

相干和非相干合成光束对金属瑞利粒子的光学俘获*

程科[†] 钟先琼 向安平

(成都信息工程学院光电技术学院, 成都 610225)

(2011年7月3日收到; 2011年7月29日收到修改稿)

研究了两光束的合成方式(相干和非相干合成)对俘获金属瑞利粒子的辐射力和稳定性的影响,着重研究了辐射力与合成方式、离轴距离、相干参数和粒子半径的关系.结果表明,不同合成方式下,离轴距离和相干参数都分别存在临界值 d_c 和 α_c , 在 $0 < d \leq d_c$ 或 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 时, 焦面处光强呈类高斯分布, 此时横向梯度力能作为回复力提供稳定平衡点; 而在 $d > d_c$ 或 $\alpha > \alpha_c$ 时, 焦面处光强呈中心凹陷分布, 此时横向梯度力不能作为回复力俘获金属瑞利粒子. 在 $0 < d \leq d_c$ 时, 与非相干合成光束比较, 相干合成光束在焦面处光强、辐射力、俘获刚性和纵向俘获范围更大. 因此, 适当选择合成方式, 较小离轴距离和较低相干参数可有利于合成光束对金属瑞利粒子的俘获.

关键词: 光学俘获, 辐射力, 相干和非相干合成, 金属瑞利粒子

PACS: 42.25.Kb, 42.65.Jx

1 引言

光学俘获(也称光镊), 它是将光束聚焦成微米量级的光斑, 利用光强的辐射力稳定地俘获微粒的技术. 自从 1970 年 Ashkin 利用聚焦光束的辐射力俘获水中的玻璃微粒以来^[1], 光学俘获这种非接触式的特点已成为操控纳米级粒子的有力手段, 俘获范围已由绝缘瑞利粒子延伸到金属瑞利粒子^[2,3]. 目前人们在理论和实验上对绝缘瑞利粒子的俘获和操控已做了较多研究, 例如使用聚焦贝塞尔光束、空心高斯光束、脉冲高斯光束、高斯谢尔光束和部分相干平顶光束的辐射力都可俘获和操控绝缘瑞利粒子^[4-9]. 另一方面, 金属粒子由于化学活性较高, 易与细胞结合, 且表面有很好的催化效果, 因此金属粒子的俘获技术也越发重要. 与绝缘瑞利粒子不同的是, 金属瑞利粒子由于其复介电常数的虚部不为零, 这将产生可与散射力相比拟的第三种力——吸收力, Zhan 的研究表明径向偏振光可对金属瑞利粒子形成有效的光学俘获^[10]. 值得进一步研究的问题是, 与传统的单光束光学俘获相比, 利用合成光束能否稳定俘获金属瑞利粒子. 本文使用两束离轴的部分相干平顶光束叠加而成的相干和非相干合成光束, 以金为例, 对合成光束作用于金属瑞利粒子上的辐射力(包括梯度力、散射

力和吸收力)做了分析, 着重研究了辐射力与合成方式、离轴距离、相干参数和粒子半径的关系, 所得结果对合成光束俘获和操控金属瑞利粒子有应用意义.

2 合成光束的光强分布

设平顶光束通过置于 $z = -f$ 处的焦距为 f 的透镜. 源 $z = -f$ 处的光场分布在柱坐标系下可写为^[11]

$$E(\mathbf{r}, z = -f) = E_0 \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \exp\left[-\frac{n\mathbf{r}^2}{w_0^2}\right], \quad (1)$$

式中, E_0 为归一化因子; w_0 为束腰宽度; N 为平顶光束的阶数 ($N = 1, 2, 3, \dots$), $\mathbf{r} = (x, y)$.

假定光束的功率为 P , 则有^[12]

$$P = \int_0^{+\infty} I(\mathbf{r}, z = -f) d\mathbf{r}, \quad (2)$$

$$I(\mathbf{r}, z = -f) = \frac{n_m \varepsilon_0 c}{2} |E(\mathbf{r}, z = -f)|^2, \quad (3)$$

式中, $I(\mathbf{r}, z = -f)$ 是源 $z = -f$ 处光强; n_m 是周围环境折射率; ε_0 是真空介电常数; c 是真空光速.

* 国家自然科学基金(批准号: 10874125), 四川省教育厅自然科学基金(批准号: No. 11ZB258)和成都信息工程学院科研基金(批准号: KYTZ201023)资助的课题.

[†] E-mail: ck@cuit.edu.cn

将 (1) 和 (3) 式代入 (2) 式, 得到归一化因子

$$E_0 = \left\{ 2P / \left[n_m \varepsilon_0 c \pi w_0^2 \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'}}{(n+n')N^2} \times \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \right] \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

引入谢尔相关项, 部分相干平顶光束在源 $z = -f$ 处交叉谱密度^[8]

$$W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = -f) = |E_0|^2 \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'}}{N^2} \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \times \exp \left[-\frac{n\mathbf{r}_1^2 + n'\mathbf{r}_2^2}{w_0^2} - \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{\sigma_0^2} \right], \quad (5)$$

式中, σ_0 是相关长度^[13].

考虑两平行非共线的部分相干平顶光束在源 $z = -f$ 处的合成. 为简单起见, 设两光束参数相同, 其中心都位于 x 轴上, 离轴距离为 $\mathbf{d}(d, 0)$, $d = d_x/\lambda > 0$, $d_y = 0$, 其中 d_x 和 d_y 分别表示光束中心在 x 和 y 方向偏离原点的距离. 在此, 分相干和非相干合成两种情况讨论, 并用脚标 “coh.” 和 “incoh.” 分别表示相干合成与非相干合成.

2.1 相干合成

假定两束离轴的部分相干平顶光束是完全相关的, 合成光束在源 $z = -f$ 处交叉谱密度为^[14]

$$W_{\text{coh.}}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = -f) = \sum_{l_1=-1/2}^{1/2} \sum_{l_2=-1/2}^{1/2} W_0(\mathbf{r}_1 - 2l_1\mathbf{d}, \mathbf{r}_2 - 2l_2\mathbf{d}, z = -f). \quad (6)$$

合成光束通过 ABCD 光学系统在任意 z 处的交叉谱密度由公式

$$W_{\text{coh.}}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi B} \right)^2 \iint W_{\text{coh.}}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, z = -f) \times \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [A(\mathbf{r}'_1{}^2 - \mathbf{r}'_2{}^2) - 2(\mathbf{r}_1\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_2\mathbf{r}'_2) + D(\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2)] \right\} d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2 \quad (7)$$

决定. 分别把 (5) 和 (6) 式代入 (7) 式, 可得到

$$W_{\text{coh.}}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z)$$

$$= \left(\frac{k|E_0|}{2B} \right)^2 \sum_{l_1=-1/2}^{1/2} \sum_{l_2=-1/2}^{1/2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'}}{N^2} \times \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [(\mathbf{r}_1 - 2l_1\mathbf{d})^2 - (\mathbf{r}_2 - 2l_2\mathbf{d})^2] \right\} P_1^{-1} P_2^{-1} \times \exp \left\{ -\frac{k^2(\mathbf{r}_1 - 2l_1\mathbf{d})^2}{4P_1 B^2} + \frac{[T_1(\mathbf{r}_1 - 2l_1\mathbf{d}) - T_2(\mathbf{r}_2 - 2l_2\mathbf{d})]^2}{4P_2} \right\}, \quad (8)$$

式中

$$P_1 = \frac{n}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} + \frac{ikA}{2B},$$

$$P_2 = \frac{n'}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{ikA}{2z} - \frac{1}{P_1\sigma_0^4},$$

$$T_1 = ik/(\sigma_0^2 B P_1), \quad T_2 = ik/B, \quad (9)$$

k 为波数, 与波长 λ 关系为 $k = 2\pi/\lambda$.

2.2 非相干合成

对非相干合成, 合成光束在源 $z = -f$ 处交叉谱密度为

$$W_{\text{incoh.}}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = -f) = \sum_{l=-1/2}^{1/2} W_0(\mathbf{r}_1 - 2l\mathbf{d}, \mathbf{r}_2 - 2l\mathbf{d}, z = -f). \quad (10)$$

通过 ABCD 光学系统在任意 z 处的交叉谱密度为

$$W_{\text{incoh.}}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi B} \right)^2 \iint W_{\text{incoh.}}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, z = -f) \times \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [A(\mathbf{r}'_1{}^2 - \mathbf{r}'_2{}^2) - 2(\mathbf{r}_1\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_2\mathbf{r}'_2) + D(\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2)] \right\} d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2. \quad (11)$$

分别把 (5) 和 (10) 式代入 (11) 式, 可得到

$$W_{\text{incoh.}}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{k|E_0|}{2B} \right)^2 \sum_{l=-1/2}^{1/2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \frac{(-1)^{n+n'}}{N^2} \times \binom{N}{n} \binom{N}{n'} \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [(\mathbf{r}_1 - 2l\mathbf{d})^2 - (\mathbf{r}_2 - 2l\mathbf{d})^2] \right\} P_1^{-1} P_2^{-1}$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{k^2(\mathbf{r}_1 - 2l\mathbf{d})^2}{4P_1B^2} + \frac{[T_1(\mathbf{r}_1 - 2l\mathbf{d}) - T_2(\mathbf{r}_2 - 2l\mathbf{d})]^2}{4P_2} \right\}. \quad (12)$$

(8) 和 (12) 式即分别为相干和非相干合成方式下, 两平行非共线的部分相干平顶光束叠加的合成光束通过 ABCD 光学系统在任意 z 处的交叉谱密度传输公式. 空间 (\mathbf{r}, z) 处的光强为

$$I(\mathbf{r}, z) = \frac{n_m \varepsilon_0 c}{2} W(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z), \quad (13)$$

为简便起见, (13) 式略去了脚标 “coh.” 和 “incoh.”.

聚焦场 ABCD 光学系统可写为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -z/f & z+f \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

将 (8), (9), (12) 和 (14) 式代入 (13) 式, 就可分别得到相干和非相干合成光束在空间 (\mathbf{r}, z) 处的光强. 可以看到, 光强与合成方式、离轴距离 d 和相关长度 σ_0 (或相干参数 $\alpha = \sigma_0/w_0$) 有关. 下面以计算例说明合成方式、离轴距离 d 和相干参数 α 对光强的影响, 数值计算中 $\lambda = 1.047\mu\text{m}$, $f = 10\text{mm}$, $w_0 = 10\text{mm}$ 和总功率 $P = 1\text{W}$ 保持不变.

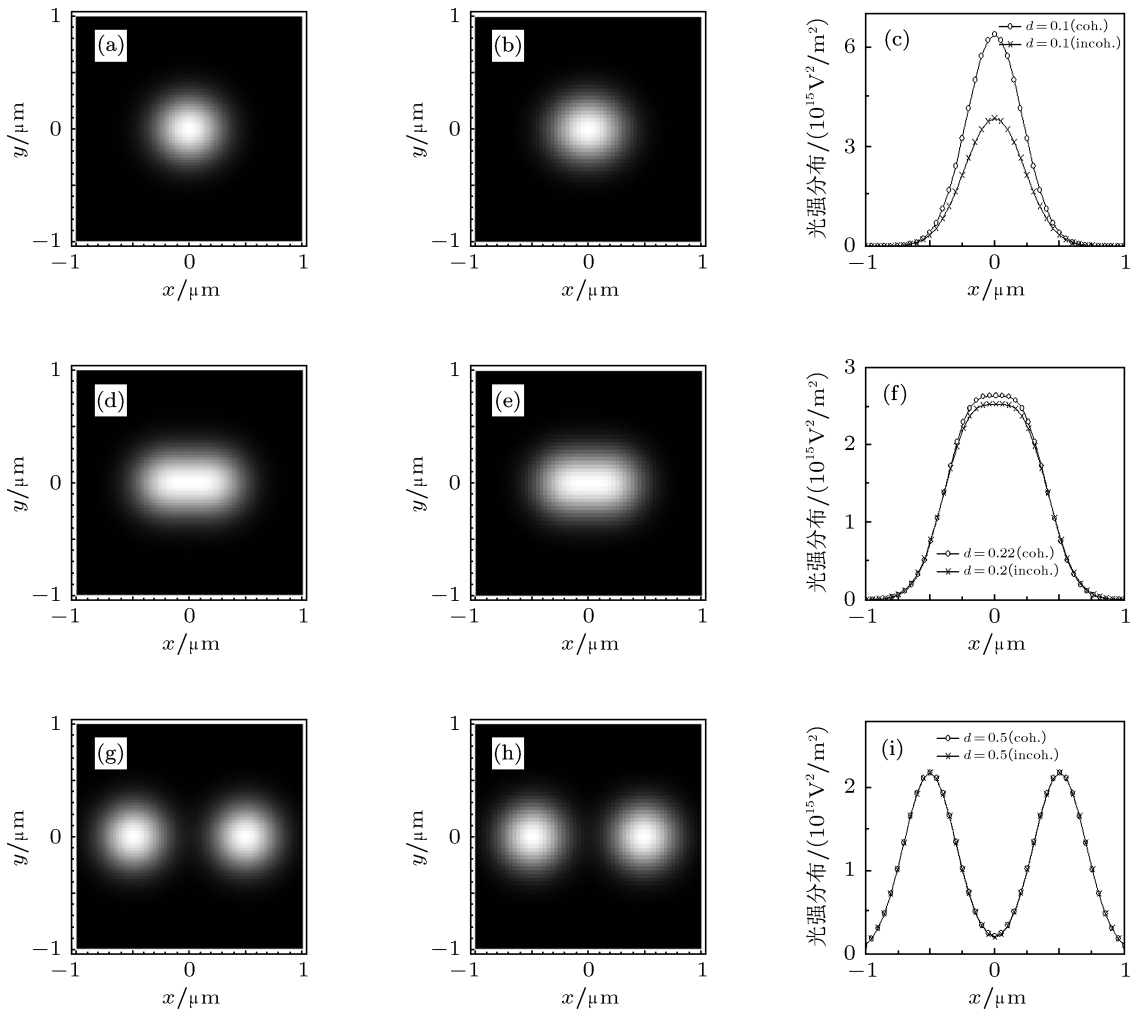


图 1 几何焦面 $z = 0$ 处, 不同合成方式下, 离轴距离 d 对光强的影响 (a), (d), (g) 相干合成光强分布; (b), (e), (h) 非相干合成光强分布; (c), (f), (i) 相干合成和非相干合成在 x 方向的光强分布

图 1 给出了在几何焦面 $z = 0$ 处, 不同合成方式下, 离轴距离 d 对光强的影响, 计算参数 $N = 4$, $\alpha = 1$. 从图 1 可以看到, 与非相干合成相比, 相干合成具有更大的峰值光强, 随着离轴距离 d 增大, 峰值光强逐渐减小, 并且光斑逐渐分离. 在不同合成

方式下, 离轴距离都存在临界值 d_c , 在 $0 < d \leq d_c$ 时, 焦面处光强呈类高斯分布, 而在 $d > d_c$ 时, 焦面处光斑分离, 且焦点处光强中心凹陷. 如图 1 所示, 相干合成与非相干合成方式下, 离轴距离 d 分别存在临界值 0.22 和 0.2, 在 $d = 0.1$ 时, 焦面处光强呈

类高斯分布;而在 $d = 0.5$ 时, 焦面处光强呈中心凹陷分布, 并且两种合成方式下的光强分布几乎重合. 可以看到, 随着离轴距离的增大, 两光束的相关性降低, 这时合成方式对光强影响很小.

图 2 给出了在几何焦面 $z = 0$ 处, 不同合成方式下, 相干参数 α 对光强的影响, 计算参数 $N = 6$, $d = 0.2$. 从图 2 可以看到, 随着相干参数 α 的增大, 峰值光强逐渐增大, 光斑逐渐分离且面积逐渐减小.

在不同合成方式下, 相干参数 α 也存在临界值 α_c , 在 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 时, 焦面处光强呈类高斯分布, 而在 $\alpha > \alpha_c$ 时, 焦面处光强呈中心凹陷分布. 如图 2 所示, 在相干与非相干合成方式下, 相干参数 α 分别存在临界值 1.13 和 1, 在 $\alpha = 0.4$ 时, 焦面处光强呈类高斯分布, 还注意到, 在低相干度情况下, 相干和非相干合成方式对光强影响较小. 而在 $\alpha = 2$ 时, 焦面处光强呈中心凹陷分布.

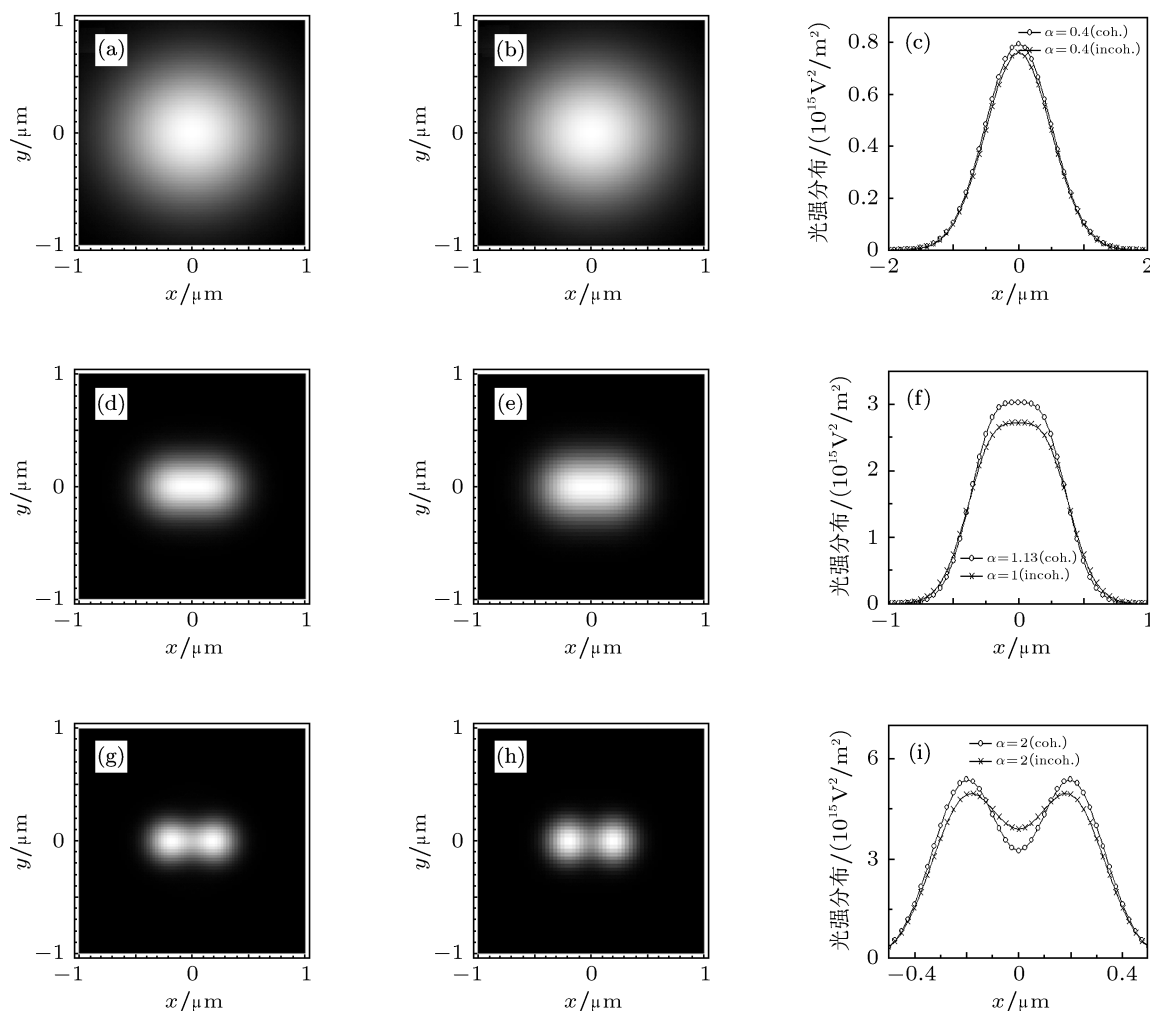


图 2 几何焦面 $z = 0$ 处, 不同合成方式下, 相干参数 α 对光强的影响 (a), (d), (g) 相干合成光强分布; (b), (e), (h) 非相干合成光强分布; (c), (f), (i) 相干合成和非相干合成在 x 方向的光强分布

3 金属瑞利粒子的辐射力和俘获稳定性

与绝缘瑞利粒子不同, 金属瑞利粒子散射的能量一部分从外场移去, 另一部分被金属粒子吸收, 以焦耳热消耗, 这时粒子会受到吸收力, 其方向沿传输方向. 当粒子是金属瑞利粒子时, 复介电常数的虚部不为零, 此时梯度力、散射力和吸收力的表达式分别为^[2]

$$F_{\text{grad}} = \varepsilon_0 \text{Re}(\chi) \nabla |E|^2 / 4, \quad (15)$$

$$F_{\text{scat}} = e_z n_m I(r, z) C_{\text{scat}} / c, \quad (16)$$

$$F_{\text{abs}} = e_z n_m I(r, z) C_{\text{abs}} / c, \quad (17)$$

其中, 极化率

$$\chi = 4\pi a^3 \varepsilon_m \left(\frac{\hat{\varepsilon} - \varepsilon_m}{\hat{\varepsilon} + 2\varepsilon_m} \right), \quad (18)$$

$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ 为金属的复介电常数, 与波长有关; $\varepsilon_m = n_m^2$ 为周围环境的介电常数; 散

射截面 $C_{\text{scat}} = k^4 |\chi|^2 / 6\pi$; 吸收截面 $C_{\text{abs}} = k_m \text{Im}(\chi) / \varepsilon_m$; $k_m = 2\pi n_m / \lambda$ 为周围介质中的波数; a 为粒子半径; e_z 为沿传输方向的单位矢量. 由 (15)—(17) 式可见, 散射力 F_{scat} 和吸收力 F_{abs} 与光强 $I(r, z)$ 成正比, 而梯度力 F_{grad} 与光强梯度 $\nabla I(x, y, z)$ 成正比.

如焦面处光强呈类高斯分布, 可知光束中心处 $\nabla |E|^2 < 0$, 要想获得稳定的平衡点, 则需横向梯度力能够作为回复力, 即 $\text{Re}(\chi) > 0$, 求解 (18) 式可得到

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_m/2)^2 + \varepsilon_2^2 > (3\varepsilon_m/2)^2, \quad (19)$$

$$\varepsilon_1 \neq -2\varepsilon_m, \varepsilon_2 \neq 0,$$

可以看到, 金属瑞利粒子的复介电常数 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ 位于以 $(-\varepsilon_m/2, 0)$ 为圆心, $3\varepsilon_m/2$ 为半径的圆的外部能满足横向梯度力作为回复力. 特别是 $\varepsilon_2 = 0$ (即绝缘瑞利粒子), (19) 式就简化为 $\varepsilon_1 > \varepsilon_m$, 也就是相对折射率 $n_1/n_m > 1$, 这与文献 [15] 一致.

如焦面处横向光强呈凹陷分布, 可知光束中心处 $\nabla |E|^2 > 0$, 同样地需满足 $\text{Re}(\chi) < 0$, 可得到

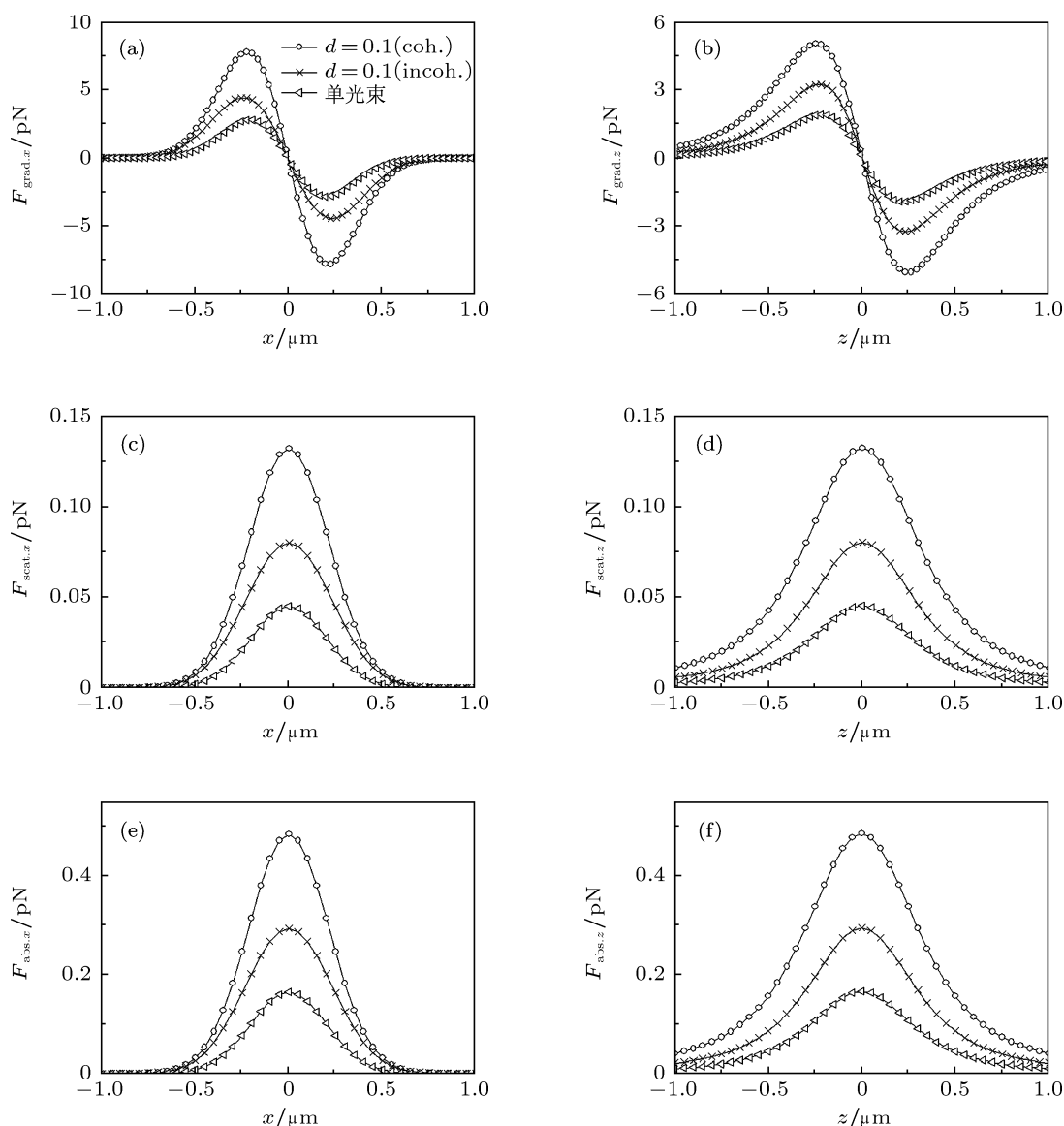


图3 几何焦平面 $z = 0$ 处, 在 $0 < d \leq d_c$ 时, 合成方式对辐射力的影响 (a), (c), (e) 横向辐射力; (b), (d), (f) 纵向辐射力

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_m/2)^2 + \varepsilon_2^2 < (3\varepsilon_m/2)^2, \quad (20)$$

$$\varepsilon_1 \neq -2\varepsilon_m, \varepsilon_2 \neq 0,$$

即 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ 位于以 $(-\varepsilon_m/2, 0)$ 为圆心, $3\varepsilon_m/2$ 为半

径的圆的内部能满足横向梯度力作为回复力. 同样地, $\varepsilon_2 = 0$, (20) 式就简化为 $\varepsilon_1 < \varepsilon_m$, 也就是相对折射率 $n_1/n_m < 1$, 这与文献 [16] 一致.

以金为例, 当入射光波长 $\lambda = 1.047 \mu\text{m}$ 时,

金的复介电常数 $\hat{\epsilon} = -54 + 5.9i$ ^[8], 周围环境折射率 $n_m = 1.33$ (例如水), 此时金的复介电常数 $(\epsilon_1, \epsilon_2) = (-54, 5.9)$ 在 $(\epsilon_1 + 0.88)^2 + \epsilon_2^2 = 7$ 圆的外部, 由 (19) 和 (20) 式可知, 焦面处横向光强呈类高斯分布时, 才可存在稳定平衡点, 这样我们可在 $0 < d \leq d_c$ 或 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 范围内研究合成光束对金属瑞利粒子的光学俘获, 计算参数取粒子半径 $a = 20nm$.

图 3 给出了几何焦平面 $z = 0$ 处, 在 $0 < d \leq d_c$ 时, 合成方式对辐射力的影响, 离轴参数 $d = 0.1$, 其他参数与图 1 相同, 为比较, 此处也给出了单光束对金属粒子的辐射力. 从图 3 可以看到, 与一般的绝缘粒子不同, 金属瑞利粒子会受到比散射力还要

大的吸收力, 但吸收力和散射力之和远小于梯度力. 横向和纵向梯度力表现为回复力, 有将粒子拉回焦点的趋势, 这使得粒子在焦点附近存在稳定的平衡点, 粒子在此附近可被俘获. 可以看到, 合成光束比单光束具有更大的辐射力、俘获刚性和俘获范围. 与非相干合成相比, 相干合成方式具有更大的辐射力和俘获刚性, 这是因为相干合成比非相干合成, 具有更大的峰值光强和光强梯度, 由图 1(c) 也可看到. 并且还可看到, 相干合成方式下, 纵向俘获范围更大, 而非相干合成方式下, 横向俘获范围更大, 这与光斑中心到焦点距离有关, 例如图 3(a) 中相干和非相干合成方式下, 横向俘获范围分别为 $10.8a$ 和 $11.8a$, 而纵向俘获范围分别为 $12.2a$ 和 $11.4a$.

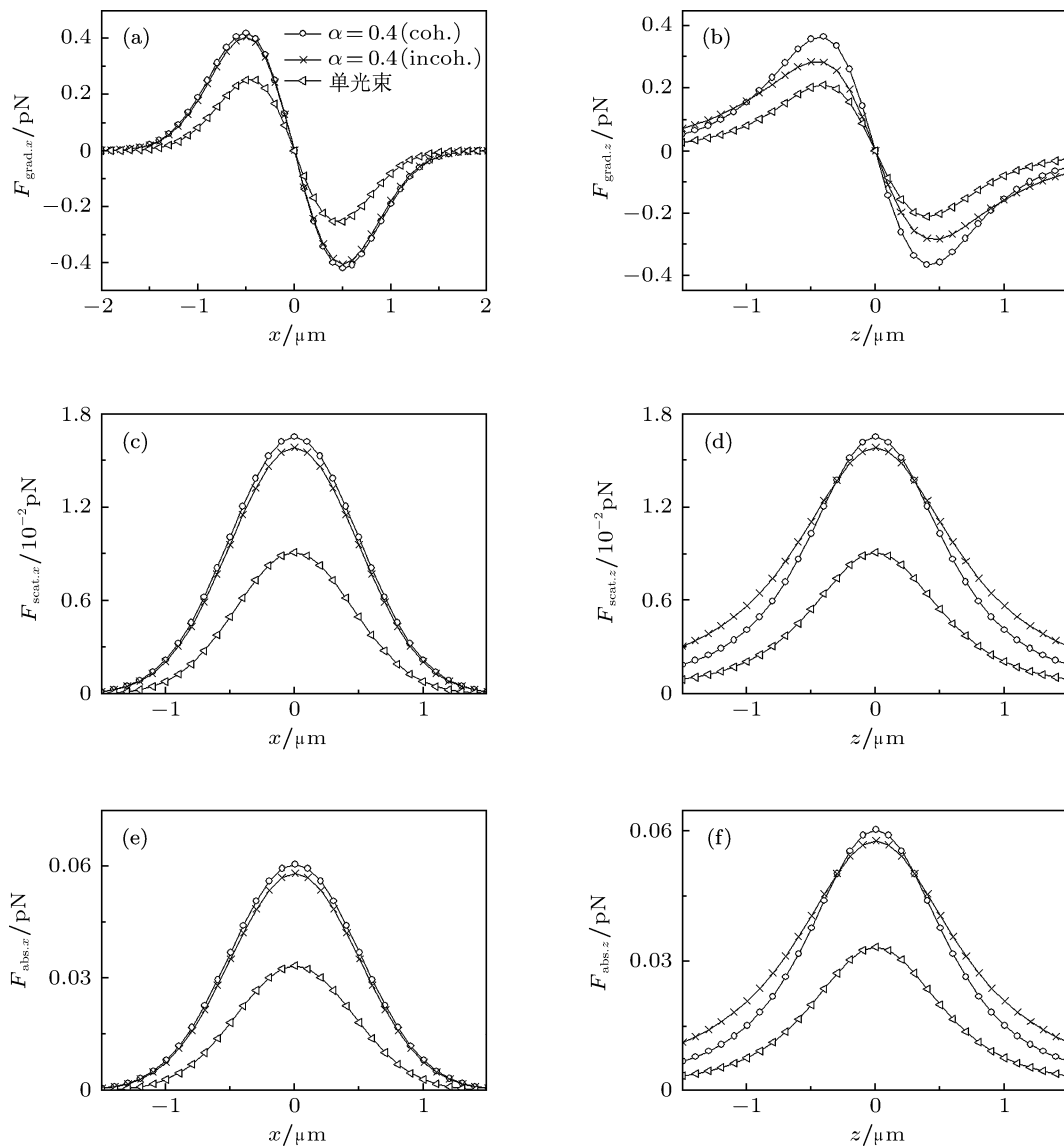


图 4 几何焦平面 $z = 0$ 处, 在 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 时, 合成方式对辐射力的影响 (a), (c), (e) 横向辐射力; (b), (d), (f) 纵向辐射力

图 4 给出了几何焦平面 $z = 0$ 处, 在 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 时, 合成方式对辐射力的影响, 相干参数 $\alpha = 0.4$, 其他参数与图 2 相同, 为比较, 也给出了单光束的辐射力. 从图 4 同样可看到, 合成光束比单光束具有更大的辐射力、俘获刚性和俘获范围. 在 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 范围内, 合成方式对辐射力影响很小, 例如图 4 中, 相干与非相干合成方式下, 横向梯度力分别为 0.42pN 和 0.4pN , 且所对应的横向俘获范围分别为 $25.4a$ 和 $25.2a$; 纵向梯度力分别为 0.37pN 和 0.27pN , 所对应的纵向俘获范围分别为 $21.2a$ 和 $22.7a$.

在瑞利近似下, 稳定地俘获金属瑞利微粒, 需满足: 1) 在最大纵向梯度力的位置处, 纵向梯度力 $F_{\text{grad},z}$ 必须克服 $F_{\text{scat},z} + F_{\text{abs},z}$ ^[2], 即稳定临界值 $R = |F_{\text{grad},z}|_{\text{max}} / |F_{\text{scat},z} + F_{\text{abs},z}| \geq 1$, 图 3 中相干与非相干方式下的稳定临界值分别为 12.3 和 11.7; 图 4 中相干与非相干方式下的稳定临界值分别为 6.8 和 5.2. 2) 考虑布朗运动的影响, 梯度力产生势阱的最大势能必须克服粒子的动能, 即要求玻尔兹曼因子 $R_{\text{thermal}} = \exp(-U_{\text{max}}/k_B T) \ll 1$, 其中 k_B 是玻尔兹曼常

数, T 是周围环境的温度, 梯度力产生势阱的最大值 $U_{\text{max}} = \text{Re}(\chi) I_{\text{max}} / (n_m c)$. 假定环境温度 $T = 300\text{K}$, 图 3 中相干与非相干方式下玻尔兹曼因子分别为 9.5×10^{-16} 和 1.6×10^{-15} , 图 4 中相干与非相干方式下玻尔兹曼因子分别为 1.9×10^{-16} 和 1.96×10^{-16} . 3) 梯度力需克服粒子的重力. 金的密度是 $19.32 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 半径是 20nm 的金瑞利粒子所受的重力是 $6.5 \times 10^{-7} \text{pN}$, 图 3 中相干与非相干方式下, 所对应的横向梯度力最大值分别为 7.8pN 和 4.4pN , 纵向梯度力最大值分别为 5.1pN 和 3.3pN ; 图 4 中相干与非相干方式下, 所对应的横向梯度力最大值分别为 0.42pN 和 0.4pN , 纵向梯度力最大值分别为 0.37pN 和 0.28pN ; 由此可见, 粒子的重力可忽略. 图 5 给出了辐射力 $|F_{\text{grad},x}|_{\text{max}}$, $|F_{\text{grad},z}|_{\text{max}}$, $|F_{\text{scat}} + F_{\text{abs}}|$ 和布朗力 $|F_B|$ 与粒子半径 a 的关系, 图 5(a) 和 (b) 计算参数与图 3 相同, 图 5(c) 和 (d) 计算参数与图 4 相同. 从图 5 可以看到, 随着粒子半径 a 的增加, 辐射力增加, 而稳定临界值 R 减小, 在瑞利近似范围内 ($a < \lambda/20$), 两种合成方式均可稳定的俘获金属瑞利粒子.

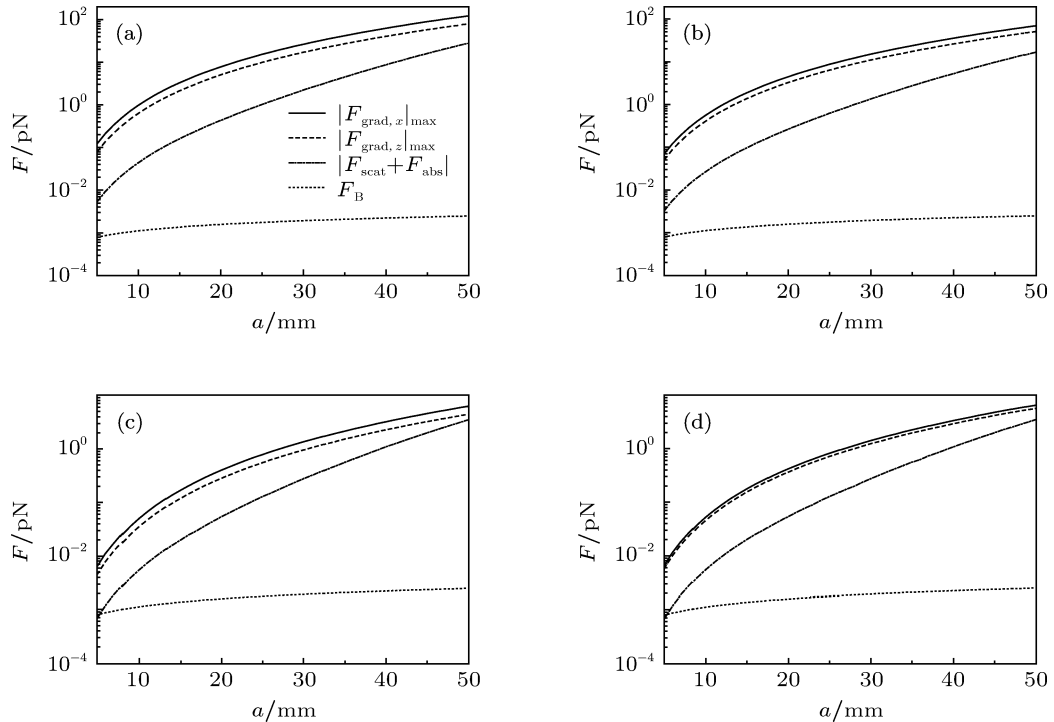


图 5 辐射力 $|F_{\text{grad},x}|_{\text{max}}$, $|F_{\text{grad},z}|_{\text{max}}$, $|F_{\text{scat}} + F_{\text{abs}}|$ 和布朗力 $|F_B|$ 与粒子半径 a 的关系 (a), (c) 相干合成; (b), (d) 非相干合成

4 结论

本文首次使用合成光束对金属瑞利粒子(例如金)的辐射力和俘获稳定性做了分析,着重研究了辐射力与合成方式、离轴距离、相干参数和粒子半径的关系.结果表明,不同合成方式下,离轴距离和相干参数都分别存在临界值 d_c 和 α_c ,在 $0 < d \leq d_c$ 或 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 时,几何焦面处光强呈类高斯分布,此时横向梯度力能作为回复力提供稳定平衡点;而在 $d > d_c$ 或 $\alpha > \alpha_c$ 时,几何焦面处光强呈中心凹陷分布,此时横向梯度力不能作为回复力俘获金属瑞利粒子.在 $0 < d \leq d_c$ 时,与非相

干合成光束比较,相干合成光束在焦面处光强、辐射力、俘获刚性和纵向俘获范围更大;而在 $d > d_c$ 时,随着离轴距离的增大,两光束的相关性降低,合成方式对光强影响可忽略.在 $0 < \alpha \leq \alpha_c$ 时,与非相干合成光束比较,相干合成光束在焦面处光强、辐射力、俘获刚性和横向俘获范围相差不大.与文献中已有工作比较^[8,10],本文主要特点是采用了合成光束(相干和非相干合成)俘获金属瑞利粒子,其焦面处光强随参数不同可呈类高斯分布或中心凹陷分布.因此,在利用合成光束俘获金属瑞利粒子时,适当选择合成方式,较小离轴距离和较低的相干参数可有利于金属瑞利粒子的俘获.

-
- [1] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156
 [2] Svoboda K, Block S M 1994 *Opt. Lett.* **19** 930
 [3] Hiromitsu F, Ichirou Y 1998 *Opt. Lett.* **23** 216
 [4] Garcés-Chávez V, Roskey D Summers M D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4001
 [5] Wang L G, Zhao C L 2007 *Opt. Express* **15** 10615
 [6] Wang L G, Zhao C L, Wang L Q 2007 *Opt. Lett.* **32** 1393
 [7] Zhao C L, Wang L G, Lu X H 2007 *Phys. Lett. A* **363** 502
 [8] Zhao C L, Cai Y J, Lu X H 2009 *Opt. Express* **17** 1753
 [9] Yi X N, Liu J S, Chen H, Du Q J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 114204
 [10] Zhan Q W 2004 *Opt. Express* **15** 3377
 [11] Li Y 2002 *Opt. Lett.* **27** 1007
 [12] Harada Y, Asakura T 1996 *Opt. Commun.* **124** 529
 [13] Turunen J, Friberg A T 1986 *Opt. & Laser Tech.* **18** 259
 [14] Cheng K, Lü B D 2008 *J. Mod. Opt.* **55** 2751
 [15] Neuman K C, Block S M 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 2787
 [16] Gahagan K T, Swartzlander G A 1996 *Opt. Lett.* **21** 827

Optical trapping of metallic Rayleigh particles by using coherently and incoherently combined beams*

Cheng Ke[†] Zhong Xian-Qiong Xiang An-Ping

(College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

(Received 3 July 2011; revised manuscript received 29 July 2011)

Abstract

The effect of two beam combination schemes, i.e. combination of coherent and incoherent beam, on the radiation force and stability in trapping metallic Rayleigh particles is studied, where the dependences of the radiation force on beam combination scheme, off-axis distance, coherence parameter and particle radius are stressed and illustrated by numerical examples. It is shown that there exist critical values d_c and α_c for different combination schemes. For $0 < d \leq d_c$ or $0 < \alpha \leq \alpha_c$ the Gaussian-like intensity profile takes place in the geometrical focal plane, so that the transverse gradient force can act as a restoration force to provide stable equilibrium point. For $d > d_{0,c}$ or $\sigma_0 > \sigma_{0,c}$ the transverse gradient force can not trap metallic Rayleigh particles. For $0 < d \leq d_c$ the intensity, the radiation force, the trapping stiffness, and the longitudinal trapping range of coherently combined beam are larger than those of incoherently combined beams. Therefore, a suitable choice of combination scheme, smaller off-axis distance and coherence parameter is beneficial to trapping metallic Rayleigh particles in the use of combined beams.

Keywords: optical trapping, radiation force, coherent and incoherent combinations, metallic Rayleigh particle

PACS: 42.25.Kb, 42.65.Jx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10874125), the Natural Science Foundation of Sochua Education Committee (Grant No. 11ZB258), and the Scientific Foundation of Chengdu University of Information Technology (Grant No. KYTZ201023).

[†] E-mail: ck@cuit.edu.cn