

纳米小球辅助飞秒激光近场超衍射加工的研究进展*

姜前峰¹, 刘子源¹, 薛磊², 陶海岩¹, 林景全¹

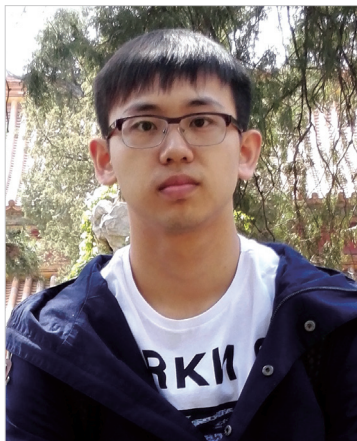
(1. 长春理工大学理学院, 长春 130000;

2. 航空工业成都凯天电子股份有限公司, 成都 610000)

[摘要] 在飞秒激光加工过程中, 如何突破衍射极限一直都是一个重要问题。近年来, 纳米小球辅助飞秒激光近场超衍射加工逐渐被认识并发展起来, 这一加工方法可以在基底表面产生小于入射激光衍射极限尺度的纳米孔洞, 并可以实现大面积加工。从金属纳米小球和介电纳米小球这两个方面入手, 分别对它们辅助飞秒激光近场加工的研究进行介绍。

关键词: 飞秒激光; 近场加工; 超衍射极限; 纳米小球; 近场光学

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.06.057



姜前峰

硕士研究生, 研究方向为基于纳米小球近场效应的飞秒激光纳米加工。

随着科技的发展, 激光加工技术已被广泛应用于信息、军事、医疗和生物等诸多领域。特别是飞秒激光加工, 由于其极短的作用时间和极高的峰值功率, 具有高精度、“冷”加工、无污染、无接触、控制灵活等优点。由于光学衍射极限的限制, 使得低于衍射极限尺度(1/2 激光波长)下的激光加工成为难题。目前, 激光近场超衍射加工能很好地解决这个问题。例如, 利用激光照射金属尖端的方法可以实现 20~100nm 特征尺寸的加工。金属尖端通常使用显微系统(如扫描探针电子显微镜, 原子力显微镜^[1]和扫描近场光学显微镜^[2])的探针。由于这种方法复杂的控制系统和缓慢的加工速度制约了其工业化生产。然而, 纳米小球辅助飞秒激光近场加工可以在基底上实现良好的近场增强, 进而在基底上产生超衍射极限尺度的纳米孔洞, 并且可以实现超衍射阵列纳

米孔洞的快速加工。

产生近场增强的纳米小球主要可以分为两类: 金属纳米小球(Au)和介电纳米小球(PS 和 TiO₂ 等)。这两类纳米小球的近场增强机制都基于纳米散射理论, 但二者近场增强的产生机制有所不同。对于金属纳米小球来说, 其近场增强的产生是由于在外加光场的激励下纳米小球表面自由电子产生集体振荡形成等离子体共振, 从而产生良好的近场增强。而介电纳米小球主要是由透镜效应和米共振效应引起的近场增强。透镜效应是指介电纳米小球起到聚焦透镜作用, 对作用光场进行聚焦实现近场增强。纳米共振效应指的是在外界光场的作用下, 主要产生磁偶级振荡模式或磁四级振荡模式能够引起近场增强。

本文将从金属纳米小球和介电纳米小球这两个方面入手, 分别对它们辅助飞秒激光近场加工的研究进行介绍。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(60615017); 吉林省优秀青年人才基金项目(20180520198JH); 长春理工大学青年科学基金项目(XQNJJ-2015-01)。

Au 纳米小球近场纳米加工研究

1 Au 纳米小球几何参数 (小球直径) 对纳米孔加工效果的影响

大部分金属纳米小球需要在特定波段的光场激发下,才能产生良好的等离激元共振模式。而 Au 纳米小球在宽光谱范围内^[3](近紫外和可见光波段)都能激发良好的等离激元共振模式,因此 Au 纳米小球被广泛应用于纳米孔加工研究。光场辐照纳米小球产生等离激元的共振强度不仅受纳米小球材质影响,也受其几何参数影响。如纳米小球的直径会直接影响其近场散射效率^[4],近场散射效率可以表征纳米小球把入射电磁场转化为近电磁场的能力,并且与近场增强成正比,其公式为^[5]:

$$Q_{NF} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|^2 (n+1) |h_{n-1}^2(x)| + n |h_{n+1}^2(x)|^2 + (2n+1) |b_n|^2 |h_n^2(x)|^2 \quad (1)$$

式中, a_n 和 b_n 为米散射系数, $x=k_0R$, R 为纳米小球的半径, k_0 为介质波数。 $k_0=2\pi n'/\lambda$, n' 和 λ 分别为周围介质折射率和入射激光波长。 $h^2(x)$ 为第 2 类球形汉克尔函数。 n 为振荡模式数(比如,偶极模式 $n=1$,四级模式 $n=2$)。 Nedyalkov 等^[6]通过式(1),在入射光场波长在 200~800nm 范围之内,对直径为 20nm、80nm 和 200nm 的 Au 纳米小球在硅基底上的近场散射效率进行计算。计算结果如图 1 所示,在入射光场波长为 800nm 时,直径为 200nm 的 Au 纳米小球近场散射效率明显高于直径为 40nm 和 80nm 的情况。并且进行了进一步的试验研究,如图 2^[6]所示,利用能量密度为 185mJ/cm² 的圆偏振飞秒激光(脉冲宽度为 100fs,波长为 800nm)对硅基底上 3 种不同直径的 Au 纳米小球进行辐照,发现直径为 200nm 的 Au 纳米小球在硅基底上产生的纳米孔洞最大,与计算结果

相符合。同时产生的纳米孔洞尺寸随 Au 纳米小球的直径减小而减小。 Miyanishi 等的试验研究结果也得到了相似的结论^[7]。因此,在 Au 纳米小球辅助波长为 800nm 飞秒激光近场纳米加工研究中,直径为 200nm 的 Au 纳米小球被广泛应用。

2 飞秒激光参数对纳米孔加工效果的影响

当 Au 纳米小球的尺寸一定时,飞秒激光的相关参数也会影响其在基底上的近场增强以及相对应的加工效果。 Tanaka 等^[8]比较了线偏振和圆偏振的飞秒激光(能量密度为 220 mJ/cm²)对硅表面纳米孔洞制备所产生的影响,其试验结果与 Nedyalkov 等相

似^[6]。如图 3^[6]所示,在线偏振光作用下,产生的纳米孔洞为椭圆形,且椭圆孔洞的长轴方向与激光的偏振方向平行。在圆偏振光作用下,产生的纳米孔洞则为圆形。通过 FDTD Solutions 的数值模拟研究得知,产生这一现象的原因是不同激光偏振态在纳米小球与基底表面接触处可激发不同的近场增强空间分布,从而导致了表面加工孔洞形貌的差异。

但在线性振飞秒激光作用下,基底表面产生的纳米孔洞并非始终为椭圆形,这与激光能量也有着密切关系。 Nedyalkov 等^[9]使用线偏振飞秒激光作了类似试验。发现当飞秒激光能量密度小于硅的烧蚀阈值时,产

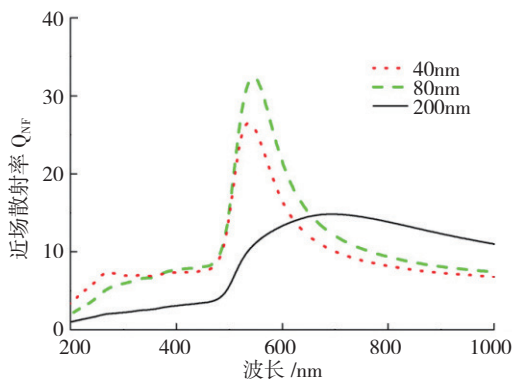


图1 3个不同尺寸的纳米小球的近场散射效率曲线图

Fig.1 Near-field scattering efficiency curve of 3 different size of nanometer ball

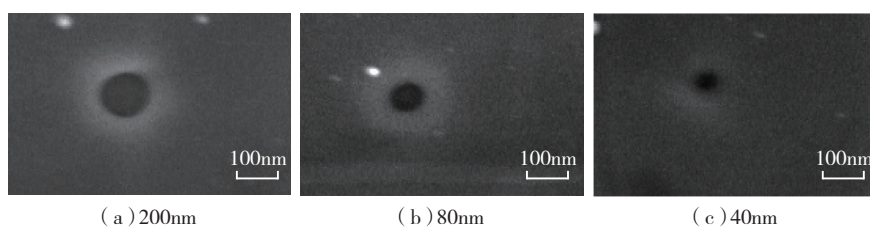


图2 圆偏振飞秒激光在硅基底表面进行纳米孔洞加工的SEM图

Fig.2 Circularly polarized femtosecond laser in the silicon substrate surface of nano holes machining of SEM figure

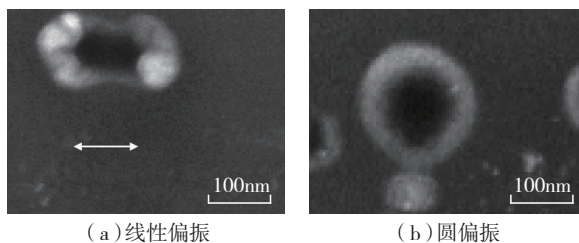


图3 直径为200nm的金纳米小球的飞秒激光对基底进行加工,产生纳米孔洞的SEM图

Fig.3 SEM image of the nanohole fabricated when 200nm particles are used

生的纳米孔洞才为椭圆形。但当飞秒激光能量高于硅的烧蚀阈值时,产生了大于纳米小球直径的圆形孔洞,原因是这种情况下的飞秒激光可以直接在硅表面进行烧蚀,进而产生的烧蚀孔洞形状与光斑形状相同。此外还对线偏振的入射光场(波长为 800nm)作用下,硅表面上直径为 200nm 且彼此之间有一定距离的纳米金球对的近场增强分布进行模拟。模拟结果表明当激光的偏振方向与纳米球对的摆放方向平行时,比孤立纳米小球的近场增强效果更好^[10]。反之,产生的近场增强效果与孤立纳米金球的近场增强效果相似。以上研究中,线偏振光都是垂直于基底表面对纳米小球进行辐照,那么改变入射光场的入射角度会对基底表面的近场分布会有怎样的影响? Miyanishi 等^[7]对线偏振(p 偏振和 s 偏振的)飞秒激光以一定角度辐照 200nm 的 Au 纳米小球辅助硅表面纳米加工进行研究。SEM 形貌观测结果和模拟近场分布表明, p 偏振情况比 s 偏振情况制备的纳米孔洞更小。同时也发现 p 偏振飞秒激光以一定角度入射,比垂直入射情况下产生的纳米孔洞小 2 倍,进而可以实现更好的超衍射加工。

3 基底材料对纳米孔加工效果的影响

要在基底表面实现高质量的纳米孔加工效果,需要纳米小球诱导的近场增强与基底进行良好耦合。Nedyalkov 等^[11-12]对 3 种典型的基底进行了纳米孔加工。这 3 种基底分别为 Au (导体)、Si (半导体)和 SiO_2 (绝缘介质)。试验结果如图 4^[12]所示,随着激光能量密度的提高,产生的纳米孔洞却随之减小。说明 Au 纳米小球在导体上的近场增强最好,半导体次之,最差的是绝缘体。这说明基底对于 Au 纳米小球辅助飞秒近场加工具有显著的影响。这一现象可以通过镜像电荷理论来说明。在外电场作用下,基底内产生感

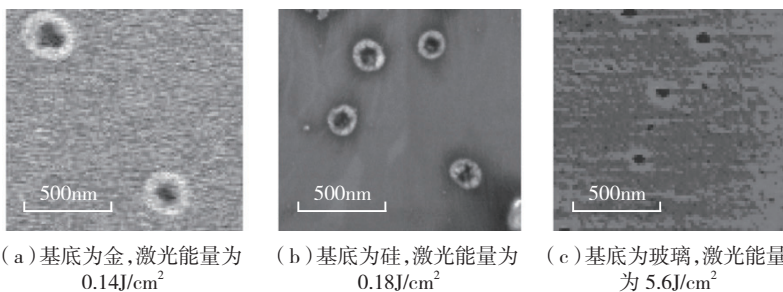


图4 脉冲宽度为100fs的飞秒激光对附着金纳米小球的基底进行辐照,产生纳米孔洞的SEM图

Fig.4 SEM images of holes produced in lime glass substrates after irradiation by 100fs laser pulse

应电荷,此时基底内部镜像电荷的计算公式为^[13]:

$$q' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_a}{\epsilon_s + \epsilon_a} \times q \quad (2)$$

式中, q' 为镜像电荷, q 为诱导镜像电荷的初始电荷, ϵ_s 为基底的介电常数, ϵ_a 为空气的介电常数。如公式(2)所示,镜像电荷的多少正比于基底的介电常数的大小。所以,基底的介电常数越大,产生的镜像电荷越多,纳米小球诱导的近场增强与基底耦合的越好,进而增强在基底上的纳米孔洞加工效果。Nedyalkov 等^[14]发现 Au 纳米小球辅助飞秒激光在基底表面进行纳米加工时,加工纳米孔洞效果不仅与基底表面近场增强有关,同时也受基底的折射率和小球本身的热效应影响。在高折射率的基底(Si)上,基底对纳米金球的近场增强耦合良好,这时主要是 Au 纳米小球的近场增强影响纳米孔加工,从而产生的椭圆形的纳米孔洞,且长轴的方向与激光的偏振方向平行。相对的,在低折射率基底上(PMMA),基底受 Au 纳米小球近场增强的影响降低,这时主要通过纳米小球与基底的热传导诱导基底表面形变,从而实现纳米孔加工。所以,后者产生的纳米孔洞不受激光的偏振影响,只与球体和表面接触面积有关,进而产生了对称性高的圆形纳米孔洞。

4 Au纳米小球阵列排布对纳米孔加工效果的影响

基于单一 Au 纳米小球研究的基础,Nedyalkov 等^[15]进一步研究了阵

列 Au 纳米小球在铂表面产生的近场增强。试验结果表明,在低能量密度的飞秒激光作用下,通过 Au 纳米小球阵列并没有获得阵列的纳米孔洞加工,而通过单一 Au 纳米小球却在基底上产生了纳米孔洞。通过数值模拟分析发现,随着小球间距的减小小表面近场增强也快速衰减,如图 5^[16]所示,其中黑白图(右图)为横截面上的近场强度增强 $|E/E_0|^2$ 分布)。对于单个 Au 纳米小球在激发电极共振模式的情况下,它的光吸收截面远大于其结构本身的横截面^[16],因此当 Au 纳米小球紧密排列在一起时,阵列中每个小球平均的光吸收截面相对单一小球有所减小,进而减小基底上的近场增强效果。同时, Au 纳米小球之间的强耦合作用也会减小其在基底上的近场增强。

介电纳米小球近场加工的研究

1 低折射率聚苯乙烯(PS)纳米小球近场纳米孔加工的研究

低折射率的 PS 纳米小球具有透镜效应^[17-18],可以在硅、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等基底表面实现超衍射加工。对于 PS 纳米小球尺寸对纳米加工效果的影响方面与 Au 纳米小球不同, PS 纳米小球的直径大小与加工的纳米孔洞尺寸大小成正比,而对于 Au 纳米小球主要是要满足激光波长与纳米小球直径的适当匹配,不是直径越大越好,相关研究为: Takada 等^[19]在入射光场波长

为 800nm 的情况下,对直径分别为 200nm、450nm 和 820nm 的 PS 纳米小球在 PMMA 基底上的近场增强效应进行 FDTD 数值模拟。结果表明随着纳米小球的直径增大,产生的近场增强也随之增大。并且使用波长为 800nm,脉冲宽度为 100fs 的飞秒激光进行试验,试验结果如表 1^[20] 所示,发现在纳米小球下产生的纳米孔径的深度和直径随纳米小球直径增大而增大,与模拟结果相符。对于低折射率 PS 介电纳米小球,其产生近场增强的物理机制受尺寸参数^[20]影响。当介电纳米小球直径接近或大于入射光波长时,光学透镜效应起主要作用^[21],直径越大近场增强效果越好,近场增强最强处在介电小球的聚焦位置上。且当介电纳米小球直径小于入射光波长时,米共振效应会对介电小球的内部和外部的电磁场分布^[22]产生影响。因此 PS 纳米小球尺寸越大,其产生的透镜效应越明显,其获得的近场增强也就越强,同时加工的孔洞也会越大。

Afanasiev^[23] 和 Bityurin^[24] 等使用双色飞秒激光(400nm+800nm)对 PMMA 基底上直径为 450nm 的 PS 纳米小球阵列进行试验研究。首先,根据以上 PS 小球透镜聚焦规律,结合数值模拟研究发现,在飞秒激光波长(400nm)与 PS 纳米小球直径相近时,可以实现良好的聚焦。而当激光波长(800nm)大小近 PS 纳米小球直径 2 倍时,无法在基底上实现聚焦效果。随后,使用飞秒激光对附着直径近 400nm 的 PS 纳米小球阵列的 PMMA 基底进行辐照。试验表明,双色双脉冲飞秒激光(400nm+800nm)作用相对于单色飞秒激光(400nm)作用,可以实现更好的加工效果。这是因为在双色双脉冲作用过程中,基底通过对 400nm 飞秒激光的吸收,在基底表面激发出更多的自由电子,改变基底表面的介电环境,进而增强了对 800nm 飞秒激光的吸收能力。在

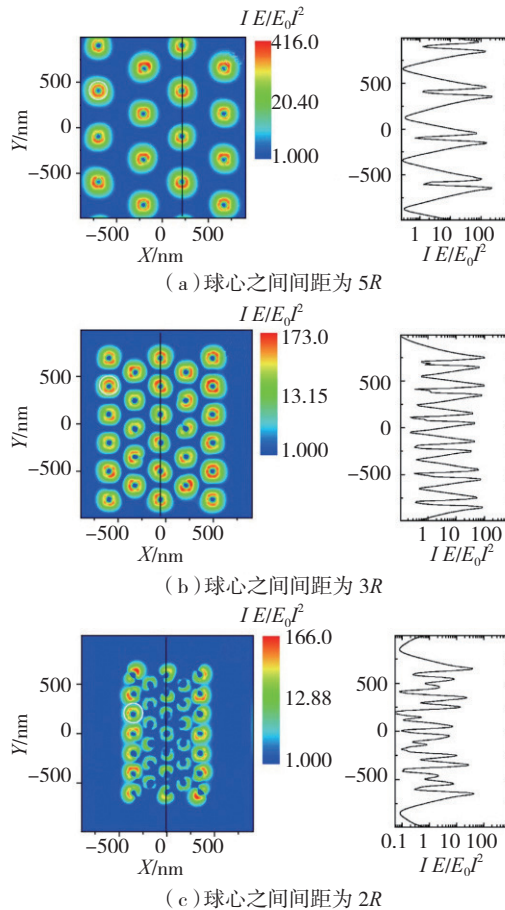


图5 阵列金纳米小球不同间距下,基底表面近场强度增强分布图

Fig.5 Color online electric field intensity distribution on the substrate surface produced by gold nanoparticle array

表1 在硅基底上产生纳米孔洞的平均尺寸

小球直径/nm	820	820	450	450	200
激光能量密度/(mJ·cm ⁻²)	310	220	290	240	310
孔洞深度/nm	102	79	22	13	1.6
孔洞直径/nm	302	293	202	67	83

激光能量密度对纳米加工的影响方面, Takada 等^[19] 试验结果说明,随着飞秒激光能量的增加产生的纳米孔径的深度和直径也随之增大(如表 1 所示)。Sakai 等^[25] 对激光能量密度对加工效果的影响做了进一步研究。研究结果如图 6 所示,通过控制激光能量密度大小,可以在 PMMA 基底上制造出不同的纳米阵列结构。在低能量密度(4J/cm²)作用下,在 PS 纳米小球与基底接触处形成了纳米孔洞,且直径尺寸范围为 84~143nm(图 6 (b))。在较高能量密度(8.5J/cm²)作用下,纳米小球没有起到透镜作用,

反而起到掩膜版的作用,在纳米小球阵列的间隙中,产生直径为 72~103nm 的纳米孔洞(如图 6 (c))。产生这种现象的原因是较高能量的飞秒激光与 PS 纳米小球相互作用过程中发生了光学击穿,进而产生了自由电子激发。因此使 PS 纳米小球瞬时介电环境向类金属化特性转化,从而增强了在基底表面的近场增强。

Sakai 等^[26] 对 PS 纳米小球在硅基底表面近场增强规律进行了数值模拟研究,得到在硅基底内部的光场分布规律。在线性偏振光作用下, PS 纳米小球在硅基底内部可以形成

椭圆形的近场增强区域,且长轴与入射激光的偏振方向相互垂直。在试验方面, Sakai 等^[27]通过阵列 PS 纳米小球辅助飞秒激光在硅基底表面进行纳米加工试验。研究表明,在线性偏振光作用下, PS 纳米小球阵列在硅基底上产生的纳米孔洞为椭圆形,且椭圆形纳米孔洞的长轴与入射激光的偏振方向相互垂直,与模拟结果相符。这不同于 Au 纳米小球情况下,产生的椭圆形纳米孔洞的长轴方向与激光偏振方向平行的加工结果。这是由于其产生表面近场增强的机制不同所导致的。

2 高折射率介电小球近场纳米孔加工的研究

基于透镜效应加工机制的 PS 纳米小球被广泛应用于以 PMMA 为代表的透明基底表面纳米孔洞加工之中^[19,23,25]。同时要获得更紧密排列的纳米孔阵列时,因直径过小而产生不理想的微透镜聚焦效果也对其近场加工具有一定的限制,而且对于硅、金属等基底的加工效果也并不十分理想^[26]。Tanaka 等^[13]研究发现,入射光场波长为 820nm 的条件下,真空中 200nm 高折射率介电小球(c-Silicon)能被激发磁偶极共振模式,比 200nm 的 Au 纳米小球有着更高的近场散射效率。对于低折射率的玻璃基底,研究表明高折射率的介电纳米小球激发的磁偶极共振模式在基底表面激发近场增强效果更显著(如图 7^[13]所示)。

通过在 SiO₂ 和 Si 基底上进行试验发现^[28-29],高折射率介电小球(TiO₂)可以在这两种基底上辅助飞秒激光也能进行良好的纳米孔洞加工。如图 8^[28]所示,分别使用能量密度低于 SiO₂ 烧蚀阈值一半(3.8J/cm²)和低于硅基底烧蚀阈值一半(82mJ/cm²)的飞秒激光对附着纳米小球的两种基底进行辐照,分别产生直径为 90nm 和 100nm 的纳米孔洞(虚线所画区域为

所用小球的轮廓图)。当激光能量密度增加时,纳米孔洞的尺寸也随之增大。根据以上结果可知,对于低折射率基底,高折射率介电纳米小球比 Au 纳米小球具有更好的加工效果^[13]。

在单一高折射率介电小球的近场增强的基础上, Tanaka 等^[30]对高折射率介电小球组成的二维阵列产生的近场增强效应进行了数值模拟与试验研究。研究表明,高折射率小球阵列与 Au 纳米小球阵列相

比,因纳米小球之间的强耦合作用而造成近场增强的削弱影响较小,更适合纳米孔洞阵列的加工应用。国内对高折射率介电小球也做了相应的研究,焦悦等^[31]对 TiO₂ 纳米小球的近场增强做了相应的研究。通过研究发现 TiO₂ 阵列纳米小球在金属(Pt)、半导体(Si)和绝缘体(SiO₂)上都能产生良好的近场增强,并且随着基底折射率的增加近场增强效果也随之增强。

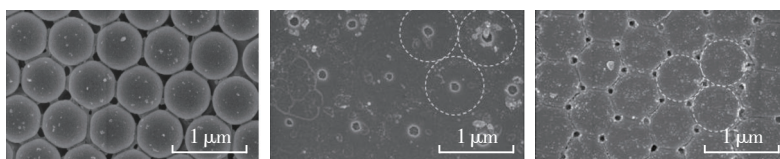


图6 附着直径为 790nm 的阵列 PS 纳米小球的玻璃基底 SEM 图 (b) 能量密度为 4J/cm² 的飞秒激光辐照后的 SEM 图 (c) 能量密度为 8.5J/cm² 的飞秒激光辐照后的 SEM 图

图6 通过控制激光能量密度大小,在 PMMA 基底上制造出不同的纳米阵列结构
Fig.6 By controlling the laser energy density, can produce different on PMMA basal nanometer array structure

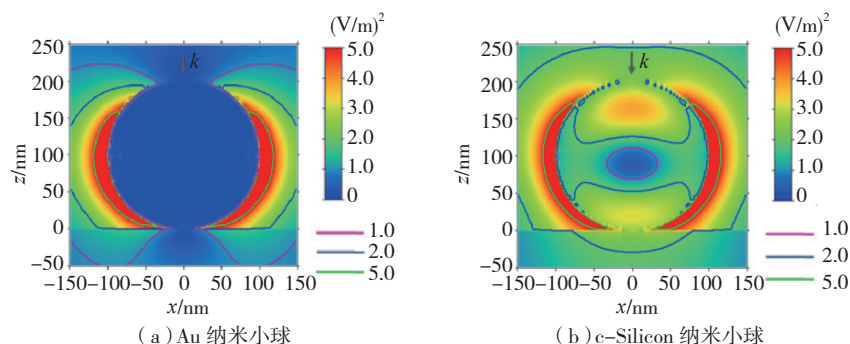


图7 玻璃基底上直径为 200nm 的近场分布
Fig.7 Glass substrate is a diameter of 200 nm near field distribution of the ball

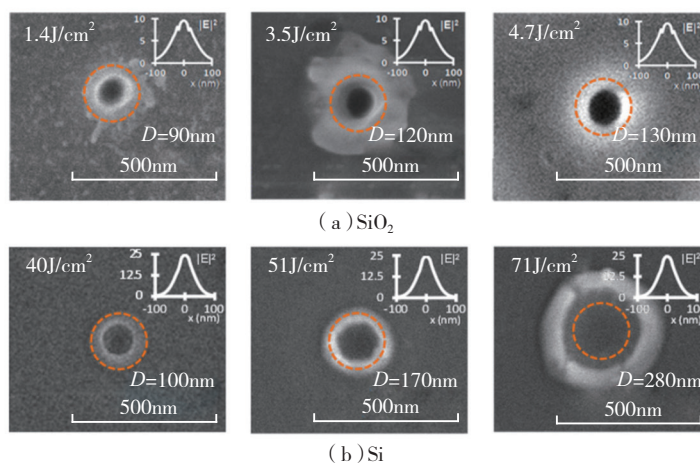


图8 不同能量密度的激光对基底进行辐照
Fig.8 Different energy density laser irradiation on base

结论

本文系统地综述了金属纳米小球 (Au) 和介电纳米小球 (PS, c-Silicon 和 TiO₂) 通过近场增强实现纳米加工的研究。Au 纳米小球在金属及硅基底表面可以通过飞秒激光诱导产生等离激元共振实现非常显著的局域近场增强, 从而获得理想纳米孔洞的加工效果。对于绝缘介质材料, Au 球与基底表面接触处的等离激元共振难以被激发, 因此很难获得良好的加工效果。对于介电小球 (如 c-Silicon), 通过磁偶级振荡吸收收入射激光, 在金属、硅及绝缘介质均能产生基底表面的局域近场增强, 但与 Au 在金属表面的增强效果相比还有一定差距。因此在纳米孔制备过程中, 要根据基底的介电环境, 选择恰当材质及尺寸的介电纳米小球才可以实现理想的近场增强效果, 从而实现超衍射纳米孔的加工。在大面积制备应用方面, 因介电小球阵列可有效改善 Au 球阵列中小球之间相互干扰的不足, 其研究应进一步深入。近场纳米加工需要优化小球所处的介电环境及小球尺寸来获得最佳的加工效果, 虽能很好地实现超衍射纳米加工, 但是也存在不能灵活控制加工图案及尺寸的不足, 因此如何改善这个问题将会是未来的重要研究方向。

参考文献

[1] ZENHAUSERN F, MARTIN Y, WICKRAMASINGHE H K. Scanning interferometric apertureless microscopy: optical imaging at 10 angstrom resolution[J]. *Science*, 1995, 269(5227): 1083–1085.

[2] NOLTE S, CHICHKOV B N, WELLING H, et al. Nanostructuring with spatially localized femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(13): 914–916.

[3] KREIBIG U, VOLLMER M. Optical properties of metal clusters[J]. Springer, 1995, 25(2): 278–279.

[4] MESSINGER B J, RABEN K U V, CHANG R K, et al. Local fields at the surface of noble-metal microspheres[J]. *Physical Review B*,

1981, 24(2): 649–657.

[5] H C VAN DE HULST. Light scattering by small particles[M]. Mineola: Dover Publications, 1981.

[6] NEDYALKOV N N, MIYANISHI T, OBARA M. Enhanced near field mediated nanohole fabrication on silicon substrate by femtosecond laser pulse[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(15): 6558–6562.

[7] MIYANISHI T, SAKAI T, NEDYALKOV N N, et al. Femtosecond-laser nanofabrication onto silicon surface with near-field localization generated by plasmon polaritons in gold nanoparticles with oblique irradiation[J]. *Applied Physics A*, 2009, 96(4): 843–850.

[8] TANAKA Y, NEDYALKOV N N, OBARA M. Enhanced near-field distribution inside substrates mediated with gold particle: optical vortex and bifurcation[J]. *Applied Physics A*, 2009, 97(1): 91–98.

[9] NEDYALKOV N N, TANAKA H, OBARA M. Nanostructuring of silicon surface by femtosecond laser pulse mediated with enhanced near-field of gold nanoparticles[J]. *Applied Physics A*, 2006, 85(2): 163–168.

[10] ATANASOV P A, TAKADA H, NEDYALKOV N N, et al. Nanohole processing on silicon substrate by femtosecond laser pulse with localized surface plasmon polariton[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8304–8308.

[11] ATANASOV P A, NEDYALKOV N N, SAKAI T, et al. Localization of the electromagnetic field in the vicinity of gold nanoparticles: surface modification of different substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 794–798.

[12] NEDYALKOV N, SAKAI T, MIYANISHI T, et al. Near field properties in the vicinity of gold nanoparticles placed on various substrates for precise nanostructuring[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2006, 39(39): 5037–5042.

[13] TANAKA Y, OBARA M. Comparison of resonant plasmon polaritons with mie scattering for laser-induced near-field nanopatterning: metallic particle vs dielectric particle[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(48): 122002–122002–7.

[14] NEDYALKOV N N, IMAMOVA S, ATANASOV P A, et al. Interaction between ultrashort laser pulses and gold nanoparticles: nanoheater and nanolens effect[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, 13(5): 2181–2193.

[15] NEDYALKOV N, SAKAI T, MIYANISHI T, et al. Near field distribution in two

dimensionally arrayed gold nanoparticles on platinum substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(12): 233119.

[16] WANG Z B, LUKIYANCHUK B S, HONG M H, et al. Energy flow around a small particle investigated by classical Mie theory[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(3): 2199–2208.

[17] HUANG S M, HONG M H, LUKIYANCHUK B, et al. Nanostructures fabricated on metal surfaces assisted by laser with optical near-field effects[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 293–296.

[18] TERAKAWA M, MITSUHASHI T, SHINOHARA T, et al. Near-infrared femtosecond laser-triggered nanoperforation of hollow microcapsules[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12604–12610.

[19] TAKADA H, OBARA M, TAKADA H. Fabrication of hexagonally arrayed nanoholes using femtosecond laser pulse ablation with template of subwavelength polystyrene particle array[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(11): 7993–7997.

[20] HUANG S M, WANG Z A, SUN Z, et al. Theoretical and experimental investigation of the near field under ordered silica spheres on substrate[J]. *Applied Physics A*, 2009, 96(2): 459–466.

[21] LI C H, KATTAR G W, ZAAI P W, et al. Electric and magnetic energy density distributions inside and outside dielectric particles illuminated by a plane electromagnetic wave[J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4554–4559.

[22] SAKAI T, TANAKA Y, NISHIZAWA Y, et al. Size parameter effect of dielectric small particle mediated nano-hole patterning on silicon wafer by femtosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2010, 99(1): 39–46.

[23] AFANASIEV A, BREDIKHIN V, PIKULIN A, et al. Two-color beam improvement of the colloidal particle lens array assisted surface nanostructuring[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(18): 133–317.

[24] BITYURIN N M. Surface nanostructuring by bichromatic femtosecond laser pulses through a colloidal particle array[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(6): 556–562.

[25] SAKAI T, NEDYALKOV N, OBARA M. Positive and negative nanohole-fabrication on glass surface by femtosecond laser with template of polystyrene particle array[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2007, 40(7): 36.

[26] SAKAI T, MIYANISHI T, NEDYALKOV N, et al. Nano-dimple processing of silicon surfaces by femtosecond laser irradiation with

dielectric particle templates in the Mie scattering domain[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2009, 42(2): 025502.

[27] SAKAI T, NEDYALKOV N, OBARA M. Friction characteristics of submicrometre-structured surfaces fabricated by particle-assisted near-field enhancement with femtosecond laser[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2007, 40(23): 7485-7491.

[28] TANAKA Y, OBARA G, ZENIDAKA A, et al. Femtosecond laser near-field nanoablation patterning using Mie resonance high dielectric

constant particle with small size parameter[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(26): 261103-261103-31.

[29] TANAKA Y, OBARA G, ZENIDAKA A, et al. Mie scattering and resonant plasmon polaritons for nano-ablation patterning[J]. American Institute of Physics, 2010: 242-249.

[30] TANAKA Y, OBARA G, ZENIDAKA A, et al. Near-field interaction of two-dimensional high-permittivity spherical particle arrays on substrate in the Mie resonance scattering domain[J]. Optics Express, 2010,

18(26): 27226-27237.

[31] 焦悦, 陶海岩, 季博宇, 等. 用于飞秒激光纳米加工的 TiO₂ 粒子阵列诱导多种基底表面近场增强[J]. 物理学报, 2017, 66(14): 338-347.

JIAO Yue, TAO Haiyan, JI Boyu, et al. Near field enhancement of TiO₂ nanoparticle array on different substrate for femtosecond laser processing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(14): 338-347.

通讯作者: 陶海岩, 讲师, 研究方向为飞秒激光与微纳结构制备, E-mail: hytao@cust.edu.cn.

Femtosecond Laser Near-Field Process by Nanospheres Beyond Diffraction Limit: Theoretical and Experimental Development

LOU Qianfeng¹, LIU Ziyuan¹, XUE Lei², TAO Haiyan¹, LIN Jingquan¹

(1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;

2. AVIC Chengdu CAIC Electronics Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

[ABSTRACT] During the femtosecond laser processing, how to break through the diffraction limit has always been an important problem. In recent years, nanospheres auxiliary femtosecond laser near field processing with characteristic size beyond the diffraction limit is recognized and developed gradually. It can fabricate nanoholes on the substrate surface of which scale is smaller than the incident laser diffraction limit, and can realize large area processing. In this paper, we will focus on the metal nanospheres and dielectric nanospheres, and introduce the study of nanospheres assisted femtosecond laser near field processing.

Keywords: Femtosecond laser; Near field processing; Beyond diffraction limit; Nanoparticles; Near field optics

(责编 大漠)

(上接第51页)

研磨机的设计与工艺研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(5): 41-43.

DIAO Jiandong, YANG Hui, GAO Ying.

Design of self-adaption face gear grinding machine[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(5): 41-43.

通讯作者: 杨辉, E-mail: yanghui303@aliyun.com.

Design of Large Load Horizontal-Type Hirth-Coupling Indexing Table and Analysis of Gear Lapping Process

YANG hui, ZHANG Bin, LI Jing

(Aeronautical Key Laboratory of Precision Manufacture Technology, Beijing Precision Engineering Institute Aviation Industry, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] With the application of precision hirth couplings indexing table in precision mechanical machining field, the needs for large load capacity is proposed. Based on the analysis of the structure of the hirth-coupling indexing table, the FEA and design and experiments are carried out on the parameters of hirth sharp, locking force and meshing state of the hirth. A new kind of gear lapping process is proposed, which improves the precision and efficiency of the hirth lapping, and finally guarantees the precision of the high load hirth couplings indexing table.

Keywords: Finite element analysis (FEA); Lapping; Hirth coupling; Meshing; Locking force

(责编 大漠)