形上底 60 nm, 下底 120 nm。

(3) 通过试验与计算结果对比, 纳米颗粒推动作用力的计算误差约为 5.5%~13.8%, 可说明光梯度力优化策略的有效性, 间接验证等离子激元对光镊作用增益机理的合理性, 证明光波纳米推进技术的原理可行。

参考文献

- [1] 于博, 张岩, 贺伟国, 等. 超声波电喷推力器羽流中和特性研究[J]. 物理学报, 2018, 67(4): 1-12.
- [2] Michael K, Samudra H, Taisen Z. Micro-Cathode Arc Thruster for PhoneSat Propulsion[C]. Utah: 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2013.
- [3] Coletti M, Guarducci F, Gabriel S B. A Micro PPT for Cubesat Application: Design and Preliminary Experimental Results[J]. Acta Astronautica, 2011, 69(3): 200-208.
- [4] Joshua R, Paul F, Changyu H. Plasmonic Force Space Propulsion[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(4): 1163-1168.
- [5] Jiao J, Gao L, Guo J, et al. Study on Focusing Properties of Broadband Range and Oblique Incidence on the Basis of V-Shaped Nanoantenna[J]. Applied Physics A, 2016, 122: 942-948.
- [6] 于博, 焦蛟, 康小录, 等. 一种新型维纳量级的推进概念研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1434-1440. (YU bo, JIAO Jiao, KANG Xiao-lu, et al. Investigation of a New Micro-Nano Propulsion Concept [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(6): 1434-1440.)
- [7] Prodan E, Nordlander P. Structural Tunability of the Plasmon Resonances in Metallic Nanoshells[J]. Nano letters, 2003, 3(4): 543-547.
- [8] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J. Surface Plasmon Polaritons and Their Role in the Enhanced Transmission of Light Through Periodic Arrays of Subwavelength Holes in a Metal Film[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(10): 107401-107405.
- [9] Schuller J A, Barnard E S, Cai W. Plasmonics for Extreme Light Concentration and Manipulation[J]. Nature Materials, 2010, 9(3): 193-204.
- [10] Yang X, Liu Y, Oulton R F. Optical Forces in Hybrid Plasmonic Waveguides[J]. Nano Letters, 2011, 11(2): 321-328.
- [11] Juan M L, Righimi M, Quidant R. Plasmon Nano-Optical Tweezers [J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 349-356.
- [12] Tang C, Wang Q, Liu F. Optical Forces in Twisted Split-Ring-Resonator Dimer Stereometamaterials [J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11783-11792.
- [13] Adam P M, Salomon L, de Fornel F. Determination of the Spatial Extension of the Surface-Plasmon Evanescent Field of a Silver Film with a Photon Scanning Tunneling Microscope [J]. Physical Review B, 1993, 48(4): 2680-2683.
- [14] Jiao J, Zhao Q, Liang G F, et al. Enhancement of Focusing Energy of Ultra-Thin Planar Lens Through Plasmonic Resonance and Coupling[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 26277-26284.
- [15] Jiao J, Li X, Huang X P, et al. Improvement of Focusing Efficiency of Plasmonic Planar Lens by Oil Immersion [J]. Plasmonics, 2015, 10(3): 539-545.
- [16] Miao X, Wilson B K, Pun S H, et al. Optical Manipulation of Micron/Submicron Sized Particles and Biomolecules Through Plasmonics[J]. Optics Express, 2008, 16(18): 13517-13525.
- [17] Batchelder J S, Taubenblatt M A. Interferometric Detection of Forward Scattered Light from Small Particles[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(3): 215-217.

(编辑: 朱立影)