

超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用

唐弢 赵晨 陈志彦 李鹏 丁志华

Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials

Tang Tao Zhao Chen Chen Zhi-Yan Li Peng Ding Zhi-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 174201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.174201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二级级联式室内可见光通信光学接收天线的设计

[Design research of two-cascade optical antenna for indoor visible light communication](#)

物理学报.2015, 64(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164201>

隔行分层填充的太赫兹超高双折射多孔光纤

[Ultrahigh birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method](#)

物理学报.2015, 64(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154201>

基于 $y_{bar}y$ 图的光学结构计算方法研究

[An approach for calculating the optical structure based on \$y_{bar}y\$ diagram](#)

物理学报.2015, 64(11): 114201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114201>

双小凹光学成像系统设计

[Design of dually foveated imaging optical system](#)

物理学报.2015, 64(3): 034201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034201>

室内可见光通信系统中菲涅尔透镜接收天线的设计研究

[Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system](#)

物理学报.2015, 64(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024201>

超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用*

唐弢 赵晨 陈志彦 李鹏 丁志华†

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2015年2月2日收到; 2015年3月24日收到修改稿)

本文报道了一种超高分辨率谱域光学相干层析成像(SD-OCT)系统. 该系统基于超连续谱激光光源并截取部分光谱作为宽带光源, 其中心波长为665 nm, 光谱半高全宽(FWHM) 230 nm. 系统轴向分辨率0.9 μm , 轴向扫描速率28600行/秒, 横向分辨率3.9 μm , 横向视场1 mm, 最大成像深度0.6 mm(空气中). 利用研制的超高分辨率SD-OCT系统, 对不同型号的工业砂纸精细结构进行了成像, 并与普通SD-OCT的成像结果进行对比, 充分展示了研制系统在材料无损检测中优势.

关键词: 光学相干层析成像, 超连续谱激光光源, 超高分辨率, 材料检测

PACS: 42.15.Eq, 42.25.Hz, 42.30.Wb, 42.40.My

DOI: 10.7498/aps.64.174201

1 引言

光学相干层析技术(optical coherent tomography, OCT)^[1-3]是上世纪90年代发展起来的一种非侵入、非接触的层析成像技术, 具有高分辨率、无损无辐射、实时检测等诸多优势. 从OCT技术诞生起, 提高系统分辨率一直是OCT领域的重要课题. 随着超快飞秒激光、锁模钛宝石激光、非线性光纤、合成光源等技术的飞速发展, OCT的分辨率也在不断提高, 目前的轴向分辨率已从10—15 μm 提高到1 μm 以内. 2004年, Nassif小组用超发光二极管(SLD)作为OCT系统的光源, 实现了8.3 μm 的轴向分辨率^[4]; 同年, 该小组将两个SLD光源拼接起来, 实现了4 μm 轴向分辨率^[5]; 2007年, Chen等利用Ti:sapphire激光实现3 μm 轴向分辨率^[6]; 2011年, Yadav等利用超连续谱光源将OCT的轴向分辨率提高到1.52 μm ^[7]. 超高分辨OCT可以看到

病理组织微观结构的更多细节^[8-11]. 例如, 超高分辨OCT可以对视网膜内所有的主要膜层结构进行成像, 实现细胞细节的分辨, 极大地推动了OCT技术在生物医学领域中应用^[4]. 相比于生物医学领域的应用, OCT技术在工业领域应用相对较少. 近些年已经有一些小组报道OCT应用于光学元件检测、薄膜厚度测量、玻璃表面缺陷检测、焊锡球表面缺陷检测等^[12-16].

普通SD-OCT系统的轴向分辨率一般在10 μm 左右, 对于精细尺寸在微米量级的材料检测应用效果并不是理想, 发展超高分辨率OCT技术是解决该问题的可行方法. 在高分辨OCT研究方面, 基于时域OCT(TD-OCT)技术, 已报道了亚微米的高分辨率成像^[17]; 而基于热光源的全场OCT也实现了亚微米的高分辨率^[18]. 本文报道的是一种基于超连续谱激光光源的SD-OCT系统, 与TD-OCT和全场OCT相比, 具有更快的成像速度, 在材料精细结构的无损在线检测方面更具优势.

* 国家自然科学基金(批准号: 61335003, 61275196, 61327007, 11404285, 61475143), 国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号: 2015AA020515), 浙江省自然科学基金(批准号: LY14F050007), 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2014QNA5017)和教育部留学回国人员科研启动基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn

2 方法

2.1 原理

在谱域 OCT 系统中, 样品由宽带光源照明, 不同深度处的背向反射光或散射光与参考光干涉, 并由光谱仪中的线阵 CCD 探测^[19-21]. 样品的轻微运动或者 OCT 系统两干涉光路光程差的波动, 都会引起干涉条纹相位的变化, 为避免信号灵敏度的下降, CCD 相机的曝光时间要求足够短^[22]. 对应于某一轴向扫描 (A-line) 信号, 其关联的干涉光谱可以表示为

$$I(k) = S(k) \left\{ a_R e^{i2kr} + \int_0^\infty a(z) e^{i2kz} dz \right\}^2, \quad (1)$$

式中, k 是波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长. $S(k)$ 为光源的功率谱密度, a_R 为参考臂的反射系数, r 和 z 是参考臂和样品臂相对于共同参考面的光程, $a(z)$ 代表样品轴向结构分布信息. 为了方便计, 且不失一般性, 令 $a_R = 1$ 且 $r = 0$, 那么 (1) 式可以写为

$$\begin{aligned} I(k) &= S(k) \left\{ 1 + \int_0^\infty a(z) e^{i2kz} dz \right\}^2 \\ &= S(k)(1 + A(k))(1 + A^*(k)) \\ &= S(k)(1 + 2\text{real}(A(k)) + A(k)A^*(k)), \quad (2) \end{aligned}$$

这里,

$$A(k) = \int_0^\infty a(z) e^{ikz} dz.$$

对 (2) 式进行 k 空间的逆傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} \text{FT}^{-1}[I(k)] &= \text{FT}^{-1}[S(k)] \otimes \text{FT}^{-1}[(1 + A(z))(1 + A^*(z))] \\ &= \Gamma(z) \otimes (\delta(z) + a(z) + a(-z) \\ &\quad + \text{AC}(a(z))), \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $\Gamma(z)$ 是 $S(k)$ 的逆傅里叶变换, 即光源光谱的自相关函数的包络. $\delta(z)$ 代表直流项, $a(-z)$ 代表样品的结构的共轭项, $\text{AC}(a(z))$ 代表 $a(z)$ 的自相关项. 基于扫描振镜的光束横向扫描, 可以获得序列 A-line 信息, 进而构建纵截面图像、三维体图像以及横断面图像.

在 SD-OCT 系统中, 系统的横向分辨率和轴向分辨率是相互独立的. 横向分辨率由光源的中心波长 λ_0 和物镜数值孔径 NA 决定, 即

$$\delta x = 0.37 \frac{\lambda_0}{\text{NA}} = 0.37 \frac{\lambda_0 f}{R}, \quad (4)$$

式中, f 为物镜焦距, R 为入射于物镜的准直光斑半径.

轴向分辨率由光源带宽和光源的中心波长关联的相干长度决定. 光源的相干长度是光源自相干函数包络的半高全宽 (FWHM) 值, 它由下式决定:

$$\delta z = l_z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}, \quad (5)$$

这里, $\Delta \lambda$ 为光源光谱的半高全宽.

因此, 提高谱域 OCT 系统的分辨率需要选择大数值孔径的物镜, 降低光源的中心波长和提高光源的光谱带宽. 本文报道的超高分辨率 SD-OCT 系统, 采用的是超连续谱光源, 其中心波长 665 nm, FWHM 带宽 230 nm, 入射光斑半径约 2 mm, 物镜焦距 30 mm. 将相关参数代入 (4) 和 (5) 式, 得到理论上的横向分辨率和轴向分辨率分别为 3.6 μm 和 0.73 μm .

2.2 实验系统

图 1 所示为超高分辨率 SD-OCT 系统的示意图. 超连续谱激光光源发出低相干光, 依次通过扩束器和截止滤光片 (800 nm 以上截止), 到达分束器 (分光比 50 : 50, Edmund optics) 后被分成两路, 一路进入参考臂和一路进入样品臂. 参考光先通过中性密度滤波片 (减弱参考臂的光强, 实现参考臂和样品臂的光强匹配) 后, 被透镜 L1 (焦距 30 mm, Edmund optics) 聚焦到参考镜上. 样品光通过中性密度滤波片和扫描振镜 (GVS012, Thorlabs) 后, 被非球面消色差透镜 L2 (焦距 30 mm, Edmund optics) 聚焦到样品上. 从参考镜返回的参考光与从样品返回的信号光在分束器汇合并发生干涉. 干涉光经过由透镜 L3 (焦距 50 mm, Thorlabs), 15 μm 微孔和透镜 L4 (焦距 100 mm, Thorlabs) 组成的空间滤波器后进入光谱仪. 光谱仪由衍射光栅 (600 lines/mm, Wasatch Photonics)、透镜 L5 (焦距 150 mm, Thorlabs) 和线阵 CCD (2048 像素, 12 bits 数字输出, 像素尺寸 14 $\mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$, E2v) 组成. 干涉光经光栅色散后由透镜 L5 聚焦到线阵 CCD 上. 探测信号由图像采集卡 PCIe-1430 (NI) 采集, 并传输至计算机进行后续处理. 振镜扫描由多功能数据采集卡 PCI-6713 (NI) 控制, 它与信号采集的同步由计算机控制.

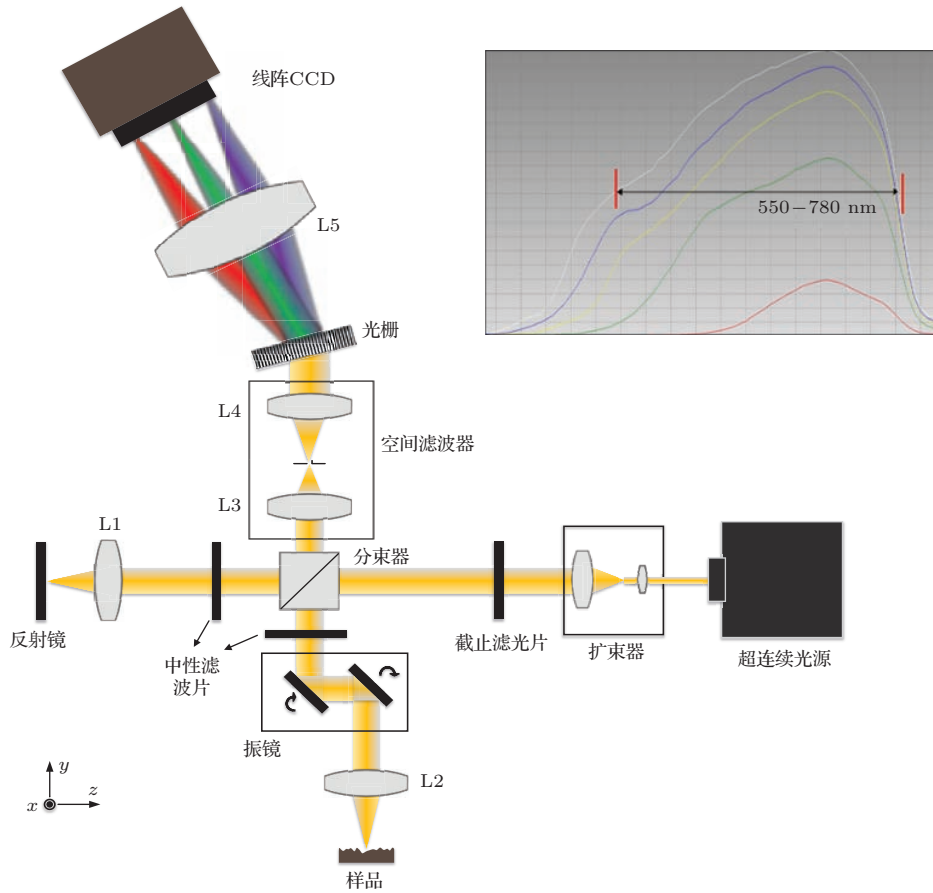


图1 (网刊彩色) 超高分辨率SD-OCT系统示意图(右上方图为不同输出功率下的滤出光谱分布, 最大功率时, 对应FWHM谱宽为230 nm)

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the ultrahigh-resolution SD-OCT system. The top right figure shows the spectral distribution under different output powers. The maximum corresponds to the FWHM of 230 nm.

3 系统指标

3.1 灵敏度

灵敏度是衡量系统参数的一个重要的指标. 它表征了系统探测微弱信号的能力. 在实际操作中, 一般利用平面镜样品来测定, 这里选择反射率为99%的平面反射镜. 入射到样品上的光功率约为 $260 \mu\text{W}$, 为防止返回光功率过强而超过 CCD 的测量范围, 我们在样品臂中加入一个 3 dB 衰减的中性滤光片. 先将平面镜放在零光程的位置, 通过改变平面镜的轴向位置依次测量不同轴向深度的灵敏度. 如图 2 所示, 各个尖峰分别表示 $50 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $350 \mu\text{m}$, $450 \mu\text{m}$, $550 \mu\text{m}$, $650 \mu\text{m}$ 轴向深度处的灵敏度. 可以看到在 $50 \mu\text{m}$ 处的灵敏度约为 55 dB. 由于往返两次中性密度滤波片的衰减作用, 实际的灵敏度应该增加 6 dB 成为 61 dB 左

右, 而由公式 $\text{SNR} = 10 \log \frac{\eta P_{\text{sample}} \tau}{E_v}$ 得到的理论值约为 100 dB, 这里存在比较大的偏差是由于超连续光源有很强的噪声. 图中不同位置的灵敏度随着深度的增加而下降, 这是因为光谱仪有限的光谱分辨率所致.

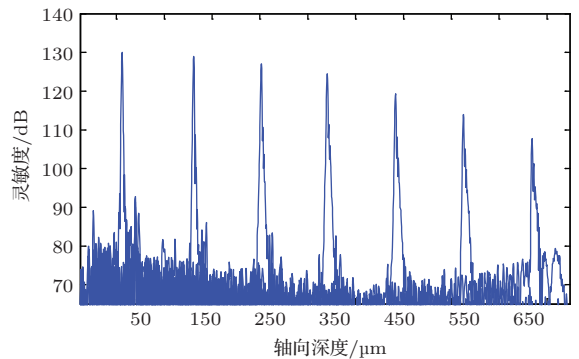


图2 系统不同轴向深度的灵敏度

Fig. 2. System sensitivity corresponding to different axial positions.

3.2 分辨率

我们采用标准分辨率板(1951 USAF, Thorlabs)来标定系统横向分辨率. 图3(a)所示为标准分辨率板的光学显微图像, 图3(b)为(a)红框位置处的OCT横断面图像. 通过查找1951 USAF分辨率板的参数可知, 系统最高可以分辨每毫米128线对, 即横向分辨率为 $3.9\ \mu\text{m}$, 与理论计算的 $3.6\ \mu\text{m}$ 基本一致.

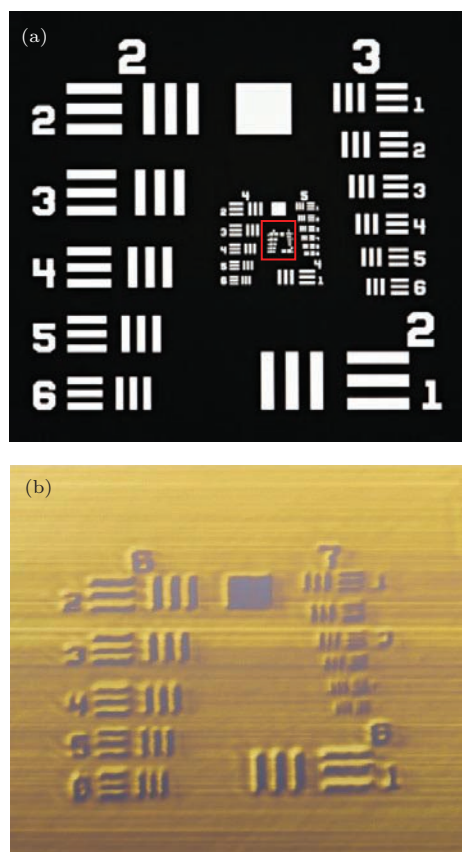


图3 (网刊彩色) (a) 1951 USAF 分辨率板的光学显微图像; (b) 由超高分辨率 SD-OCT 系统得到 (a) 中红框位置处的 OCT 横断面图像

Fig. 3. (color online) (a) Optical microscopic image of 1951 USAF resolution target; (b) OCT cross-section image at the red box location of (a) obtained by the ultrahigh resolution SD-OCT system.

轴向分辨率先由平面反射镜样品来测定. 将平面反射镜放置于零光程附近, 测得其轴向的点扩散函数如图4所示, 系统轴向分辨率为 $0.9\ \mu\text{m}$ 左右. 与理论值 $0.73\ \mu\text{m}$ 存在的偏差, 主要由残留的色散失配所致. 另外探测器对短波的光谱响应相对较弱, 导致有效的光谱FWHM变窄, 也会降低理论轴向分辨率.

为确认系统具备的超高轴向分辨率, 我们又进行了聚苯乙烯微球水溶液的成像实验. 聚苯乙烯微球的标称直径为 $5\ \mu\text{m}$, 折射率约1.59. 其在水溶液中处于悬浮状态, 密度约为 $1.05\ \text{g}/\text{cm}^3$. 由于聚苯乙烯的折射率与水有明显的差异, 如果轴向分辨率足够高就可以分辨出微球的上下两个界面. 图5为聚苯乙烯微球溶液的超高分辨率SD-OCT图像, 右上方为图中红框位置对应的放大图像, 每个虚线框内都有一个微球. 从放大图中可以清晰分辨微球的上下两个界面, 足见系统的超高轴向分辨率. 由于微球水溶液样品是滴在载玻片上, 所以在空气和微球水溶液的分界面处形成了一定的弧度, 这在OCT图像中可以看到.

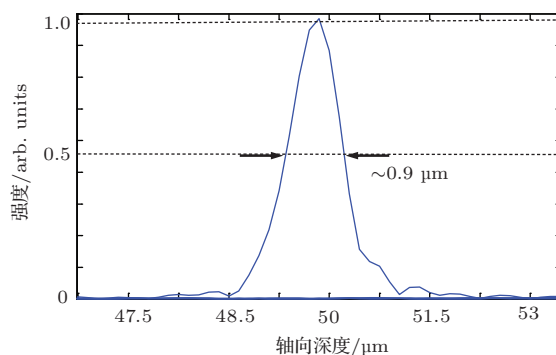


图4 零光程附近平面镜样品的点扩散函数

Fig. 4. Point spread function of the mirror sample near the zero optical path.

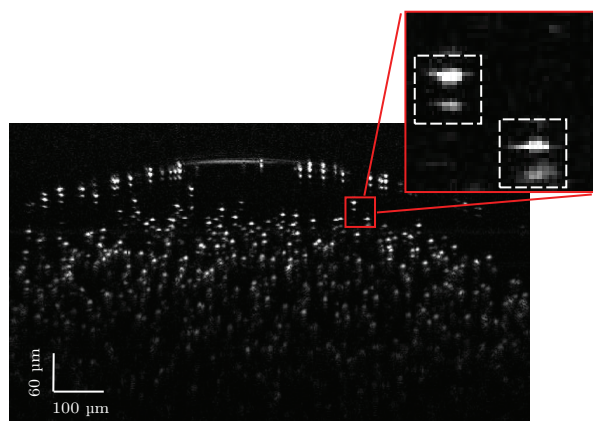


图5 聚苯乙烯微球溶液的超高分辨率 OCT 图像

Fig. 5. Ultrahigh resolution OCT image of polystyrene microspheres solution.

4 结果

为了说明超高分辨SD-OCT系统的优势, 我们分别采用实验室原有的普通SD-OCT系统与新研

制的超高分辨率SD-OCT系统, 对不同型号的工业砂纸进行成像对比. 普通SD-OCT系统采用850 nm中心波长100 nm带宽的SLD拼接光源, 轴向分辨率为3.2 μm , 横向分辨率为20 μm , 横向扫描范围2 mm, 最大成像深度3 mm.

图6(a)为颗粒直径约为125 μm 的砂纸样品. 图6(b), (c)分别由普通SD-OCT系统和超高分辨率SD-OCT系统获得的相同位置处纵截面图像. 在截面图中, 砂纸表层不规则突起部分为金刚石颗粒, 其周围介质是用于黏黏砂粒的胶层. 图6(b)的颗粒下面仍然可以看到一层很浅的胶层, 而图6(c)的颗粒下面几乎没有散射光信号, 这是由于胶层对850 nm波段比对665 nm波段的光吸收要少. 普通SD-OCT系统获得的图像可以看到砂纸表面的颗粒, 但颗粒的形状并不清晰, 而基于超高分辨率SD-OCT系统获得的砂纸颗粒轮廓分明, 细节清晰.

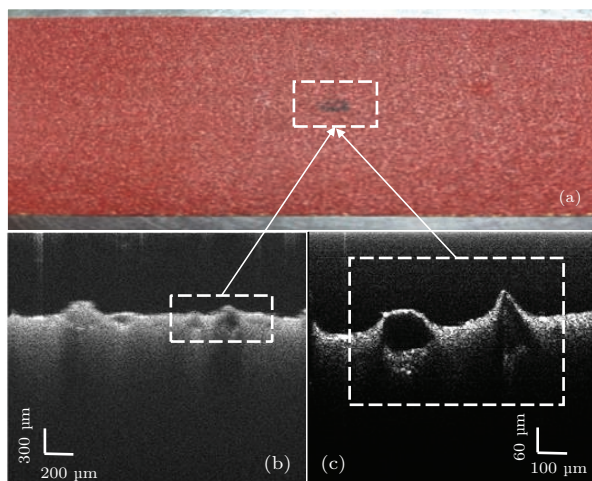


图6 (网刊彩色) (a) 颗粒直径约为125 μm 的工业砂纸; (b), (c)分别为普通SD-OCT和超高分辨率SD-OCT的砂纸纵截面图像((b), (c)中的白框内颗粒对应砂纸(a)中的相同位置)

Fig. 6. (color online) (a) Industrial sandpaper whose particle size is about 125 μm ; (b) Image of ordinary SD-OCT system; (c) Image of ultrahigh resolution SD-OCT system; The particles in the white box of (b) and (c) correspond to the same position of (a).

图7(a)为颗粒直径约为58.5 μm 的砂纸样品. 图7(b), (c)分别为普通SD-OCT系统和超高分辨率SD-OCT系统测得的相同位置处的砂纸纵截面图像. 在普通SD-OCT图像中, 砂纸颗粒形状不清晰, 只能看到一些模糊的小点, 而在超高分辨率SD-OCT图像中, 砂纸的颗粒仍然清晰可见.

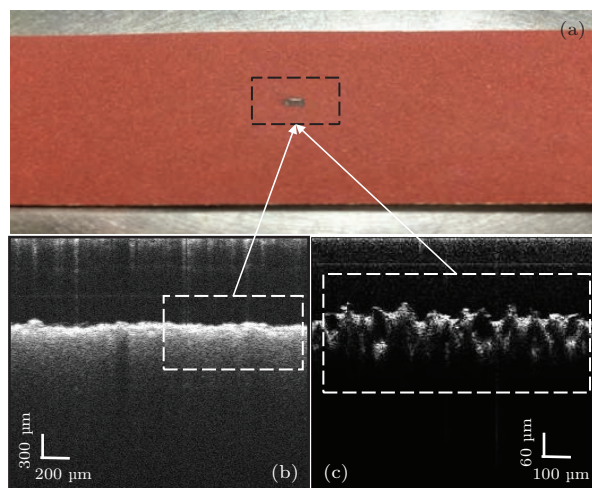


图7 (网刊彩色) (a) 颗粒直径约为58.5 μm 的工业砂纸; (b), (c)分别为普通SD-OCT和超高分辨率SD-OCT的砂纸纵截面图像((b), (c)中的白框内颗粒对应砂纸(a)中的相同位置)

Fig. 7. (color online) (a) Industrial sandpaper whose particle size is about 58.5 μm ; (b) Image of ordinary SD-OCT system; (c) Image of ultrahigh resolution SD-OCT system; The particles in the white box of (b) and (c) correspond to the same position of (a).

5 结 论

本文报道了一种超高分辨率SD-OCT系统, 该系统采用超连续谱激光光源, 滤波后具有665 nm的中心波长和230 nm的FWHM光谱带宽. 系统横向分辨率为3.9 μm , 轴向分辨率可以达到0.9 μm , 在成像深度50 μm 附近, 系统的信噪比可以达到61 dB. 基于普通SD-OCT系统和超高分辨率SD-OCT系统对两种工业砂纸的成像对比, 充分表明超高分辨率SD-OCT系统在检测应用上的优势, 可以分辨更微小的精细结构, 这对于材料在线检测与评估具有重要意义.

参考文献

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R, Flotte T, Gregory K, Puliafito C A, Fujimoto J G 1991 *Science* **254** 1178
- [2] Drexler W, Fujimoto J G 2008 *Optical coherence tomography: technology and applications* (Berlin: Springer) pp1-72
- [3] Wojtkowski M, Leitgeb R, Kowalczyk A, Fercher A F, Bajraszewski T 2002 *J. Biomed. Opt.* **7** 457
- [4] Nassif N, Cense B, Park B, Pierce M, Yun S, Bouma B, Tearney G, Chen T, de Boer J 2004 *Opt. Express* **12** 367
- [5] Cense B, Nassif N, Chen T, Pierce M, Yun S H, Park B, Bouma B, Tearney G 2004 *Opt. Lett.* **12** 2435

- [6] Chen Y, Huang S W, Aguirre A D, Fujimoto J G 2007 *Opt. Lett.* **32** 1971
- [7] Yadav R, Lee K S, Rolland J P, Zavislan J M, Aquavella J V, Yoon G 2011 *Biomed. Opt. Express* **2** 3037
- [8] Fernández E J, Hermann B, Považay B, Unterhuber A, Sattmann H, Hofer B, Ahnelt P, Drexler W 2008 *Opt. Express* **16** 11083
- [9] Bayleyegn M D, Makhlouf H, Crotti C, Plamann K, Dubois A 2012 *Opt. Commun.* **285** 5564
- [10] Drexler W 2004 *J. Biomed. Opt.* **9** 47
- [11] Leitgeb R, Drexler W, Unterhuber A, Hermann B, Bajraszewski T, Le T, Stingl A, Fercher A 2004 *Opt. Express* **12** 2156
- [12] Zhao C, Chen Z Y, Ding Z H, Li P, Shen Y, Ni Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 194201 (in Chinese) [赵晨, 陈志彦, 丁志华, 李鹏, 沈毅, 倪秧 2014 物理学报 **63** 194201]
- [13] Prykäri T, Czajkowski J, Alarousu E, Myllylä R 2010 *Opt. Rev.* **17** 218
- [14] Wiesauer K, Pircher M, Götzinger E, Bauer S, Engelke R, Ahrens G, Grütznert G, Hitzinger C, Stifter D 2005 *Opt. Express* **13** 1015
- [15] Heise B, Schausberger S E, Häuser S, Plank B, Salaberger D, Leiss-Holzinger E, Stifter D 2012 *Opt. Fiber. Technol.* **18** 403
- [16] Kumar M, Islam M N, Terry F L, Aleksoff C C, Davidson D 2010 *Opt. Express* **18** 22471
- [17] Xue P, Fujimoto J G 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 1963
- [18] Safrani A, Abdulhalim I 2012 *Opt. Lett.* **37** 458
- [19] Yan Y Z, Ding Z H, Wang L, Shen Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164204 (in Chinese) [颜扬治, 丁志华, 王玲, 沈毅 2013 物理学报 **62** 164204]
- [20] Wang K, Ding Z H 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 902
- [21] Bao W, Ding Z H, Wang C, Mei S T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114202 (in Chinese) [鲍文, 丁志华, 王川, 梅胜涛 2013 物理学报 **62** 114202]
- [22] Wojtkowski M, Srinivasan V, Ko T, Fujimoto J G, Kowalczyk A, Duker J 2004 *Opt. Express* **12** 2404

Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials*

Tang Tao Zhao Chen Chen Zhi-Yan Li Peng Ding Zhi-Hua[†]

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 2 February 2015; revised manuscript received 24 March 2015)

Abstract

Since many industrial materials have micro or submicro structures on the surface or subsurface, ultrahigh-resolution is required in the inspection of these materials. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography uses broadband light sources to achieve axial image resolutions on the scale of a few microns. We have been investigating an ultrahigh-resolution spectral-domain optical coherence tomography (SD-OCT) system using supercontinuum sources (SC) in free space. The effective SC spectrum has a full width at half maximum of 230 nm centered around 665 nm, and the imaging setup has an ultrahigh axial resolution of 0.9 μm in air, and a lateral resolution of 3.9 μm , with the system measurement range being 0.6 mm in axial direction. At a 50 μm axial position, the sensitivity can be 63 dB with 28600 axial scans per second at 2048 pixels per axial scan. Images of polystyrene microspheres solution with an average diameter of 5 μm and different sizes of industrial abrasive papers are presented to illustrate the performance of the system.

Keywords: optical coherence tomography, supercontinuum source, ultrahigh-resolution, industrial material inspection

PACS: 42.15.Eq, 42.25.Hz, 42.30.Wb, 42.40.My

DOI: [10.7498/aps.64.174201](https://doi.org/10.7498/aps.64.174201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61335003, 61275196, 61327007, 11404285, 61475143), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA020515), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LY14F050007), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2014QNA5017), and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry.

[†] Corresponding author. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn