

D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统

吴寒旭, 宁莹, 邱丽荣, 王允, 赵维谦*

北京理工大学光电学院精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 共焦布里渊光谱技术因其具有非接触、无损伤、高空间分辨等优点, 在生物医学、物理化学以及材料科学中被广泛应用。由于布里渊散射频移较低、强度较弱, 在弹性散射光没有被充分抑制的情况下, 布里渊散射光容易受到弹性散射光的影响, 导致光谱测量结果精度的下降, 而且传统共焦布里渊光谱系统仍存在光谱轴向分辨力与层析能力不足等缺点, 严重限制了共焦布里渊光谱探测系统在高散射样品以及长工作距离光谱探测领域中的应用。为改善共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力、光谱轴向分辨力以及层析能力, 构建了一种D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统。该系统通过侧向照明与侧向收集的方式消除背向散射, 降低弹性散射强度, 有效抑制弹性散射对布里渊散射的干扰, 进而提高共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力。通过D形光瞳对照明点扩散函数与收集点扩散函数进行调制, 利用斜入射的方式使照明点扩散函数与收集点扩散函数仅在焦平面上发生重叠, 在轴向上实现三维点扩散函数的压缩, 有效去除离焦光谱信息对焦面光谱信息的干扰, 降低轴向光谱强度响应曲线的半高全宽与全高全宽, 进而达到提高共焦布里渊光谱探测系统的光谱轴向分辨力以及层析能力的效果。实验表明: 相比于共焦布里渊光谱探测系统, D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力与层析能力得到大幅提升, 通过优化光瞳参数, 其光谱轴向分辨力可以提高30%以上, 进而可以有效解决多层样品中的光谱串扰问题。D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统作为一种具有高层析能力、抗弹性散射能力强的布里渊光谱探测系统, 为布里渊光谱技术在现代前沿基础学科领域中的进一步应用提供了有力保证。

关键词 共焦布里渊; 层析测量; 抗弹性散射

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)06-1679-06

引言

共焦布里渊光谱探测系统通过测量样品微区声学声子的属性, 对被测材料的机械性能进行表征^[1-4]。由于其具有非接触、高空间分辨等优点, 在生物医学检测^[5-6]、材料科学^[7]、物理化学等领域中被广泛应用^[8-9]。由于弹性散射光比布里渊散射光强几个数量级, 在没有充分抑制弹性散射光的情况下, 其残余分量会与布里渊光谱发生重叠, 难以实现布里渊光谱的精确测量^[10-13]。此外, 传统的共焦布里渊光谱探测系统进行高空间分辨层析探测是通过高数值孔径物镜实现^[14], 导致共焦布里渊光谱探测系统的工作距离及层析深度被严重限制, 这就意味着共焦布里渊光谱探测系统只能对薄样品才能进行高空间分辨光谱探测。因此, 上述问题限制了共焦布里渊光谱探测系统在高散射样品以及长工作距离成

像领域中的应用, 同时也对传统的共焦布里渊光谱探测系统提出了更高的要求。

为降低弹性散射光对布里渊散射光的干扰, 实现布里渊光谱高精度测量, 众多学者开展了具有重要价值的研究工作。Giuliano Scarcelli等通过将级联虚拟成像相位阵列与空间掩模板相结合, 大幅降低了弹性散射与布里渊散射之间的串扰, 提高了系统的消光比, 但该方法也在很大程度上降低了布里渊光谱信号强度^[10]; Meng等通过在收集光路中加入分子吸收室, 利用分子吸收技术有效地滤除了弹性散射光, 但该方法仅对特定波长的激发光有效, 而且对光源的稳定性要求极高^[11]; Shao等开发了一种基于自由空间FP标准具的窄带光谱陷波滤波器, 有效地抑制了弹性散射光, 但该仪器的消光比较低且调节困难^[13]。因此, 如何降低弹性散射光对布里渊散射光的干扰仍然是目前研究的热点问题。

在提高共焦布里渊光谱探测系统轴向分辨力以及层析能

收稿日期: 2019-05-04, 修订日期: 2019-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61475020)和国家自然科学基金重点项目(51535002)资助

作者简介: 吴寒旭, 1992年生, 北京理工大学光电学院博士研究生 e-mail: wuhanxu6996@126.com

* 通讯联系人 e-mail: zwq669@126.com

力方面, Giuliano Scarcelli 等通过增加物镜的数值孔径, 提高了共焦布里渊光谱探测系统的层析探测能力, 但物镜的工作距离也限制了其层析深度^[14]。Sheldon 等通过选择性双光子聚合技术, 利用胶原纤维在飞秒激光作用下发生交联的现象, 提高了共焦布里渊光谱探测系统的空间分辨率, 但该方法过于依赖材料的性质, 难以应用于其他领域中^[6]。Meng 等采用表面增强布里渊光谱大幅提高了共焦布里渊光谱探测系统的空间分辨力, 使布里渊光谱成像的空间分辨力达到了亚微米级别, 但该方法只能应用于表面光谱测量, 无法实现层析探测^[15]。因此, 如何在传统的共焦布里渊光谱探测系统光路的基础上提高共焦布里渊光谱探测系统的轴向分辨力以及层析能力仍有待进一步研究。

针对改善共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力、轴向分辨力以及层析能力等问题, 构建一种 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统, 该系统通过侧向照明与侧向收集的方式消除背向散射, 有效减少弹性散射对布里渊散射的干扰, 提高共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力, 并通过 D 形光瞳对照明点扩散函数与收集点扩散函数进行调制, 在轴向上实现三维点扩散函数的压缩, 进而达到提高共焦布里渊光谱探测系统轴向分辨力以及层析能力的效果。

1 原理与仿真

D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的测量原理如图 1 所示, 激光器出射的激光经过扩束器、波片及起偏器后, 被具有 D 形光瞳的物镜会聚在样品处, 激发出的布里渊散射光通过具有 D 形光瞳的物镜收集, 经过反射镜反射后, 通过检偏器、透镜与针孔会聚进入布里渊光谱探测系统中。由于照明光路与收集光路之间不存在重叠, 消除了背向散射, 有效减少了弹性散射对布里渊散射的干扰。其中, 光瞳参数 d 定义为 D 形光瞳直边与物镜中心之间的归一化距离。

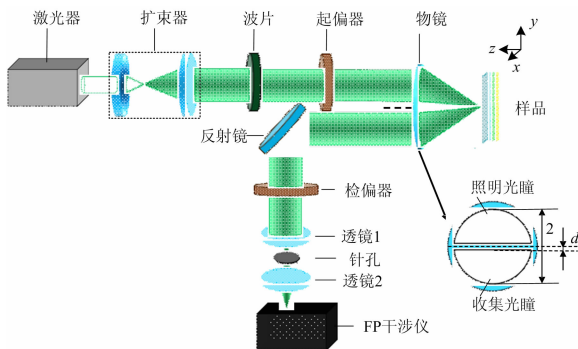


图 1 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统原理图

Fig. 1 Schematic of the D-shaped divided aperture confocal Brillouin microscopy (DDACBM)

根据布里渊散射光的相干性, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的点扩散函数可以由式(1)计算得到

$$I_B(v_x, v_y, u, v_p) = \int_0^{2\pi} \int_0^{v_p} |h_i(v_x, v_y, u) \times h_c(v_x, v_y, u, r, \varphi)|^2 dr d\varphi \quad (1)$$

$$h_i(v_x, v_y, u) = \iint_{D_1} P_i(\rho, \theta, u) \exp[-i(v_x \rho \cos\theta + v_y \rho \sin\theta)] \rho d\rho d\theta \quad (2)$$

$$h_c(v_x, v_y, u, r, \varphi) = \iint_{D_2} P_c(\rho, \theta, u) \exp\{-i[\rho \cos\theta(v_x + r \cos\varphi) + \rho \sin\theta(v_y + r \sin\varphi)]\} \rho d\rho d\theta \quad (3)$$

$$D_1: \sin^{-1}d < \theta < \pi - \sin^{-1}d, \frac{d}{\sin\theta} < \rho < 1;$$

$$D_2: \pi + \sin^{-1}d < \theta < 2\pi - \sin^{-1}d, \frac{d}{\sin(\theta - \pi)} < \rho < 1 \quad (4)$$

其中, $I_B(v_x, v_y, u, v_p)$ 为系统所探测的布里渊光谱强度响应, $h_i(v_x, v_y, u)$ 与 $h_c(v_x, v_y, u, r, \varphi)$ 分别为照明光路的振幅点扩散函数与收集光路的振幅点扩散函数, $P_i(\rho, \theta, u)$ 为照明光路离焦光瞳函数, $P_c(\rho, \theta, u)$ 为收集光路离焦光瞳函数, (v_x, v_y, u) 分别为物方 (x, y, z) 方向的归一化坐标, 其大小为 $(v_x, v_y) = 2\pi(x, y)\sin\alpha_o/\lambda$, $u = 8\pi z\sin^2(\alpha_o/2)/\lambda$, v_p 为探测区域归一化半径, 其大小 $v_p = 2\pi R\sin\alpha_c/\lambda$; R 为探测区域的物理半径; $\sin\alpha_o$ 为物镜的有效数值孔径, $\sin\alpha_c$ 为透镜 1 的有效数值孔径; λ 为激光波长; r 和 φ 为极坐标下探测区域的归一化坐标, ρ 和 θ 为极坐标系下归一化的光瞳坐标; D_1 为照明光瞳区域, D_2 为收集光瞳区域, d 为光瞳参数。

为保证共焦布里渊光谱探测系统的探测灵敏度, 现有的共焦布里渊光谱探测系统的针孔归一化半径通常选择为百微米量级左右, 因而严重降低了系统的轴向分辨力与层析能力, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统可以对此进行有效改善。图 2 给出在针孔半径尺寸为 $100 \mu\text{m}$, 532 nm 激发波长下, 物镜数值孔径 $\text{NA}=0.8$ 的情况下, 不同光瞳参数对应的 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统以及共焦布里渊光谱探测系统所对应的布里渊光谱轴向强度响应曲线。相比于共焦布里渊光谱探测系统, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的轴向强度响应曲线的半高宽均有不同程度的减小, 因而光谱轴向分辨力得到改善, 而且 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的离焦信号强度下降得更快, 离焦面光谱信息对焦平面光谱信息的干扰减少, 层析能力得以改善。

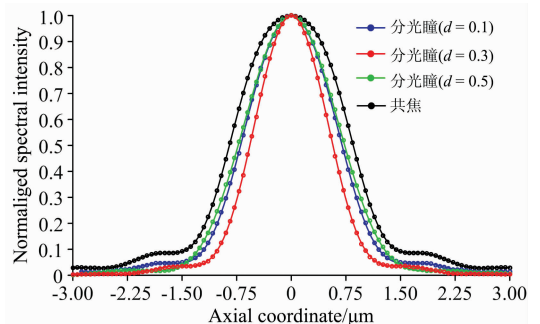


图 2 共焦布里渊光谱探测系统与 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统光谱轴向强度响应曲线对比

Fig. 2 Comparison of spectral axial intensity response curves between confocal Brillouin microscopy (CBM) and DDACBM

图 3 给出了 532 nm 激发波长下, 物镜数值孔径 $NA=0.8$ 的情况下, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统轴向曲线半高宽与光瞳参数 d 之间的关系, 当光瞳参数 $d=0.27$ 时, 其轴向半高宽达到最小值 $1.137 \mu\text{m}$, 相比于共焦布里渊光谱探测系统的轴向半高宽 $1.679 \mu\text{m}$, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统可以提升共焦布里渊光谱探测系统的轴向分辨率 32.3% 左右。

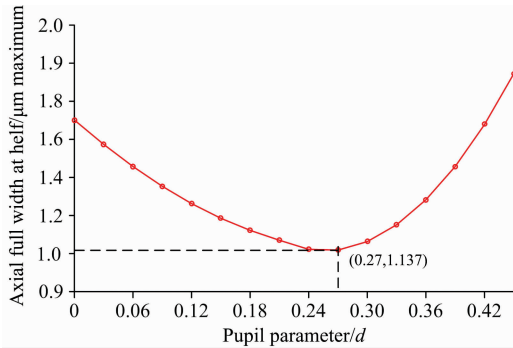


图 3 光瞳参数对 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统轴向分辨率的影响

Fig. 3 The relationship between pupil parameter and spectral axial resolution of DDACBM

通过以上仿真可以看出, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统显著提高了传统共焦布里渊光谱探测系统的轴向分辨率以及层析能力。

2 实验与结果讨论

依据图 1 所示的原理构建了 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的实验验证装置。激光器采用波长 λ 为 532 nm 的高功率光学泵浦半导体激光器; 光瞳参数选择为 $d=0.27$; 针孔半径选择为 $r=100 \mu\text{m}$; 布里渊光谱探测系统采用瑞士 JRS 公司串联多通道 FP 干涉仪。

首先采用溶有咖啡奶油的二甲基亚砷溶液作为被测样品, 由于咖啡奶油样品的弹性散射强, 可用来说明 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统对于共焦布里渊光谱探测系统在抗弹性散射方面的有效性, 布里渊光谱测试结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 相比于共焦布里渊光谱探测系统, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统所探测到的弹性散射强度明显降低, 弹性散射展宽宽度明显减小, 因而 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统具备良好的抗弹性散射干扰能力, 这是 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统消除共焦布里渊光谱探测系统中背向散射的结果。其中, 共焦布里渊光谱探测系统测得的纵向声子波 LA 频移为 $(8.16 \pm 0.01) \text{GHz}$; D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统测得的 LA 频移为 $(7.64 \pm 0.01) \text{GHz}$, 通过布里渊频移公式可得 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的散射角约为 139° 。

为验证 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统相对于共焦布里渊光谱探测系统在轴向分辨能力上的提升, 采用单晶

硅作为被测样品进行轴向光谱测试。将光斑聚焦在单晶硅表面附近, 从上至下进行轴向光谱扫描, 并通过对每一个轴向位置的布里渊光谱曲线进行洛伦兹拟合, 得到其对应的谱峰面积, 进而得到共焦布里渊光谱探测系统与 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的实测布里渊光谱轴向强度响应曲线, 测试结果如图 5 所示。

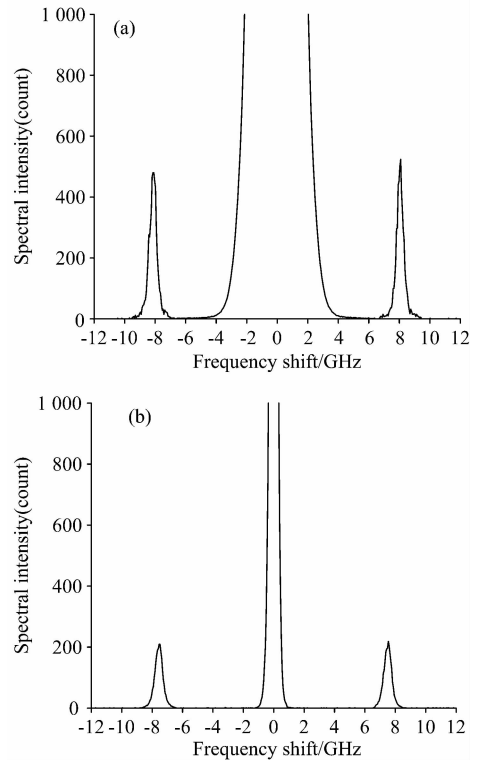


图 4 抗弹性散射能力对比

(a): 共焦布里渊光谱探测系统的光谱测量结果;
(b): D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的光谱测量结果
Fig. 4 Comparison of anti-elastic scattering ability
(a): Spectral measurement results of CBM;
(b): Spectral measurement results of DDACBM

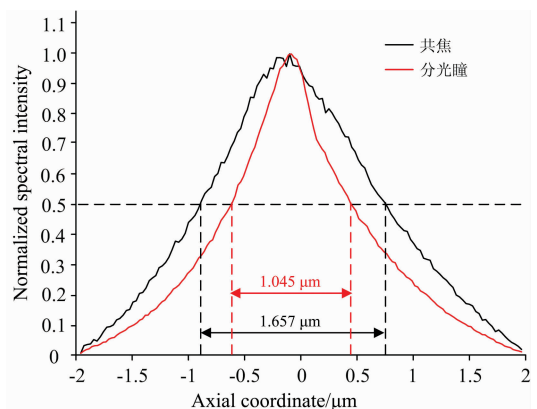


图 5 共焦布里渊光谱探测系统与 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统实测光谱轴向强度响应曲线对比

Fig. 5 Comparison of measured axial intensity response curves between CBM and DDACBM

从图 5 可以看出,相比于共焦布里渊光谱探测系统,D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的轴向响应变化更快,光谱信号对于轴向位置的变化更加灵敏,因此D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的轴向分辨本领更强。D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统与共焦布里渊光谱探测系统的轴向强度响应曲线半高宽分别为 1.045 与 $1.657\ \mu\text{m}$,轴向分辨力提高约 36.9% 。

为验证D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统相对于共焦布里渊光谱探测系统在层析能力上的提升,采用双层样品进行轴向测试,该样品由两部分组成:SiO₂基底以及PM-

MA薄层,将光斑聚焦在SiO₂与PMMA界面附近,在轴向不同位置处进行布里渊光谱采集,测试结果如图6所示。可以看出,当共焦布里渊光谱探测系统的光斑聚焦在PMMA层时,会探测到较强的SiO₂光谱,而光斑聚焦在SiO₂层时,也会探测到较强的PMMA光谱,这是由于共焦布里渊光谱探测系统的聚焦光斑焦深较长,不同层之间的布里渊光谱会发生串扰混叠,因此通过光谱数据难以判断当前的焦斑位置以及材料信息,而D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统减少了有效焦深的长度,去除了离焦层光谱信息的干扰。

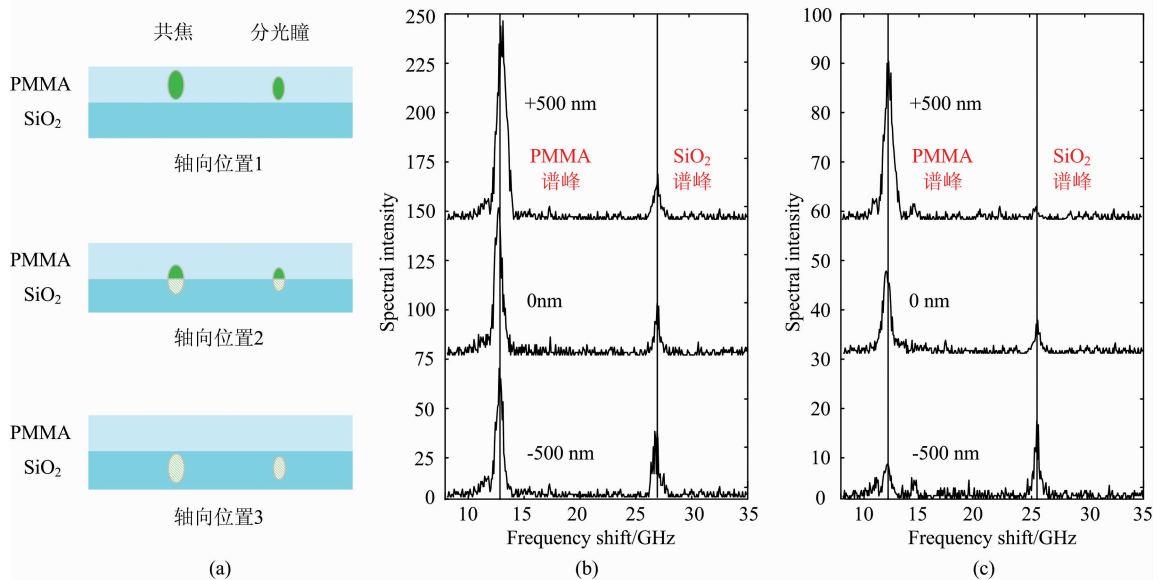


图 6 层析能力对比

(a): 不同轴向位置的光斑分布; (b): 共焦布里渊光谱探测系统的布里渊光谱; (c): D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的布里渊光谱

Fig. 6 Comparison of tomography ability

(a): Spot distributions at different axial positions; (b): Brillouin spectra of CBM; (c): Brillouin spectra of DDACBM

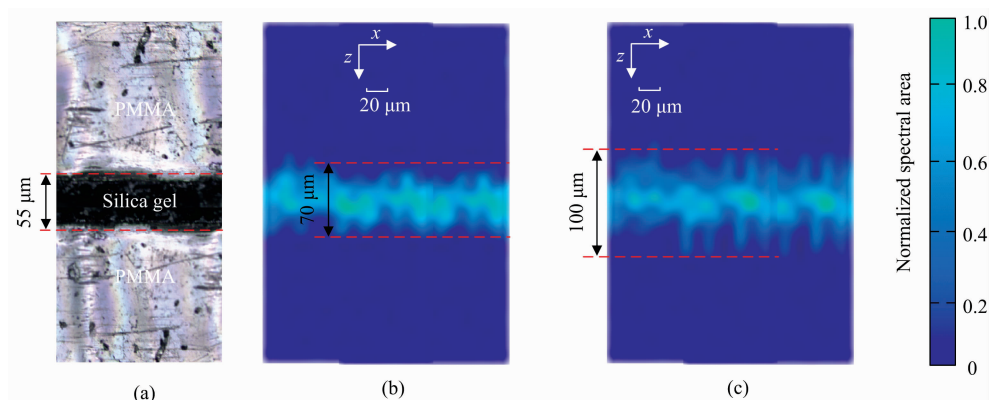


图 7 层析成像对比

(a): 显微镜下的样品图; (b): D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统层析成像结果; (c): 共焦布里渊光谱探测系统层析成像结果

Fig. 7 Comparison of tomographic imagings

(a): Image of the sample under a microscope; (b): Tomographic imaging result of DDACBM; (c): Tomographic imaging result of CBM

为对D形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统与共焦布里渊光谱探测系统的层析能力作进一步说明,我们利用三层样

品进行 $x-z$ 方向光谱层析扫描成像,其材料分别为PMMA、硅胶以及PMMA,其中,中间层硅胶厚度为 $55\ \mu\text{m}$,设置光

谱扫描点数为 32×16 , 步距为 $10 \mu\text{m}$, 并利用中间层硅胶的布里渊光谱谱峰面积对样品进行成像, 结果如图 7 所示。

图 7(a)为激光共焦显微镜(Olympus OLS 4000)下多层样品的截面图像, 图 7(b)与图 7(c)分别为 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统与共焦布里渊光谱探测系统的光谱层析成像结果。可以看出, 共焦布里渊光谱探测系统成像结果的边缘较 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统更加模糊, 硅胶光谱存在的范围更大, 这是由于共焦布里渊光谱探测系统中离焦光谱信息对焦平面处的光谱信息干扰较强, 即使其焦点位于距离硅胶较远位置处仍然会收集到硅胶的光谱信息, 因而难以确定硅胶具体范围; 相比于共焦布里渊光谱探测系统, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统有效去除了离焦面散射光对焦平面散射光的影响, 大幅提高了系统信噪比, 其成像的边缘轮廓更加清晰, 硅胶分布范围也更加接近于实际范围, 由此可见, 相比于共焦布里渊光谱探测系统, D 形分

光瞳共焦布里渊光谱探测系统的层析能力得到大幅提升。

3 结 论

构建了一种 D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统, 有效减少弹性散射对布里渊散射的干扰, 提高共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力, 并在轴向上实现三维点扩散函数的压缩, 达到提高共焦布里渊光谱探测系统轴向分辨力以及层析能力的效果。相比于传统的共焦布里渊光谱探测系统, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统的抗弹性散射能力以及光学层析能力大幅提升, 轴向分辨力提高了 30% 以上, D 形分光瞳共焦布里渊光谱探测系统为共焦布里渊光谱探测系统改善抗弹性散射能力、轴向分辨力以及层析能力提供了一种全新的技术途径。

References

- [1] Battistoni A, Bencivenga F, Fioretto D, et al. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5858.
- [2] Beugnot J C, Lebrun S, Pauliat G, et al. *Nature Communications*, 2014, 5: 5242.
- [3] Kim J H, Kuzyk M C, Han K, et al. *Nature Physics*, 2015, 11: 275.
- [4] Karampatzakis A, Song C Z, Allsopp L P, et al. *Npj Biofilms & Microbiomes*, 2017, 3: 20.
- [5] Scarcelli G, Polacheck W J, Niu H T, et al. *Nat Methods*, 2015, 12: 1132.
- [6] Kwok S J J, Kuznetsov I A, Kim M, et al. *Optica*, 2016, 3(5): 469.
- [7] Koski K J, Akhenblit P, Mckiernan K, et al. *Nature Materials*, 2013, 12(3): 262.
- [8] Madami M, Bonetti S, Consolo G, et al. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6: 635.
- [9] Galbraith J, Chapman L, Zwanziger J W, et al. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(38): 21802.
- [10] Scarcelli G, Yun S H. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10913.
- [11] Meng Z, Traverso A J, Yakovlev V V. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5410.
- [12] Fiore A, Zhang J, Shao P, et al. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(20): 203701.
- [13] Shao P, Besner S, Zhang J, et al. *Optics Express*, 2016, 24(19): 22232.
- [14] Giuliano S, Roberto P, Seok Hyun Y. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2012, 53(1): 185.
- [15] Meng Z, Yakovlev V V, Utegulov Z N. *Proc. SPIE*, 2015, 9340, 93400Z.

D-Shaped Divided Aperture Confocal Brillouin Microscopy

WU Han-xu, NING Ying, QIU Li-rong, WANG Yun, ZHAO Wei-qian*

Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Confocal Brillouin microscopy (CBM) provides a non-contact, non-destructive, and high spatial resolution measurement, which has widely been applied in biomedical detection, physical chemistry, and materials science. The Brillouin scattering frequency is low, and the intensity is weak, so the signals can be easily overlapped or even overwhelmed in the case where the elastically scattered light is not sufficiently suppressed, which significantly limits measure accuracy of the Brillouin spectrum. In addition, the spectral axial resolution and tomography ability of CBM is still insufficient, which limit applications in the fields of high scattering samples and large working distance. In this paper, a D-shaped divided aperture confocal Brillouin microscopy (DDACBM) is proposed to improve the anti-elastic scattering ability, spectral axial resolution, and tomographic capability of CBM. DDACBM eliminates the backscattering light and reduces the crosstalk between the elastic scattering and Brillouin scattering by symmetrical lateral offset illumination and lateral offset detection. Thus the anti-elastic scattering ability of CBM is improved. And the point spread function of the illumination light path and the collection light path is modulated. The illumination

light path and the collection light path only overlap on the focal plane by the inclined incident. Therefore, threedimensional point spread function is compressed in the z -axis, and the interference between the defocused plane and the focal plane is effectively removed. The full width at half maximum and a full maximum of the axial spectral intensity response curve reduce, thereby the spectral axial resolution and tomography ability of the CBM are improved. Experiments show that DDACBM improves the anti-elastic scattering ability and tomographic capability of the CBM. And by optimizing the pupil parameter, the spectral axial resolution is improved by more than 30%, which can effectively reduce the spectral crosstalk in multi-layer samples. DDACBM provides a guarantee for further applications of Brillouin spectrum technology in the modern basic research fields.

Keywords Confocal Brillouin; Tomographic measurement; Anti-elastic scattering

* Corresponding author

(Received May 4, 2019; accepted Sep. 22, 2019)

(上接 1678 页)

2.2 口头报告

会议将开放一定数量的口头报告,大家可以自由申请,申请方式为在会议注册系统中提交口头报告题目(在口头报告栏目),并在会议截稿日期前通过会议稿件提交系统按要求提交论文摘要,申请截止日期为 2020 年 6 月 30 日。

2.3 青年论坛

对于青年学者,博士和硕士研究生可以申请青年论坛报告,申请办法和截止日期与口头报告相同,组委会将组织专家进行优秀报告评选,并颁发优秀论文证书和奖金。

2.4 墙报展示

墙报展示作为本次会议的一种主要形式。墙报要求制作规范,内容体现研究工作的创新点。在准备墙报时注意以下几个方面:

1. 墙报尺寸:高 110 公分×宽 80 公分;
2. 墙报内容不包括中英文摘要和参考文献;
3. 墙报内容以图文为主,层次分明,主要体现研究工作的创新性,主要结果和结论;
4. 墙报右上侧写上论文编号;

拟作墙报展示的代表,在会议注册系统中提交墙报题目和编号。组委会将组织专家对青年学者、博硕士研究生墙报进行评审,并对优秀墙报颁发优秀论文证书和奖金。

三、会议稿件

会议截稿日期为 2020 年 6 月 30 日,请大家按照会议第一轮通知的要求继续投稿。

<http://www.sinospectroscopy.org.cn/readnews.php?nid=94098>

四、会议注册

4.1 会议注册费

2020 年 9 月 20 日以前缴纳注册费:正式代表:1600 元/人;学生代表:1000 元/人;2020 年 9 月 20 日后及现场缴纳注册费:正式代表:1800 元/人;学生代表:1200 元/人,现场缴费将邮寄发票。由于酒店房间是预留,2020 年 9 月 20 日后及现场缴纳注册费的代表将不能保证房间;陪同家属 1000 元/人(没有发票)。

会议注册费收缴方式:

银行汇款,如网银、手机银行、支付宝、微信转账、银行柜台等。

收款单位:四川大学(请注明:2020 光谱+姓名);

帐号:5100 1870 4690 5988 8666;

开户行:建行成都川大支行;

汇款成功后请务必将姓名、参会编号、单位发票抬头、单位税号、汇款金额通过邮箱(atcpubs@scu.edu.cn)告知会务组,以便核实会议注册费发票信息。(如果需要开具增值税发票,请注明并提供单位名称、纳税人识别号、地址、电话、开户行及账号)

发票联系人:张亮 联系邮箱:zhang.liang@scu.edu.cn 联系方式:15902844473

4.2 会议注册系统

请登陆光谱网会议主页:<http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/index.php?mid=24>

注册并提交您的参会信息,包括个人信息、报告题目、墙报题目、住房预定等信息。

(下转 1689 页)

temperature in the radial coordinate was measured at a cross section under the powder feed gun by combining argon emission spectroscopy and electric-driving scanning technique. The measured results show that gas temperatures in the radial coordinate showed a saddle-shape trend under no powder-in conditions and the temperature value in the center was $(10\ 120 \pm 240)$ K, while the maximum temperature zone was positioned close to the core with specific values of $(10\ 500 \pm 240)$ and $(10\ 620 \pm 240)$ K, respectively. There existed obvious temperature difference at the measured cross section under powder-in and no powder-in conditions. A maximum temperature difference under the two conditions was observed to be nearly 500 K and 400 K in the core and the maximum temperature zone respectively, indicating temperature drop of plasma flow when the injected particles were heated. The developed technique in this paper provide a mature method to quantitatively understand the two-dimensional spatial distribution of gas temperature in the inductively plasma spheroidization reactor.

Keywords Emission spectroscopy; Inductively coupled plasma; Temperature measurements

(Received May 16, 2019; accepted Sep. 18, 2019)

(上接 1684 页)

4.3 会议住宿

会议酒店:

1. 世外桃源酒店

地址: 四川省成都市武侯区科华北路 69 号

酒店房间价格: 标间 620 元/间天; 大床房 560 元/间天

2. 科华苑宾馆

地址: 四川省成都市武侯区科华北路 141 号

酒店房间价格: 标间 360 元/间天; 大床房 470 元/间天

由于会议期间住宿相对紧张, 涉及到房间预定、会议安排等因素, 务请各位专家、同学在截止日期前注册, 只有在收到注册费后, 才会进行会议相关安排, 务请体谅与协助。

五、会议组织机构

大会组委会人员组成请见如下链接: http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=12

学术委员会人员组成见如下链接: http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=13

有关会议的邀请报告、住房信息、交通路线、稿件编号等信息敬请登录会议主页查询。

六、组委会和会务组联系方式

组委会:

吴兰: 13688385033 Email: wulan@scu.edu.cn

会务组:

注册&住宿: 张亮 15902844473 Email: zhang.liang@scu.edu.cn

报告&论文: 李成辉 18980877825 Email: atcpubs@scu.edu.cn

厂商联络: 王香凤 13520034335 Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

七、支持媒体

会议官网: 光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>)

会议各类信息发布以光谱网信息为准。

主办单位:

中国光学学会

中国化学会

中国光学学会光谱专业委员会

承办单位:

四川大学分析测试中心

中国光学学会光谱专业委员会

四川大学分析测试中心

2019 年 11 月 18 日