

光学相干层析技术在物证鉴定领域的应用研究

刘康康^{1*}, 孟利², 罗松飞¹, 王梓成¹

¹安徽公安职业学院公安科学技术系, 安徽 合肥 230031;

²河南警察学院刑事科学技术系, 河南 郑州 450046

摘要 光学相干层析技术(OCT)是一种利用散射光相干原理进行成像的技术,具有无损、快速、高分辨率、断层成像等特点。物证鉴定要求尽量在不破坏物证原始状态下提取、检验、分析,获取有价值的信息,OCT作为一种光学检验技术能够满足该要求,其无需对样品进行预处理,就能实现相关物证的实时、原位、无损检验,在物证鉴定领域具有重要的应用价值。介绍了 OCT 的工作原理及其在物证鉴定领域中的应用。

关键词 光学相干层析; 物证鉴定; 无损检测; 断层成像

中图分类号 O439; D918.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.061103

Application of Optical Coherence Tomography in the Field of Physical Evidence Identification

Liu Kangkang^{1*}, Meng Li², Luo Songfei¹, Wang Zicheng¹

¹Department of Public Security Science and Technology, Anhui Public Security College, Hefei, Anhui 230031, China;

²Department of Forensic Science, Henan Police College, Zhengzhou, Henan 450046, China

Abstract Optical coherence tomography (OCT) is a technique that uses the principle of scattered light coherence for imaging, with features of no destruction, fastness high resolution, and cross-sectional imaging. The identification of physical evidence requires as far as possible to extract, inspect, analyze and obtain valuable information without destroying its original state. As an optical inspection technology, OCT can meet these requirements. It can realize real-time, *in-situ* and non-destructive imaging without pre-processing the sample, which is of great significance in physical evidence identification. We introduce the working principle of OCT and its application in the field of physical evidence identification.

Key words optical coherence tomography; physical evidence identification; non-destructive detection; cross-sectional imaging

OCIS codes 110.1650; 110.4500; 110.6955

1 引言

物证鉴定是利用自然科学的原理和技术对案件相关的物品痕迹进行检验鉴定,为侦查破案、刑事诉讼、定罪量刑提供必要的帮助。法庭科学中要求尽量在不破坏物证原本状态的前提下开展各种检验鉴定,对鉴定技术提出了高要求。光学无损检验是物证鉴定中常用的技术,不仅效果显著,还能保证样品的完整性,保证了刑事诉讼的顺利进行。随着技术

的进步,一种新型的光学检验方法——光学相干层析技术(OCT)被引入到物证鉴定中。

OCT 最早于 1991 年由麻省理工学院的 Huang 团队^[1]提出,并成功显现了离体人眼视网膜图像。其多应用于医疗领域,为眼科、心血管、癌症等疾病的探测、发现和诊断提供了巨大的帮助^[2-5]。随着光纤技术发展,OCT 在产品的质量检测和无损检验中的应用也逐渐增加,如陶瓷检验^[6]、文物分析^[7]、玻璃检验^[8]、珍珠鉴定^[9]方面。其由于具有原位、无

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 安徽公安职业学院校内科研项目(XN2018ZDB55)

* E-mail: liukangk01@163.com

损、高分辨率、断层成像等特点,被应用到物证鉴定领域,并取得了相关的成果。

2 OCT 系统的原理

目前研究常用的 OCT 系统是光谱频域 OCT (SD-OCT),其工作原理如图 1 所示。系统主要由光源、光纤耦合器、样品臂、参考臂、信号探测和处理器等部分组成,其功能类似于迈克耳孙干涉仪。低相干光源发出的宽带光经过光纤耦合器分为两束,一束进入带有反光装置的参考臂反射回来;另一束进入样品臂,样品臂中包含扫描振镜和物镜,将这部分光聚焦到待检样品上,样品的背向反射光和散射光沿原光路返回。当参考臂和样品臂返回的光程差在光源的相干长度范围内时,会发生干涉现象,干涉信号被光电探测器(CCD)检测到,经过傅里叶变换等处理可获取样品的结构信息^[10-11]。

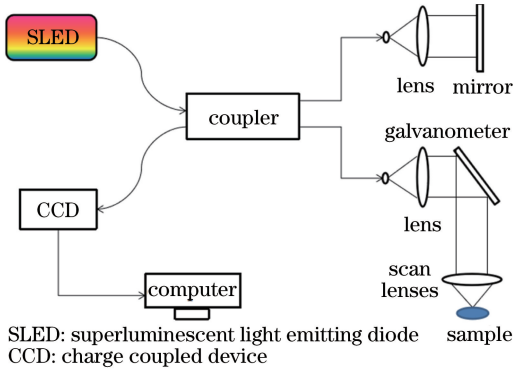


图 1 SD-OCT 系统原理图

Fig. 1 Schematic of SD-OCT system

3 OCT 系统的性能参数

国内外研究人员在增强 OCT 系统性能方面做了大量的工作,主要体现在系统分辨率、信噪比、成像深度等参数上。

3.1 分辨率

系统分辨率是衡量系统性能的重要指标,在 OCT 系统中提高分辨率对增强图像质量有重要作用。OCT 系统的分辨率包括横向分辨率和纵向分辨率,两者相互独立。

横向分辨率(Δx)指扫描振镜在扫描过程中能够分辨的最小横向尺度,与系统光学元件的聚焦能力相关,可表示为

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D}, \quad (1)$$

式中, λ 为系统光源的中心波长, f 为透镜组的有效焦距, D 为物镜上的光斑直径。

纵向分辨率(Δz)指轴向分辨率(光源的相干长度),也就是轴向能分辨的最小距离,与低相干干涉仪有关^[12],可表示为

$$\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为光谱的半峰全宽(FWHM)。提高系统的纵向分辨率,一般需要降低光源中心波长和提高带宽来实现。

唐弢等^[13]使用超连续谱激光光源搭建了一种超高分辨率 SD-OCT 系统,系统中心波长为 665 nm,光谱的 FWHM 为 230 nm,横向分辨率为 3.9 μm ,轴向分辨率达到 0.9 μm 。

3.2 信噪比

信噪比(SNR)是指系统探测到的信号与噪声的比值,也是衡量系统性能的重要指标之一,信噪比越高,系统成像越清晰。

OCT 系统探测到的信号可表示为^[14]

$$S_{\text{signal}} = \frac{2\eta^2 e^2 P_{\text{ref}} P_{\text{sample}}}{E_v^2}, \quad (3)$$

式中, P_{ref} 和 P_{sample} 分别为参考臂和样品臂返回的光功率, η 为探测器的效率,是 CCD 接收光强与探测器处的光强的比值, e 为电子电荷, E_v 为光子能量。

系统噪声主要包括热噪声、散粒噪声和相对强度噪声,其中起主要影响的是散粒噪声,可表示为^[14]

$$N_{\text{noise}} = \frac{2\eta e^2 P_{\text{ref}}}{E_v} \times \frac{X_{\text{BW}}}{M}, \quad (4)$$

式中, X_{BW} 为光源带宽, M 为探测单元数量。联立(3)式和(4)式,可得 OCT 系统的信噪比表达式为

$$R_{\text{SN}} = \frac{S_{\text{signal}}}{N_{\text{noise}}} = \frac{\eta P_{\text{sample}} M}{E_v X_{\text{BW}}}. \quad (5)$$

时域 OCT 系统采用单点探测,即 $M=1$,而 SD-OCT 系统中, M 表示 CCD 的探测单元个数,由(5)式可知,频域 OCT 信噪比是时域 OCT 信噪比的 M 倍,有巨大的提升空间。

(5)式中,每个探测单元的带宽 X_{BW}/M 可以用 $1/2\tau$ 表示, τ 为 CCD 的积分时间,由于 SD-OCT 干涉光谱密度为复数,而探测器接收的信号仅为实数部分,所以需要将信号除以 2。则 SD-OCT 信噪比可表示为

$$R_{\text{SN,SD-OCT}} = \frac{\eta P_{\text{sample}} \tau}{E_v}. \quad (6)$$

可以看出,SD-OCT 的信噪比受到探测效率、样品处的光功率、积分时间的影响,与光源带宽无关,通过增加带宽提升系统的分辨率不会对信噪比产生

影响,这是 SD-OCT 的另一个优势。

3.3 成像深度

SD-OCT 系统的成像深度会受到宽带光源的波长、功率大小、被检测的物体对光源的散射及吸收性能等因素影响,但主要受光谱仪分辨率的影响^[15-18]。SD-OCT 的成像深度公式可表示为

$$Z_{\max} = \frac{\pi}{2\delta k} = \frac{\lambda^2}{4\delta\lambda}, \quad (7)$$

式中, δk 为相邻的探测单元的波数间隔, $\delta\lambda$ 为探测器相邻像素点的波长间隔。根据(7)式可以看出,想要增加 SD-OCT 系统的成像深度,可以通过提高探测器光谱仪的分辨率,即增加光源的中心波长,或通过减小探测器的相邻像素点的波长间隔实现。

4 OCT 在物证鉴定领域中的应用

OCT 是一种原位、无损的光学检验技术,目前在法庭科学物证鉴定领域中已经有了部分应用。法庭科

学中,物证检验鉴定要求尽量在保证原始性的条件下进行,对检验方法和技术人员的操作提出了高要求。

4.1 油漆物证检验

汽车油漆是交通事故案中常见物证。汽车油漆一般由四层涂层组成,不同厂家、品牌以及出厂批次的汽车油漆涂层成分、用料比例有一定差异,通过油漆物证的检验鉴定能缩小侦查范围,为破案提供线索。公安部物证鉴定中心张宁课题组^[19]利用 OCT 的断层扫描特性对汽车油漆进行二维 OCT 成像。如图 2 所示,不同汽车品牌的二维 OCT 断层图像有较为直观的差异。通过获取样本的光程、散射强度比、光衰减系数等光学特征参数,利用 SPSS Statistics 中的独立 T 检验对不同品牌的油漆样本的特征参数进行处理,确定不同品牌样品之间相应的参数是否具有显著性差异($P < 0.05$)。结果表明,上述光学特征参数能有效区分不同样本的油漆物证,这为实际中汽车油漆物证检验提供了一种新的方法。

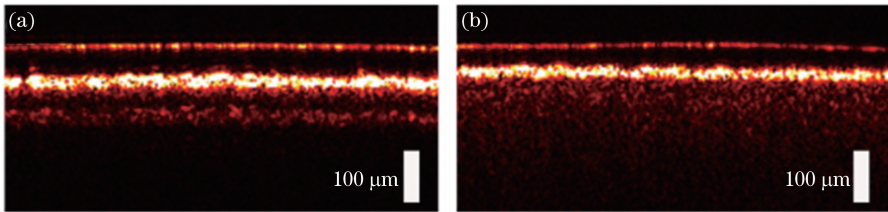


图 2 不同品牌汽车油漆二维 OCT 图像^[19]。(a)样品 1;(b)样品 2

Fig. 2 2D OCT images of different brands of automotive paint^[19]. (a) Sample 1; (b) sample 2

交通事故逃逸案中,肇事司机可能会对涉事车辆剐蹭处进行重新粉刷,对侦查人员寻找、认定肇事车辆造成困难。Wang 等^[20]利用 OCT 的三维成像能力,对汽车划痕进行三维建模,并获取车辆

重漆处横切面影像,如图 3 所示,样本采集尺寸约为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,能够清晰呈现出划痕重漆处形态。对认定肇事车辆,确定犯罪行为具有重要意义。

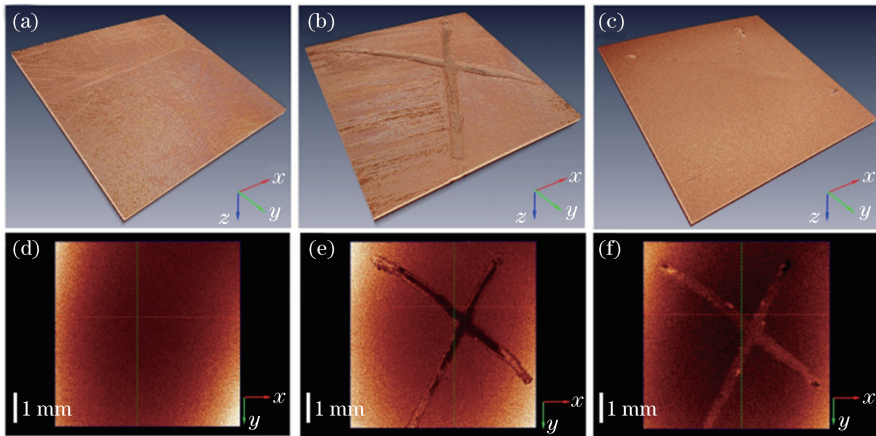


图 3 汽车油漆三维 OCT 成像^[20]。(a)~(c)原始汽车油漆、划痕汽车油漆、重漆汽车油漆三维 OCT 成像;
(d)~(f)原始汽车油漆、划痕汽车油漆、重漆汽车油漆横切面成像

Fig. 3 3D OCT images of automotive paint^[20]. (a)~(c) 3D OCT images of original, scratched and repainted automotive paint; (d)~(f) transverse sectional images of original, scratched and repainted automotive paint

4.2 电工胶带物证检验

电工胶带是绑架、爆炸、盗窃等案件现场常见的物证,通过对现场提取的电工胶带物证和从嫌疑人处获取的样本进行比较分析,能够建立两者之间的关系或排除合理怀疑,为侦查破案提供帮助。刘康康等^[21]于2018年利用OCT对电工胶带物证进行研究,基于OCT断层成像的能力,获取样本的光学

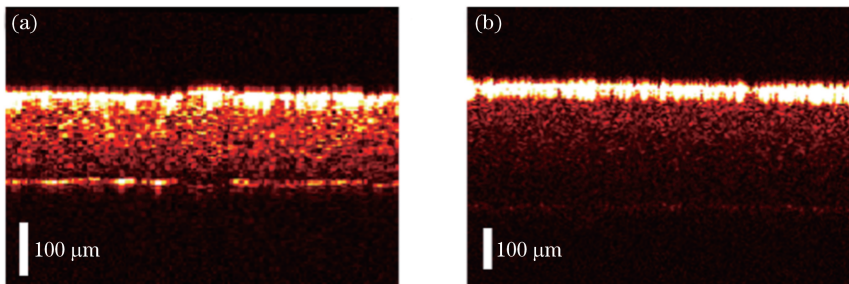


图4 不同品牌电工胶带二维OCT图像^[21]。(a)样品1;(b)样品2

Fig. 4 2D OCT images of different brands of electrical tapes^[21]. (a) Sample 1; (b) sample 2

4.3 胶带内部潜指纹提取

犯罪嫌疑人使用胶带时常会留下指纹,传统方式是对胶带进行剥离再获取指纹信息,但会破坏指纹纹线或留在胶带上的生物物证。OCT使用近红外光作为发射光源,具有一定的穿透能力,能够获取

特征参数,对不同厂家、品牌、型号的电工胶带物证进行了有效辨识。图4为电工胶带二维OCT断层图像,可以发现不同品牌电工胶带光程不同,光在胶带内部的衰减程度也有差异,通过分析光程、散射强度比、衰减系数以及信号峰个数对不同胶带进行辨识。与传统检验方法相比,OCT的原位、无损、快速检测,可以满足法庭科学对物证鉴定的要求。

样品内部信息,Zhang等^[22]利用OCT的断层成像特性,将胶带内部的深度方向信息提取出来,从而显现出隐藏在两层胶带内部的潜指纹。图5为通过OCT断层成像能力获取到的两层缠绕胶带内部的指纹信息。

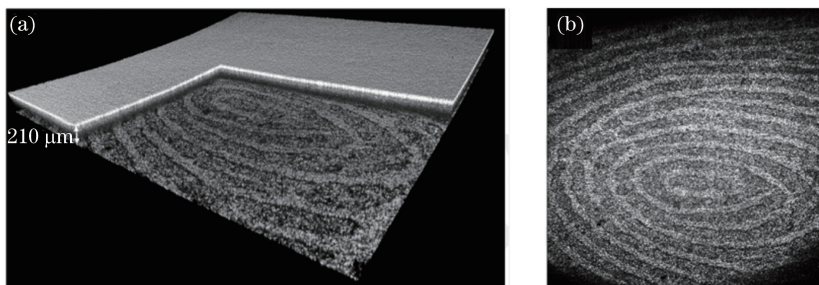


图5 OCT提取胶带内部指纹信息^[22]。(a)两层胶带三维OCT图像;(b)夹在两层胶带中间的指纹图像(深度210 μm)

Fig. 5 OCT extracts fingerprint information in the middle of the tapes^[22]. (a)3D OCT images of two layers of tapes; (b)image of fingerprint between two layers of tapes (depth:210 μm)

4.4 假币鉴别

假币鉴别是公安机关打击假币犯罪的重要手段。传统鉴定方式是通过对假币的纹线细节特征及油墨荧光现象分析得出结论,但这类方法大多只能

获取假币的表层信息。韩国研究人员Choi等^[23]利用OCT获取假币的内部切面信息,为假币鉴别提供了一种新的方法。如图6所示,利用OCT系统对韩币进行断层成像,获取其内部结构特征,箭头所

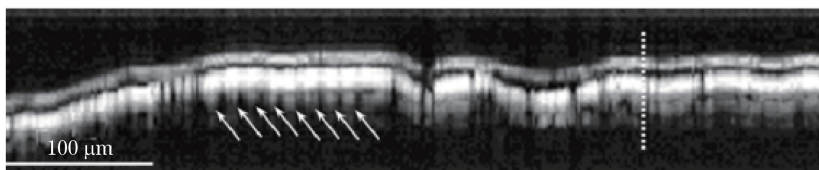


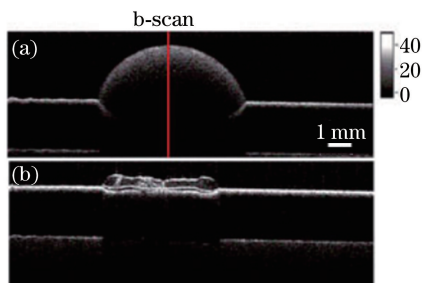
图6 韩币二维OCT断层图像^[23]

Fig. 6 2D OCT image of Korean currency^[23]

指处的细节特征对真、假钱币的辨识提供新的参照。真、假纸币不仅在表面做工上有所差异,纸币表面以下层次结构也有不同,通过观察假币 OCT 断层图像,能识别其分层结构及内部细节特征,从而进行真伪鉴别,为公安机关假币溯源提供线索。

4.5 血迹形态分析

血迹形态分析是犯罪现场重建的重要组成部分,通过血迹形态确定出血点、出血量,从而还原案发过



程,印证犯罪嫌疑人供述、证人证言、被害人陈述是否正确。如图 7 所示,Laan 等^[24]利用 OCT 系统对玻璃和不规则物体基底上的血迹进行成像,获取血迹的体积。同时测量干血和新鲜血液的体积比,通过测量犯罪现场遗留的干血体积,推断案发时新鲜血液的体积,进而分析血迹原始形态,判断案发过程。结合 OCT 具有的三维高分辨成像特性,还可以对血迹进行定量分析,对确定案发时间具有重要作用。

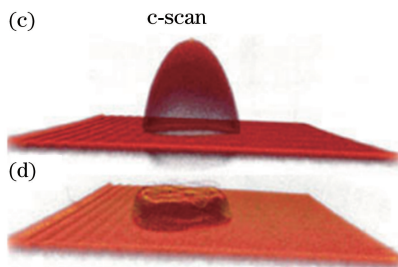


图 7 血迹 OCT 成像^[24]。(a)~(b)新鲜血迹和干血二维 OCT 图像;(c)~(d)新鲜血迹和干血三维 OCT 图像

Fig. 7 OCT images of blood^[24]. (a)–(b)2D OCT images of fresh blood and dry blood; (c)–(d) 3D OCT images of fresh blood and dry blood

5 结 论

法庭科学中物证的检验鉴定结果直接关系到其在法庭中的作用。综述了近年来 OCT 在国内外物证鉴定领域中的应用,OCT 作为一种光学探测技术,其无损性检验保证了样品的完整性,为刑事诉讼活动顺利进行提供了方便;其高分辨率、断层成像能够获取样品的内部信息,拓宽了物证检验的方式;便携化、小型化的发展趋势为今后物证快速显现和现场检验奠定了基础。OCT 的众多优势,使其在物证鉴定领域中有十分广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Huang D, Swanson E, Lin C, et al. Optical coherence tomography [J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [2] Gao Y, Li Z L, Zhang J H, et al. Automatic measurement method for corneal thickness of optical coherence tomography images [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0311003.
高阳, 李中梁, 张建华, 等. 光学相干层析成像图像中角膜厚度的自动测量方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0311003.
- [3] Hou F, Yang Z H, Gu W Q, et al. Intraoperative three-dimensional imaging of neck tissues based on optical coherence tomography [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0117001.

侯方, 杨子晗, 谷文青, 等. 基于光学相干层析技术的术中颈部组织三维成像 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0117001.

- [4] Gao Y Z, Yuan Y, Ma Z H. High-resolution cortical blood flow imaging based on optical coherence tomography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 111101.
高英哲, 袁毅, 马振鹤. 基于光学相干层析成像的皮层血流高分辨率成像 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111101.
- [5] Li P, Li P. Mass sample optical coherence tomography angiography technology and application [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0307001.
李培, 李鹏. 多样本光学相干血流运动造影技术及应用 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0307001.
- [6] Yan X, Dong J Q, Li Q H, et al. Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze based on OCT technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0908001.
严鑫, 董俊卿, 李青会, 等. 基于 OCT 技术对古代瓷釉断面结构特征的初步研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908001.
- [7] Wang K, Dong J Q, Zhao H X, et al. The non-destructive analysis of some ancient jade artifacts unearthed from Henan province by a variety of optical techniques [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(9): 2492-2499.

- 王凯, 董俊卿, 赵虹霞, 等. 应用多种光学分析技术对一批河南出土古代玉器的无损分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2492-2499.
- [8] Chen Z Y, Zhao C, Shen Y, et al. Ultrawide-field parallel spectral domain optical coherence tomography for nondestructive inspection of glass [J]. Optics Communications, 2015, 341: 122-130.
- [9] Zeng N, He Y H, Ma H, et al. Pearl detection with optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(8): 1140-1145.
曾楠, 何永红, 马辉, 等. 应用于珍珠检测的光学相干层析技术[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1140-1145.
- [10] Zhang N, Li Z H, Xu X J. Optical coherence tomography: principles and applications in forensic science[J]. Forensic Science and Technology, 2015 (5): 409-416.
张宁, 黎智辉, 许小京. 光学相干断层成像检验技术[J]. 刑事技术, 2015(5): 409-416.
- [11] Drexler W, Fujimoto J G. Optical coherence tomography: technology and applications [M]. Germany: Springer Science & Business Media, 2008.
- [12] Povazay B, Bizheva K, Unterhuber A, et al. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography [J]. Optics Letters, 2002, 27(20): 1800-1802.
- [13] Tang T, Zhao C, Chen Z Y, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(17): 174201.
唐弢, 赵晨, 陈志彦, 等. 超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 174201.
- [14] de Boer J F, Cense B, Park B H, et al. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography [J]. Optics Letters, 2003, 28(21): 2067-2069.
- [15] Wang R K, An L, Francis P, et al. Depth-resolved imaging of capillary networks in retina and choroid using ultrahigh sensitive optical microangiography [J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1467-1469.
- [16] Ding Z H, Ren H W, Zhao Y H, et al. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens[J]. Optics Letters, 2002, 27(4): 243-245.
- [17] Dunsby C, French W. Techniques for depth-resolved imaging through turbid media including coherence-gated imaging [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(14): R207-R227.
- [18] Ke J, Lam E Y. Image reconstruction from nonuniformly spaced samples in spectral-domain optical coherence tomography[J]. Biomedical Optics Express, 2012, 3(4): 741-752.
- [19] Zhang N, Wang C M, Sun Z W, et al. Characterization of automotive paint by optical coherence tomography [J]. Forensic Science International, 2016, 266: 239-244.
- [20] Wang C M, Zhang N, Sun Z W, et al. Recovering hidden sub-layers of repainted automotive paint by 3D optical coherence tomography[J]. Australian Journal of Forensic Sciences, 2019, 51(3): 331-339.
- [21] Liu K K, Meng L, Zhang N, et al. Characterization of electrical tapes by optical coherence tomography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011101.
刘康康, 孟利, 张宁, 等. 基于光学相干层析技术的电工胶带检验方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011101.
- [22] Zhang N, Wang C M, Sun Z W, et al. Detection of latent fingerprint hidden beneath adhesive tape by optical coherence tomography [J]. Forensic Science International, 2018, 287: 81-87.
- [23] Choi W J, Min G H, Lee B H, et al. Counterfeit detection using characterization of safety feature on banknote with full-field optical coherence tomography [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2010, 14(4): 316-320.
- [24] Laan N, Bremmer R H, Aalders M C G, et al. Volume determination of fresh and dried bloodstains by means of optical coherence tomography [J]. Journal of Forensic Sciences, 2014, 59(1): 34-41.