

# 基于多波长照明的透过散射介质成像

王歆<sup>1,2</sup>, 刘红林<sup>1\*</sup>, 胡晨昱<sup>1,2</sup>, 王鹏威<sup>1,2</sup>, 韩申生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 基于散斑自相关的成像方式是散射成像领域的研究热点,但成像过程中的统计噪声会影响成像结果。利用点扩展函数(PSF)对波长的响应,提出了一种提高二值目标成像质量的方法。因 PSF 对波长敏感,且不同波长对应的 PSF 不同,甚至完全不相干。PSF 不相干散斑图案的自相关叠加,可以有效抑制自相关中的统计噪声,从而改善重建结果的质量。仿真模拟和实验结果表明,在相同的探测距离和采样面积下,相比于重建失败的单一波长采样,该方法能准确地重建目标。

**关键词** 散射成像; 散斑自相关; 点扩展函数; 相位恢复

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1611002

## Transmissive Imaging Through Scattering Media Based on Multi-Wavelength Illumination

Wang Xin<sup>1,2</sup>, Liu Honglin<sup>1\*</sup>, Hu Chenyu<sup>1,2</sup>, Wang Pengwei<sup>1,2</sup>, Han Shensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China

**Abstract** Imaging based on speckle autocorrelation is a research hotspot in the field of scattering imaging, but the statistical noise in the imaging process will affect the imaging results. In this paper, by utilizing the response of point spread function (PSF) to wavelength, we propose a method to improve the imaging quality of binary target. Since the PSF is sensitive to the wavelength, and the PSF corresponding to different wavelengths is different or even completely uncorrelated with each other. The autocorrelation superposition of different speckle patterns with uncorrelated PSFs can effectively suppress the statistical noise in the autocorrelation, and thus improve the quality of reconstructions. Simulation and experimental results show that, at the same detection distance and sampling area, compared to the single wavelength sampling failed in reconstruction, the proposed method can reconstruct the target completely and accurately.

**Key words** scattering imaging; speckle autocorrelation; point spread function; phase retrieval

**OCIS codes** 110.0113; 110.0115; 100.4550

## 1 引 言

光经过雾、霾、云等散射介质时,随机散射会扰乱波前<sup>[1]</sup>,导致传统方式无法满足成像需求。常见的散射成像方法包括:利用空间光调制器补偿相位调整波前,从而重现目标的波前整形技术<sup>[2-4]</sup>;通过预先测量传输矩阵,将散射层的输入和输出模式联系起来,进而从散斑中计算出目标图像的矩阵测量

法<sup>[5-7]</sup>;通过记录信号相位并反演重现目标的相位共轭技术<sup>[8-10]</sup>。这些方法都需要校准系统,且过程复杂、耗时长,同时对系统的稳定性要求较高。

近年来,基于光学记忆效应<sup>[11]</sup>的散斑自相关方法<sup>[12-17]</sup>发展迅速,其不需要繁琐的标定过程,不用侵入散射系统内部,同时对被动照明场景有很好的适应性。2012年, Bertolotti 等<sup>[12]</sup>利用探测强度的角度相关实现了荧光目标的透过散射介质成像。2014

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-04-12; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61971146)

\* E-mail: hlliu4@hotmail.com

年, Katz 等<sup>[13]</sup>利用单帧散斑的自相关实现了散射系统中未知目标的重建。2017年, Cua 等<sup>[14]</sup>通过散斑差值的自相关实现了亮背景场中运动目标的成像。2018年, Guo 等<sup>[17]</sup>通过散斑相关实现了运动目标的追踪和成像。但散斑自相关方法需要保证足够的采样, 以抑制自相关过程中的统计噪声, 所以上述实验中像距(探测器到散射介质的距离)相对物距(目标到散射介质的距离)较小, 难以满足部分场景中对远距离探测的需求。虽然可通过增大探测器面积或加入大孔径透镜实现大像距成像, 但耗费空间和成本, 同时非单色光源照明时, 还会受到散斑场辐射状结构<sup>[18-20]</sup>的限制。

点扩展函数(PSF)对波长敏感, 随着波长差的增大, 不同波长对应的 PSF 之间的相关性逐渐下降, 直至不相干。本文通过叠加不同波长散斑图的自相关抑制统计噪声, 实现较远探测距离下二值目标的重建。通过仿真模拟和实验进行了验证, 结果表明, 该方法一定程度上解决了采样受限问题, 减少了对光源功率以及采样面积的依赖, 具有广泛的应用前景。

## 2 原理与仿真

### 2.1 方法原理

记忆效应<sup>[11]</sup>范围内的点光源经过散射介质后形成的 PSF 具有平移不变性, 该范围内的目标  $O$  被波长为  $\lambda$  的窄带非相干光照射时, 探测器上的散斑分布可以近似表示为<sup>[13]</sup>

$$I = O_M * S_\lambda, \quad (1)$$

式中,  $O_M$  为匹配成像中放大关系引入的物理量, 相对目标  $O$  放大了  $M = v/u$  ( $u$  为目标到散射介质的距离,  $v$  为探测器到散射介质的距离) 倍,  $S_\lambda$  是波长为  $\lambda$  时系统的 PSF,  $*$  为卷积算符。根据卷积定理<sup>[12, 21]</sup>, 散斑  $I$  的自相关可表示为  $O_M$  的自相关和  $S_\lambda$  的自相关的卷积

$$I \star I = (O_M * S_\lambda) \star (O_M * S_\lambda) = (O_M \star O_M) * (S_\lambda \star S_\lambda), \quad (2)$$

式中,  $\star$  为相关算符。由于  $S_\lambda \star S_\lambda$  是一个尖峰函数<sup>[12-13]</sup>, 相比  $O_M$  的自相关,  $S_\lambda \star S_\lambda$  可以近似为一个 ‘ $\delta$ ’ 函数<sup>[14]</sup>, 因此可将(2)式简化为

$$I \star I = O_M \star O_M + N, \quad (3)$$

式中,  $N$  为相关操作中的统计噪声。

对于一系列波长  $\lambda$  不同的采样, 如果任意两张散斑图案的 PSF 完全不相干, 且  $S_\lambda \star S_\lambda$  相对于  $O_M \star O_M$  始终为尖峰函数, 则该组散斑图案的自相

关之和为

$$\sum_{k=1}^n I_k \star I_k = \sum_{k=1}^n (O_M \star O_M + N_k) = nO_M \star O_M + \sum_{k=1}^n N_k, \quad (4)$$

式中,  $n$  为  $O_M$  的近似自相关叠加倍数,  $N_k$  的叠加则是一个无规则叠加, 对(4)式进行归一化, 得到

$$\sum_{k=1}^n I_k \star I_k \propto O_M \star O_M. \quad (5)$$

式中,  $\propto$  为正比符号。结合 Wiener-Khinchin 定理, 得到目标的功率谱密度为<sup>[13]</sup>

$$|\mathcal{F}(O_M)|^2 = \mathcal{F}(O_M \star O_M) \propto \mathcal{F}\left(\sum_{k=1}^n I_k \star I_k\right) = \sum_{k=1}^n \mathcal{F}(I_k \star I_k) = \sum_{k=1}^n |\mathcal{F}(I_k)|^2, \quad (6)$$

式中,  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换算符。

实验采用 “Fienup-type” 迭代相位恢复算法<sup>[12-13, 22-23]</sup>从功率谱中重建目标图像, 算法流程<sup>[13]</sup>如图 1 所示。循环从一个随机或预判的目标图像  $(O_M)_k, k=1$  开始, 一次迭代过程为: 对  $(O_M)_k$  执行傅里叶变换, 并用  $\sqrt{\sum_{k=1}^n |\mathcal{F}(I_k)|^2}$  替代  $(O_M)_k$  的幅值谱, 对重组后的  $\sqrt{\sum_{k=1}^n |\mathcal{F}(I_k)|^2} \exp(i\theta_k)$  ( $\theta_k$  为  $(O_M)_k$  的相位谱) 进行逆傅里叶变换得到  $(O_M)'_k$ , 对  $(O_M)'_k$  进行实数和非负约束得到  $(O_M)_{k+1}$ 。

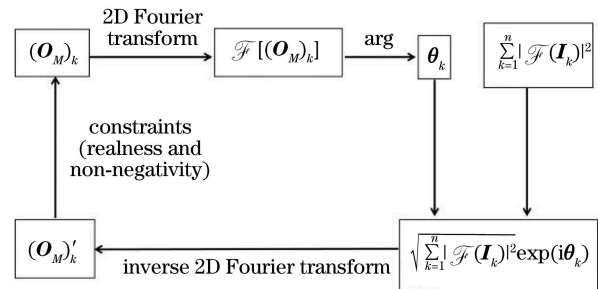


图 1 迭代相位恢复算法框图

Fig. 1 Block diagram of the iterative phase retrieval algorithm

### 2.2 模拟与实验结构

图 2 为模拟实验的光路结构示意图。热光透过滤波片后照明一个透射型、高度为  $350 \mu\text{m}$  的平面数字 “5”, 携带目标信息的光经过散射介质后由探测器接收。光阑用于限制散斑大小和对比度, 紧贴散射介质后表面放置, 其中,  $u = 6 \text{ cm}, v = 15 \text{ cm}$ 。

仿真时用赝热光代替图 2 中的热光源和滤波片组合, 使用菲涅耳衍射模拟传播过程, 每次采样都是

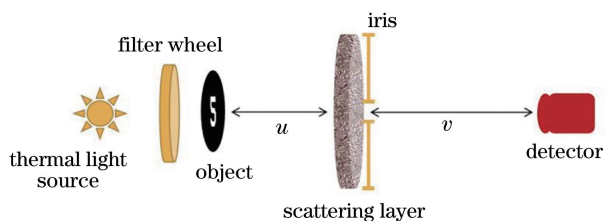


图 2 光路结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical structure

对目标进行 2000 次随机散斑照明所累积的探测面散斑图案。用毛玻璃起伏函数生成的相位屏作为散射介质,函数中参数:折射率为 1.52、颗粒平均直径为  $16 \mu\text{m}$ 、颗粒涨落为  $0.5 \mu\text{m}$ <sup>[24-25]</sup>。仿真参数:光阑直径为 1 mm,探测面的阵列尺寸为  $160 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$ ,像素尺寸  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 。

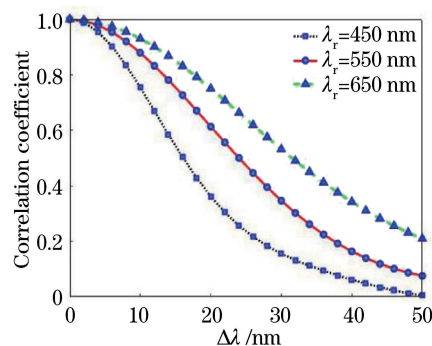
实验中用卤钨灯作为光源,滤波轮上装有带宽为 10 nm,中心波长分别为 450,500,550,600,650,700 nm 的滤波片(Thorlabs),将滤波片置于卤钨灯与目标之间。散射介质为一块毛玻璃(Thorlabs- $\varnothing 1''$  N-BK7-DG10-600),光滑面靠近光源一侧。为提高采样信噪比,将光阑直径增大为 2 mm。探测器型号为 Apogee Alta U47,探测面的阵列尺寸为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,像素尺寸为  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 。采样时旋转滤波轮可选择不同的中心波长。采样应满足奈奎斯特采样定律(采样频率大于信号最高频率的 2 倍),并充分利用探测器的满阱容量以抑制噪声。选取探测阵列中心尺寸为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  作为有效探测面进行数据处理,以减少非单色照明造成的散斑发散<sup>[18-20]</sup>的影响。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模拟结果与分析

模拟得到参考波长  $\lambda_r$  分别为 450,550,650 nm 时,对应的 PSF 与  $\lambda_r + \Delta\lambda$  对应 PSF 的相关系数变化,如图 3 所示。其中,  $\Delta\lambda$  为波长差,可以发现,波长差小于 10 nm 时,不同波长对应的 PSF 之间具有较大的相关性;波长差大于 50 nm 时,不同波长对应的 PSF 几乎不相干。且随着参考波长的增大,获得不相干 PSF 的波长差逐渐增大。

根据上述结果,进一步模拟了目标被单一波长赝热光照明时,探测面上的散斑分布、散斑自相关、重建结果以及叠加处理后的自相关和重建结果,如图 4 所示。图 4(a)为赝热光波长为 450 nm 时探测

图 3 不同波长的 PSF 相关系数与  $\Delta\lambda$  的变化关系Fig. 3 Relationship between the correlation coefficient of PSF at different wavelengths and  $\Delta\lambda$ 

器采样面上的散斑分布,可以发现,此时目标信息视觉上已经无法分辨;图 4(b)、图 4(c)分别对应其自相关和重建结果;为了对比,给出了  $O_M$  的自相关图,如图 4(d)所示;4(e)为赝热光波长为 450,500,550,600,650,700 nm 时生成的散斑图案的自相关叠加;图 4(f)为图 4(e)对应的重建结果。可以发现,多张波长采样的自相关叠加可以抑制自相关操作中的统计噪声,使总体自相关更接近  $O_M \star O_M$ ,恢复结果更清晰。因相位恢复都是从一个随机的初始值开始,在迭代一定次数后终止,所以每次恢复所得结果都不完全相同。图 4(c)、图 4(f)是相同迭代次数下,针对两种采样方法的重建结果。

#### 3.2 实验结果与分析

实验中综合考虑了不同波段的光功率、毛玻璃的透过率、探测面的散斑大小,结合模拟结果,在 450~700 nm 波段内,以 50 nm 为间隔进行采样,结果如图 5 所示。实验中较强的环境噪声会导致散斑图案的直接自相关具有严重的本底干扰,因此选用

计算处理后的幅值谱  $\sqrt{\sum_{k=1}^n |\mathcal{F}(I_k)|^2}$  代替自相关进行比较。图 5(a)为滤波片中心波长为 450 nm 时探测面上的散斑图案,图 5(b),图(c)分别对应了其幅值谱和重建结果,图 5(e)是中心波长分别为 450,500,550,600,650,700 nm 时对应的散斑图案的平均幅值谱,图 5(f)是图 5(e)的重建结果。为了对比,给出了目标的幅值谱,如图 5(d)所示。可以发现,多张采样平均后的幅值谱更接近真实幅值谱,重建结果也更准确。实验将滤波轮置于光源一侧以保护光学元件,条件允许时,滤波轮位于探测器一侧会更符合非侵入模型、减少环境噪声。

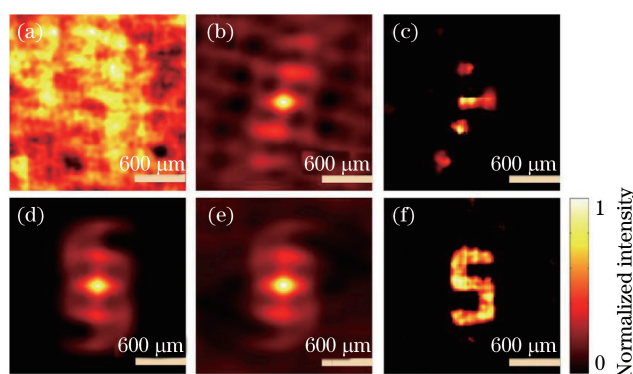


图 4 模拟结果。(a)波长为 450 nm 时的散斑图案;(b)图(a)的自相关;(c)图(b)的重建结果;(d)  $O_M$  的自相关;  
(e)多个波长生成的散斑图案自相关的叠加;(f)图(e)的重建结果

Fig. 4 Simulation results. (a) Speckle pattern at wavelength of 450 nm; (b) autocorrelation of Fig. (a); (c) reconstruction result of Fig. (b); (d) autocorrelation of  $O_M$ ; (e) superposition of autocorrelations of speckle patterns generated by multi-wavelength; (f) reconstruction result of Fig. (e)

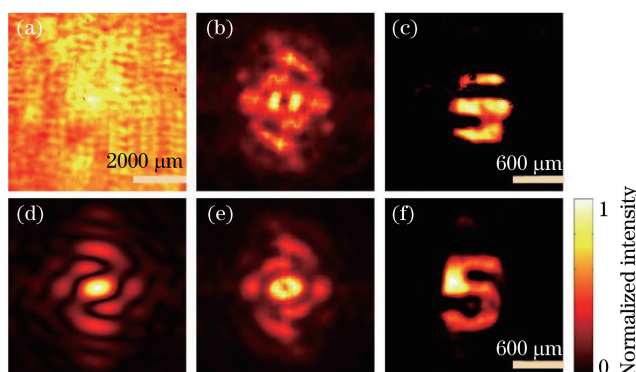


图 5 实验结果。(a)波长为 450 nm 时的散斑图案;(b)图(a)的幅值谱;(c)图(b)的重建结果;(d)目标的幅值谱;  
(e)多个波长散斑图案的平均幅值谱;(f)图(e)的重建结果

Fig. 5 Experimental results. (a) Speckle pattern at wavelength of 450 nm; (b) amplitude spectrum of Fig. (a); (c) reconstruction result of Fig. (b); (d) amplitude spectrum of the target; (e) averaged amplitude spectrum of speckle patterns generated by multi-wavelength; (f) reconstruction result of Fig. (e)

## 4 结 论

提出了一种利用 PSF 对波长的响应来提高二值目标重建质量的方法。理论分析了不相干的 PSF 在抑制噪声,提高成像质量方面的可行性。模拟了不同波长 PSF 之间的相关系数随波长差的变化规律。结果表明,针对同一参考波长,随波长差的增大,PSF 之间的相关性逐渐下降。模拟和实验验证结果均表明,在相同的采样面积与探测距离下,多波长采样可以抑制单一波长采样不足造成的统计噪声,实现对目标的准确重建。该方法对系统的探测面积、采样带宽和光源能量等要求更低,探测距离更远。

实验中需注意的地方包括:随参考波长的增大,获得不相干 PSF 的波长差逐渐增大,有限的光谱以

及逐渐变大的散斑限制了改善的极限,即该方法的衍射分辨率极限取决于采样所选的最大波长;散射介质的材料特性也会影响获得不相干 PSF 所需的最小波长差,针对未知散射介质,可以通过散斑相关性来选择合适的波长间隔;采样应满足奈奎斯特采样定律以完整保留信号,并充分利用探测器满阱容量以抑制噪声,数据处理时应该结合低通滤波和均值滤波等操作以减小噪声的干扰。

多波长采样相比单一波长采样具有明显的成像优势,但目前仅局限于重建记忆效应范围内的简单目标,对复杂目标以及超记忆效应范围的成像有待进一步研究探索。

## 参 考 文 献

- [1] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological

- samples[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 110-115.
- [2] Katz O, Small E, Silberberg Y. Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 549-553.
- [3] Horstmeyer R, Ruan H, Yang C. Guide star-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 563-571.
- [4] Vellekoop I M. Feedback-based wavefront shaping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12189-12206.
- [5] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [6] Chaigne T, Katz O, Boccara A C, et al. Controlling light in scattering media non-invasively using the photoacoustic transmission matrix [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(1): 58-64.
- [7] Andreoli D, Volpe G, Popoff S, et al. Deterministic control of broadband light through a multiply scattering medium via the multispectral transmission matrix[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10347.
- [8] Xu X, Liu H L H, Wang L H V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 154.
- [9] Wang Y M, Judkewitz B, Dimarzio C A, et al. Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 928.
- [10] Liu Y, Lai P X, Ma C, et al. Optical focusing deep inside dynamic scattering media with near-infrared time-reversed ultrasonically encoded (TRUE) light [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5904.
- [11] Freund I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [12] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [13] Katz O, Heidmann P, Fink M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 784-790.
- [14] Cua M, Zhou E H, Yang C. Imaging moving targets through scattering media[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3935-3945.
- [15] Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004.  
谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111004.
- [16] Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111005.  
朱磊, 邵晓鹏. 散射成像技术的研究进展 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111005.
- [17] Guo C F, Liu J T, Wu T F, et al. Tracking moving targets behind a scattering medium via speckle correlation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 905-913.
- [18] Tomita Y, Nakagawa K, Asakura T. Fibrous radial structure of speckle patterns in polychromatic light [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(18): 3211-3218.
- [19] Stansberg C T. Surface roughness measurements by means of polychromatic speckle patterns[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 4051-4060.
- [20] Lehmann P. Aspect ratio of elongated polychromatic far-field speckles of continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 2008-2014.
- [21] Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1970, 6: 85-87.
- [22] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. *Optics Letters*, 1978, 3(1): 27-29.
- [23] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [24] Seem P R, Buchanan J D R, Cowburn R P. Impact of surface roughness on laser surface authentication signatures under linear and rotational displacements [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3175-3177.
- [25] Cheng C F, Qi D P, Liu D L, et al. The computational simulations of the Gaussian correlation random surface and its light-scattering speckle field and the analysis of the intensity probability density [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 48(9): 1635-1643.  
程传福, 亓东平, 刘德丽, 等. 高斯相关随机表面及其光散射散斑场的模拟产生和光强概率分析 [J]. *物理学报*, 1999, 48(9): 1635-1643.