

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007090

基于紫外光诱导荧光的渗透性纸张上微量物证检测技术研究*

凌丽青^{1,2}, 黄立华^{1,2}, 郭凯¹, 胡敬佩¹, 黄惠杰^{1,2}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室 上海 201800;
2. 中国科学院大学材料与光电研究中心 北京 100049)

摘要:为解决刑事案件中附着于渗透性纸张上的无色微量物证探测难的问题,分析常用纸张的紫外荧光特性,为滤除纸张上的强背景荧光提供依据,研制基于紫外光诱导荧光的渗透性纸张上微量物证检测装置。检测装置中,为有效激发各种微量物质荧光,采用光子能量高的深紫外激光作为激发光源;为获得更准确的痕迹信息,装置接收多光谱荧光并进行结果比对;同时,提出以背景灰度标准差来衡量纸张荧光的均匀性,以图像痕迹对比度评价痕迹的检测效果。使用本装置对常用纸张上的指印、明矾等5种无色痕迹开展实验验证,结果表明,所提方法能清晰显现纸张上的潜指印,且获得的指印条纹对比度与纸张背景灰度标准差成反比;同时,学生作业纸上的10%明矾溶液痕迹信息、复印纸上的2.5%谷氨酸钠溶液痕迹信息、便利贴上的2.5%磺酸钠溶液痕迹信息、便利贴上的0.004%硫酸铜溶液痕迹信息均能清晰显现。所提方法具有检测灵敏度高、非接触性、非破坏性、多光谱等优点,能快速获得高荧光纸张上多种微弱痕迹的清晰图像,为刑事侦查提供有力的帮助。

关键词: 紫外激光;微量物证;刑事侦查;无色痕迹;荧光光谱;对比度

中图分类号: TH744 TN23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on trace evidence detection on the porous paper based on ultraviolet laser-induced fluorescence technology

Ling Liqing^{1,2}, Huang Lihua^{1,2}, Guo Kai¹, Hu Jingpei¹, Huang Huijie^{1,2}

(1. Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To effectively detect the latent trace evidence on porous paper, the ultraviolet fluorescence characteristics of commonly used paper are analyzed, which provides the basis for filtering the strong background fluorescence from paper. A detection device based on ultraviolet laser-induced fluorescence is developed. To effectively stimulate the fluorescence of various trace substances, a deep ultraviolet laser is used as the excitation light source. To obtain more accurate trace information, the device receives multispectral fluorescence and compares the results. Meanwhile, the standard deviation of background gray value is utilized to measure the uniformity of paper fluorescence. The trace contrast of image is used to evaluate the trace detection effect. Five kinds of latent trace on the common paper are detected. Experimental results show that the proposed method can clearly display latent fingerprints on paper, and the contrast of fingerprint ridges is inversely proportional to the standard deviation of paper background gray. At the same time, the trace information of 10% alum solution on students work paper, 2.5% sodium glutamate solution on copy paper, 2.5% sodium sulfonate solution on sticky note and 0.004% copper sulfate solution on sticky note can be clearly displayed. The proposed method has the advantages of sensibility, non-destructiveness, non-contact and multispectral. By utilizing this method, clear images of various kinds of latent trace on paper can be obtained quickly, which can provide powerful help for criminal investigation.

Keywords: ultraviolet laser; trace evidence; criminal investigation; latent trace; fluorescence spectrum; contrast

收稿日期:2020-11-08 Received Date: 2020-11-08

* 基金项目:国家自然科学基金(61805264)项目资助

0 引言

任何犯罪行为都不可避免地引起现场环境的变化,进而留有犯罪痕迹和相应的微量物证。微量物证种类繁多、量小体微,具有极强的隐蔽性和依附性,通常人眼不可见,不易被罪犯清除毁灭,不易被侦查人员探测到^[1-11]。在刑事案件中,微量物证常附着于纸张上。纸张的成分多样、微结构复杂等特点给微量物证的提取和识别增加难度^[12-20]。现有的物证分析方法通常需要对物证进行预处理,不仅对检材存在破坏性,且有些预处理试剂危害人员健康^[21-23],无法实现无损检测。目前常用的光学检测方法普遍使用特定波长的光源照射检材,并使用相机对检材进行拍照,可实现无损检测^[24-26],但这种方法对微量痕迹的检出率低。

由于成分和构造状态复杂多样,微量物质的紫外光谱曲线形状与强度分布不同^[27-34]。基于纸张和微量物质的紫外光谱曲线形状和强度分布不同,本文开展基于紫外光诱导荧光的渗透性纸张上微量物证检测技术研究。为有效激发各种微量物质荧光,采用光子能量高的深紫外激光作为激发光源;分析常用纸张的紫外荧光特性,为有效滤除纸张上的强背景荧光提供依据;同时,提出以背景灰度标准差来衡量纸张荧光的均匀性,并以图像的痕迹对比度评价痕迹检测效果;为实现不同痕迹物质的探测,获得更准确的痕迹信息,装置接收多光谱荧光并进行结果比对。使用本装置对常用纸张上的指印、明矾等5种无色痕迹开展实验验证,结果表明,本文的方法具有检测灵敏度高、非接触性、非破坏性等优点,能快速获得高荧光纸张上多种微弱痕迹的清晰图像,为刑事侦查提供有力的帮助。

1 紫外荧光特性

1.1 纸张紫外荧光特性

下转换发光材料可将吸收的一个高能光子转换为两个或两个以上的低能量光子,理论上量子效率可达200%以上。当使用光子能量高的紫外光照射纸张时,纸张的纤维、填料、胶料、色料、涂料等成分将与光子发生相互作用,以下转换发光的形式发射不同能量的低能量光子。纸张种类繁多,不同纸张的成分、微结构差异大,因此,对入射紫外光的散射、吸收、透射等作用能力也不同,这导致不同纸张的紫外荧光特性差异较大。

使用波长为263 nm的紫外激光束辐照纸张表面,用QE65000光纤光谱仪测量纸张的紫外荧光光谱,得到复印纸、学生作业纸、便利贴和报纸的紫外荧光光谱如图1所示。在263 nm激光辐照下,纸张发出明亮的荧光,荧

光强度大。荧光光谱范围较宽,覆盖400~600 nm的可见光波段。荧光波段范围内存在明显的荧光峰,不同纸张的荧光峰值位置、形状和荧光强度差异较大。复印纸、学生作业纸和报纸的峰值波长在443 nm附近,且荧光峰左侧光谱特征曲线较陡峭,荧光峰右侧光谱特征曲线变化较平缓。便利贴的荧光峰值波长在528 nm附近,荧光峰的左右两侧光谱特征曲线变化较平缓。纸张的上述紫外荧光特性使得这一类高荧光强度、宽光谱范围的检材上微量物质的探测成为难点。

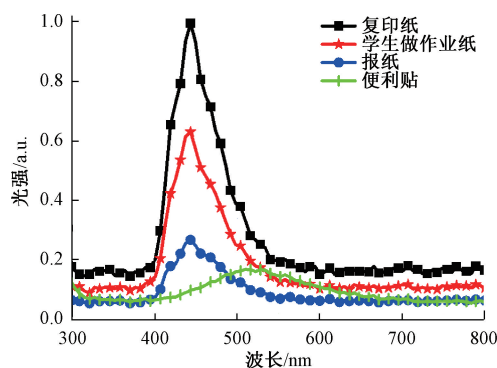


图1 纸张的紫外光谱

Fig. 1 Ultraviolet spectra of paper

1.2 典型微量物质紫外荧光特性

图2所示为指纹在266 nm激光激发下的典型荧光光谱^[35],光谱曲线有两个主峰,一个位于约330 nm处(A峰),另一个位于约440 nm处(B峰)。在400~500 nm波段,指纹荧光与纸张的强荧光波段重叠。

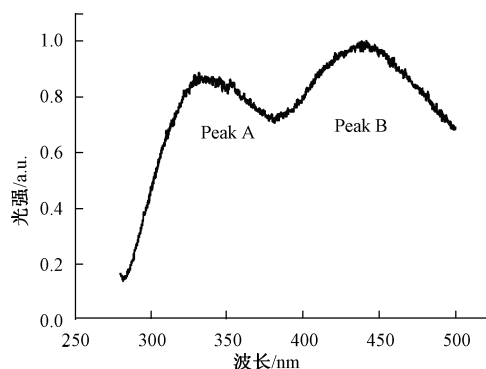


图2 指纹的典型紫外荧光光谱^[35]

Fig. 2 Typical ultraviolet fluorescence spectrum of a fingerprint^[35]

图3所示为266 nm激光激发下,使用中心波长为350 nm的带通滤光片,学生作业纸荧光光谱与指印和学生作业纸叠加荧光光谱^[36]。其中,虚线是纸张的荧光光谱,荧光峰位置约为370 nm。实线是指印和纸张的荧光光谱叠加曲线,荧光峰位置也在370 nm附近,并且在

330 nm 附近有次峰,而这个次峰正对应指印的荧光峰(A 峰)。纸张的荧光光谱与指印和纸张叠加的荧光光谱在 370~400 nm 范围内重合,而在 300~370 nm 范围内差异明显。

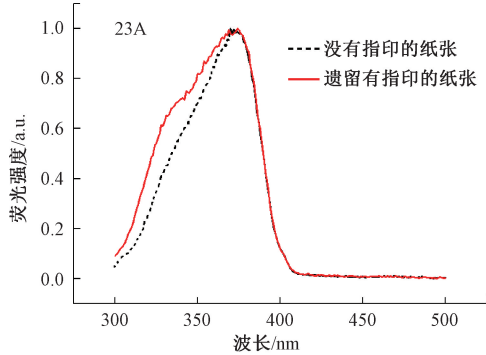


图 3 纸张光谱与指印和纸张叠加光谱^[36]

Fig. 3 Paper fluorescence spectrum versus fingerprint and paper superposition fluorescence spectrum^[36]

在 230 nm 激光激发下,磺酸钠分别在 290 nm 和 340 nm 处有发射峰^[37],发射光谱如图 4 所示。290 nm 荧光峰左侧光谱曲线较陡峭,右侧光谱曲线变化较平缓,光谱宽度约为 40 nm;340 nm 荧光峰的左右两侧曲线变化较平缓,光谱宽度约为 35 nm。

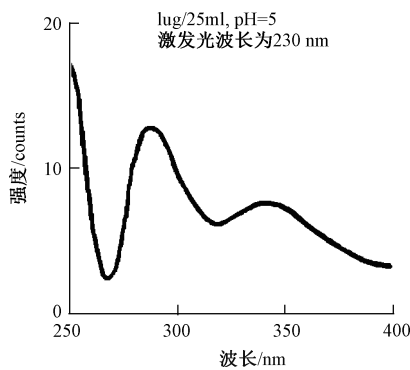


图 4 磺酸钠的发射光谱^[37]

Fig. 4 Emission spectrum of sodium sulfonate^[37]

2 检测装置研制

2.1 检测装置原理

本文基于上述纸张与痕迹物质的紫外荧光特性,开展纸张上微量物证的检测技术研究。对于一个紫外荧光探测系统^[38],输出信号强度 P 可表示为:

$$P = E * \alpha * T * \eta \tag{1}$$

式中: E 表示被紫外激光激发出的荧光强度,与纸张特性、痕迹特性、激发光特性(波长、强度等)有关; α 表示荧

光收集效率,由光学系统的设计决定; T 表示光学系统透过率,可根据纸张特性和痕迹特性进行设计; η 表示光电探测器的转换效率。开展纸张这样一类高荧光背景检材上微量物质的探测,需要对 E 、 α 、 T 、 η 进行优化设计,以使得检测装置能检测出不同纸张上的不同微量物质痕迹。

2.2 检测装置设计

基于上述分析,本文利用痕迹物质与纸张的荧光强度差别,或者荧光峰形状差别建立纸张上微弱痕迹的检测方法,检测原理如图 5 所示。263 nm 激光器输出的紫外激光束依次经反射镜、扩束镜组、分光镜、扫描振镜^[39]、F-theta 透镜聚焦在检材上。检材被紫外激光束激发出的荧光依次经 F-theta 透镜、扫描振镜、分光镜、长波通滤光片、窄带滤光片、消色差透镜和孔径光阑进入光电探测器,光电探测器接收入射的荧光并转变为电信号。为提高探测效率,本文使用光电倍增管探测不同波段荧光。通过改变激光器的输出光功率,可改变检材的受激发射的荧光强度 E ;F-theta 透镜主要决定荧光收集效率;针对不同微量物质的滤光片的设计,可改变特定荧光波段的透过率;而 η 主要取决于光电倍增管的选型。

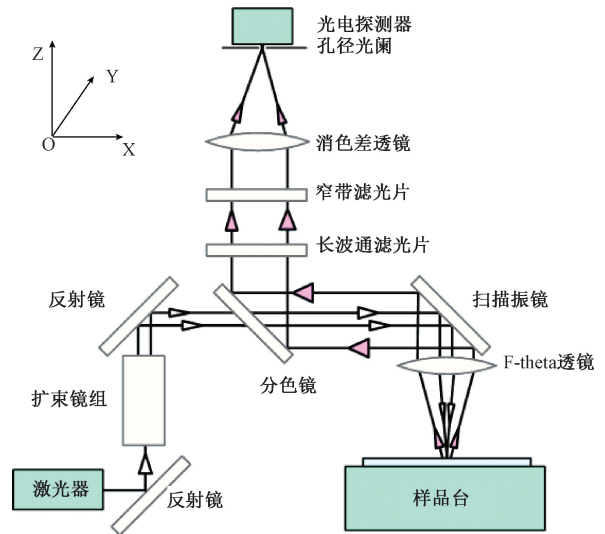


图 5 检测原理

Fig. 5 Detection schematic

紫外光诱导荧光检测装置通过二维扫描振镜的高速偏转实现激光光斑在检材上的摆扫,同时收集检材上摆扫区域内的荧光信号分布,以实现检材上指定区域的检测。针对激发光强度远大于荧光强度的特点,采用固定的长波通滤光片和可更换的窄带滤光片相组合的方式,实现多荧光光谱的高信噪比探测。长波通滤光片主要用于滤除激发光的干扰。窄带滤光片用于保留特定波段荧光,同时滤除激发光和其他背景光的干扰。滤光片轮将指定的窄带滤光片置于接收光路中,以实现检材不同波

段荧光的探测。滤光片透过率曲线如图6所示,可看出长波通滤光片对263 nm 激发光有较强的衰减,对300~800 nm 波段具有较高的透过率。窄带滤光片在通带范围内均具有较平坦的透过率,而纸张的荧光光谱分布具有明显峰值。当痕迹的荧光光谱与纸张的荧光光谱范围重合时,可利用痕迹物质与纸张的荧光强度差异这一特性实现微量痕迹的探测。

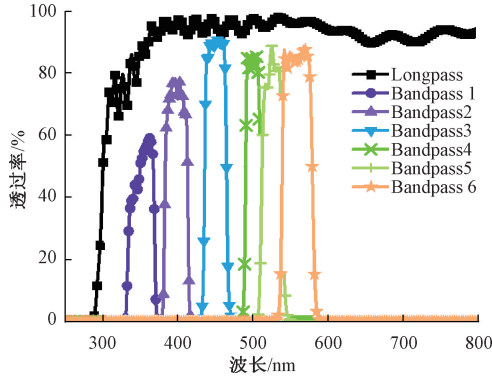


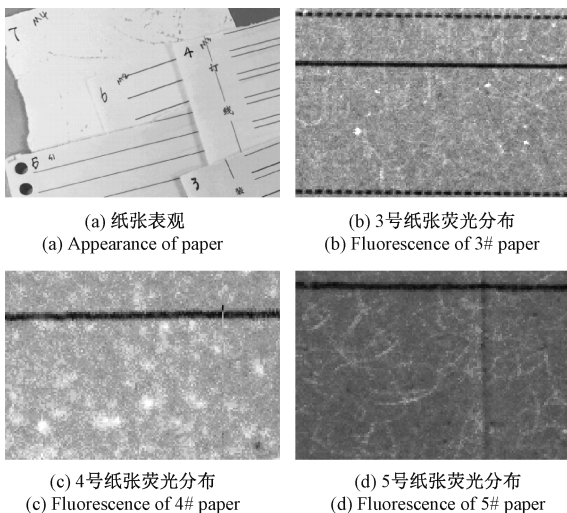
图6 滤光片透过率曲线

Fig. 6 Transmittance curves of the filters

3 实验研究

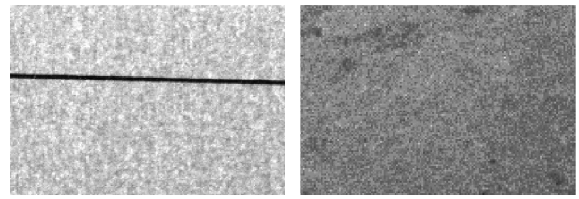
3.1 纸张荧光均匀性与痕迹对比度

由于纸张的纤维、填料、胶料、色料、涂料等成分各异,微结构复杂,不同纸张对入射紫外光的散射、吸收、透射、紫外荧光等作用能力不同。使用本装置对图7(a)中的5种纸张进行检测,得到350 nm 波段的荧光分布图像,如图7(b)~(f)所示,可以看出,不同纸张的紫外荧光分布状态差异明显。具有不同紫外荧光特性的成分在纸张上分布不均匀,这将影响纸张上微弱痕迹的检测效果。



(c) 4号纸张荧光分布
(c) Fluorescence of 4# paper

(d) 5号纸张荧光分布
(d) Fluorescence of 5# paper



(e) 6号纸张荧光分布
(e) Fluorescence of 6# paper
(f) 7号纸张荧光分布
(f) Fluorescence of 7# paper

图7 不同纸张的荧光分布

Fig. 7 Fluorescence distribution of different papers

本文采用图像的背景灰度标准差来判断背景是否平坦,即判断背景荧光的均匀性。背景灰度标准差 S 的表达式如(2)、(3)所示。灰度标准差反映图像像素灰度值相对于均值的离散情况,背景灰度标准差越小,表明背景均匀性越好。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N S_x}{N} \quad (2)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (GV_i - \overline{GV_x})^2}{P - 1}} \quad (3)$$

式中: N 为图像中框选的背景区域数(即方框个数,图8中, $N = 4$), $S_x (x = 1, 2, \dots, N)$ 区域 $x (x = 1, 2, \dots, N)$ 的灰度标准差; $\overline{GV_x}$ 区域 x 内所有像素点(P 个)的灰度均值; GV_i 区域 x 内第 $i (i = 1, 2, \dots, P)$ 个像素点的灰度值。

针对指印这样一类条纹痕迹,提出使用图像痕迹对比度来衡量检测效果。图像痕迹对比度定义为:

$$C_{img} = \frac{\sum_{i=1}^n C_x}{n} \quad (4)$$

式中: C_x 是线条 $x (x = 1, 2, \dots, M)$ 覆盖的像素灰度对比度,表达式如(5)所示; GV_{rx} 是线条 x 覆盖的区域中脊线 $ri (i = 1, 2, \dots, w)$ 的灰度均值; GV_{fx} 是线条 x 覆盖的区域中谷线 $ff (j = 1, 2, \dots, z)$ 的灰度均值; M 是线条数(如图8所示, $M = 4, w = 7, z = 7$)。

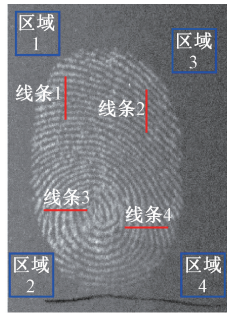
$$C_x = \frac{GV_{rx}}{GV_{fx}} \quad (5)$$

$$GV_{rx} = \frac{\sum_{i=1}^w ri}{w} \quad (6)$$

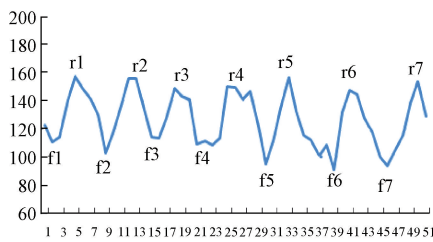
$$GV_{fx} = \frac{\sum_{j=1}^z ff}{z} \quad (7)$$

图8(a)所示为263 nm 激光辐照下留有潜在指印的复印纸在350 nm 波段的荧光信号分布,(b)为(a)中线

条 1 覆盖的像素灰度值曲线。根据式 (2)、(4) 得图 8(a) 的背景灰度标准差为 $S = 0.86$, 指印条纹对比度为 $C_{img} = 1.49$ 。



(a) 指印图像
(a) Fingerprint image



(b) 线条 1 覆盖的像素灰度值曲线
(b) Gray value curve covered by line 1

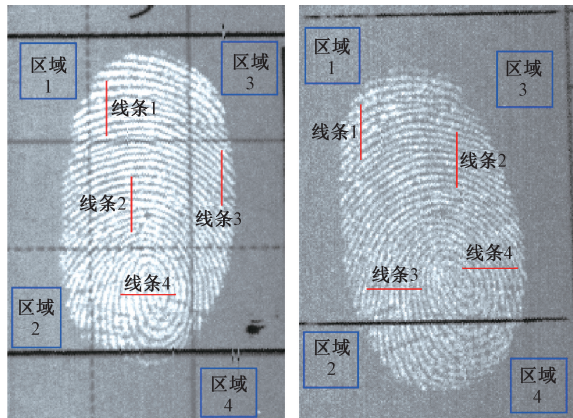
图 8 复印纸上指印图像的荧光信号分布

Fig. 8 Fluorescence signal distribution of fingerprint image

3.2 指印的检测

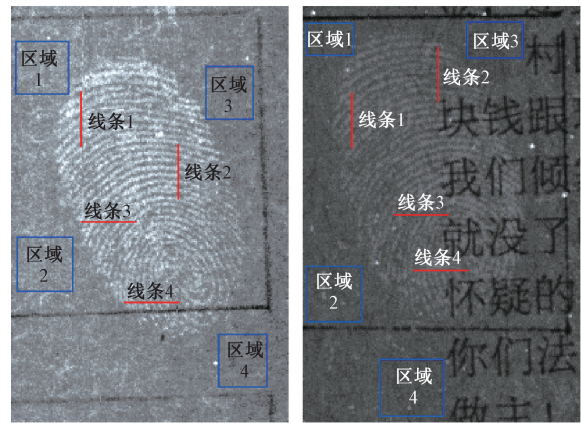
同人同指,按捺力度与时间一致,分别在学生作业纸、复印纸、便利贴和报纸上形成潜在指印。使用紫外光诱导荧光检测装置对上述形成的潜在指印进行检测,350 nm 波段的指印原始图像如图 9 所示。

图 9 中,所选的区域在图像内分布相对均匀,避开指印区域,线条则相对均匀地分布在指印区域内部。根据式 (2)、(4) 获得图 9 指印原始图像的背景灰度标准差和指印条纹对比度,如图 10 所示。



(a) 学生作业纸
(a) Student work paper

(b) 复印纸
(b) Copy paper



(c) 便利贴
(c) Sticky note

(d) 报纸
(d) Newspaper

图 9 指印原始图像

Fig. 9 Original fingerprint image

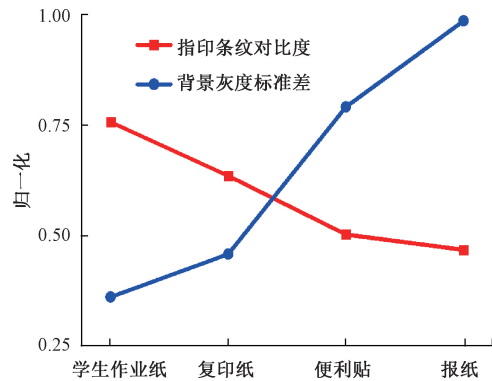


图 10 指印条纹对比度与背景灰度标准差

Fig. 10 Contrast of fingerprint ridges and standard deviation of background gray

由图 10 可知,不同种类纸张上指印图像的检测效果不同,学生作业纸、复印纸、便利贴和报纸上指印图像的背景灰度标准差呈增大趋势,而图像的指印条纹对比度逐渐减小,即指印图像的指印条纹对比度与背景灰度标准差成反比。

3.3 无色溶液痕迹的检测

渗透性纸张具有孔隙结构,对接触的液体具有吸收与渗透作用,从而形成液体物质的痕迹。用蒸馏水制备磺酸钠、谷氨酸钠、明矾和硫酸铜的梯度样品溶液。用钢笔以每分钟 15 字的速度分别在学生作业纸、复印纸、便利贴和报纸上形成梯度样品溶液无色痕迹,使用紫外光诱导荧光检测装置对形成的无色痕迹进行扫描检测,获取荧光信号分布图像。

便利贴上,磺酸钠溶液痕迹在 528 nm 波段的探测效果较好,其他波段探测效果不佳。528 nm 和 395 nm 波段的痕迹如图 11 所示。由图 11 可知,在 395 nm 波段,磺

酸钠溶液痕迹的荧光强度稍大于纸张的荧光强度,成亮痕迹暗背景模糊图像;在 528 nm 波段,磺酸钠溶液痕迹基本上没有荧光信号,而便利贴的紫外荧光峰值在 528 nm 附近,即磺酸钠与纸张在 528 nm 波段的荧光强度差异显著,成暗痕迹亮背景清晰图像。

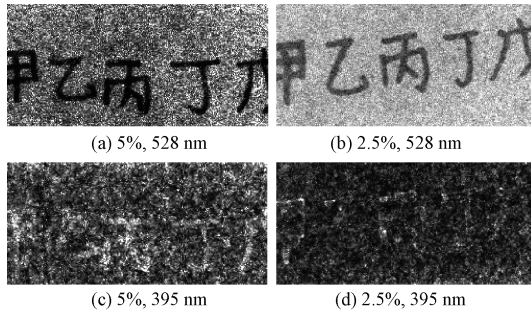


图 11 便利贴上磺酸钠溶液的痕迹

Fig. 11 Trace of sodium sulfonate solution on sticky note

复印纸上,谷氨酸钠溶液痕迹在 350 nm 和 562 nm 波段探测效果较好,其中 350 nm 波段的探测效果优于 562 nm 波段,如图 12 所示。由图 12 可知,在 350 nm 波段,谷氨酸钠溶液痕迹的荧光强度大于纸张的荧光强度,成亮痕迹暗背景图像;在 562 nm 波段,谷氨酸钠溶液痕迹基本上没有荧光信号,而纸张具有强度较小的荧光信号,成暗痕迹亮背景图像。

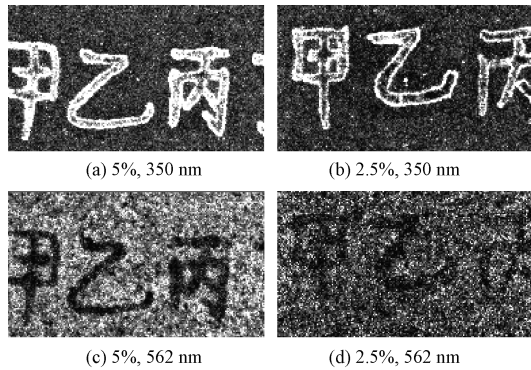


图 12 复印纸上谷氨酸钠溶液的痕迹

Fig. 12 Trace of sodium glutamate solution on copy paper

明矾溶液痕迹的单波段检测效果均不佳,但通过对多波段图像进行综合比对,相互印证,可以共同确认痕迹信息。如图 13 所示,学生作业纸上,350 nm、450 nm、500 nm、528 nm 波段的 10% 明矾溶液痕迹都模糊不清,但通过 4 个波段图像的相互对比印证,痕迹信息得以清晰辨认。

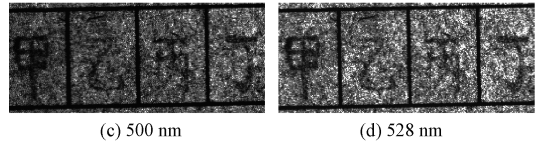
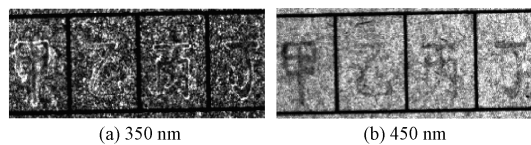


图 13 学生作业纸上明矾溶液的痕迹

Fig. 13 Trace of alum solution on student work paper

硫酸铜溶液痕迹在 350~562 nm 波段基本没有荧光信号,痕迹检测效果佳。如图 14 所示,350 nm 波段下,学生作业纸、复印纸、便利贴和报纸上,较低浓度的硫酸铜溶液痕迹均清晰可见。

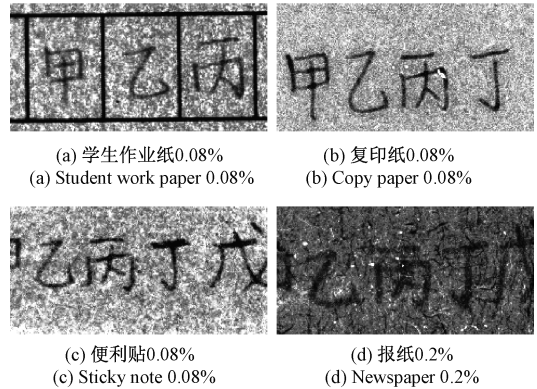


图 14 350 nm 波段的硫酸铜溶液痕迹

Fig. 14 Trace of copper sulfate solution at 350 nm wave-band

当溶液浓度较低时,留在纸张上的痕迹物质少,痕迹与纸张的紫外荧光特性差异微弱。基于此,本文的多光谱荧光信号综合比对方法可提高微弱痕迹的检测效果。图 15 为便利贴上 0.004% 硫酸铜溶液的痕迹图像,通过多波段检测结果图像的相互比对,便利贴上微弱硫酸铜溶液痕迹的细节信息得以确认。

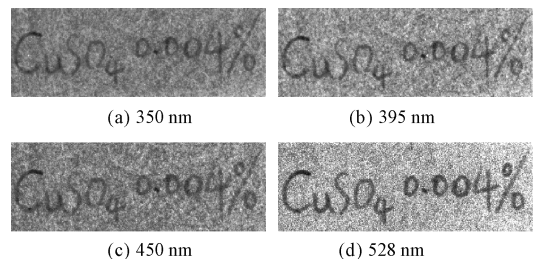


图 15 便利贴上 0.004% 硫酸铜溶液的痕迹图像

Fig. 15 Trace of 0.004% copper sulfate solution on sticky note

4 结 论

为有效探测附着于渗透性纸张上的无色微量物证,

本文分析常用纸张的紫外荧光特性,为滤除纸张上的强背景荧光提供依据,研制基于紫外光诱导荧光的渗透性纸张上微量物证检测装置。在装置中,为实现微弱痕迹探测的高激发光功率密度需求,采用聚焦光斑照射检材;为实现强荧光背景的滤除和多光谱荧光探测,采用固定的长波通滤光片和可更换的窄带滤光片相组合的方式;为实现不同波段微弱荧光的高效探测,使用消色差透镜和高量子效率光电探测器。同时,提出以背景灰度标准差衡量纸张背景荧光的均匀性,以图像的痕迹对比度评价痕迹检测效果。针对荧光光谱宽且荧光强度大的复杂背景——纸张上无色微量物质痕迹探测难的问题,本文检测未知无色痕迹的不同波段荧光,并对多波段荧光分布图像进行综合比对,相互印证,以共同确认痕迹细节信息,提高微量物证检出率,减少证据灭失。对常用纸张上的5种无色痕迹开展多光谱荧光检测实验,结果表明,本文的方法具有检测灵敏度高、检测速度快、非接触性、非破坏性等优点,可实现高荧光纸张上无色微量物质痕迹的多光谱检测,为刑事侦查重建事件发生经过与推断案件事实提供有力的帮助,在刑侦领域中具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] TREJOS T, KOCH S. Scientific foundations and current state of trace evidence—A review [J]. *Forensic Chemistry*, 2020, 18: 100223.
- [2] STONEY D A, STONEY P. Critical review of forensic trace evidence analysis and the need for a new approach[J]. *Forensic Science International*, 2015, 251: 159-170.
- [3] WOODMAN P A, SPIRANOVIC C. The impact of chemical trace evidence on justice outcomes: Exploring the additive value of forensic science disciplines [J]. *Forensic Science International*, 2020, 307: 110121.
- [4] GIROD A, RAMOTOWSKI R. Composition of fingerprint residue: A qualitative and quantitative review[J]. *Forensic Science International*, 2012, 223: 10-24.
- [5] XING ZH, YANG R Q. A modified trace metal detection test for secondary imprints on porous substrates: A preliminary study [J]. *Forensic Science International*, 2019, 296: 28-38.
- [6] 谢峰,谢铁邦,李柱. 一种新型非接触式三维弹头痕迹检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(1): 46-49.
XIE F, XIE T B, LI ZH. A new non-contact measuring system for 3D bullet marks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(1): 46-49.
- [7] ROUX C P, ROBERTSON J. Trace evidence overview[J]. *Encyclopedia of Forensic Sciences*, 2013: 279-285.
- [8] 王延,吕俊,唐晖,等. 红外差谱技术在交通事故物证比对中的应用研究[J]. *刑事技术*, 2017, 42(3): 187-190.
WANG Y, LYU J, TANG H, et al. Application of infrared differential spectrum technology to compare the evidential material in traffic accident [J]. *Forensic Science and Technology*, 2017, 42(3): 187-190.
- [9] 姚明飞,李晨曦,范颖,等. 多波长频分复用人体成分检测系统的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(3): 39-43.
YAO M F, LI CH X, FAN Y, et al. Research on human body component detection system based on multi-wavelength frequency division multiplexing [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(3): 39-43.
- [10] 许友林,张汝政,田素梅. 生物测定技术的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(4): 214-215, 220.
XU Y L, ZHANG R ZH, TIAN S M. Application of the biometrics technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(4): 214-215, 220.
- [11] 黎乾,权养科. 泥土物证检验技术的现状及发展[J]. *刑事技术*, 2010, 6: 25-28.
LI Q, QUAN Y K. Present status and prospect of soil evidence examination [J]. *Forensic Science and Technology*, 2010, 6: 25-28.
- [12] LING L Q, HUANG L H, GUO K, et al. Detection of fingerprints on porous papers and performance evaluation[J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126276.
- [13] HAVLINOVA B, HORNAKOVA L, BREZOVA V, et al. Ink receptivity on paper—characterization of paper materials [J]. *Colloids and Surfaces*, 2000, 168(3): 251-259.
- [14] VERNHES P, BLOCH J F, MERCIER C, et al. Statistical analysis of paper surface microstructure: A multi-scale approach [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(22): 7431-7437.
- [15] PENTTIL A, LUMME K. The effect of the properties of porous media on light scattering [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(18): 1993-2001.
- [16] 吕晓慧,阳路,刘文波. 纸张的孔隙及其结构性能[J]. *中国造纸*, 2016, 35(3): 64-70.
LYU X H, YANG L, LIU W B. Pore in paper and its structural functions [J]. *China Pulp & Paper*, 2016, 35(3): 64-70.
- [17] 顾小萍,唐正宁. 渗墨对喷墨印刷图像质量的影响[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 157-160.

- GU X P, TANG ZH N. Analysis of ink penetration of ink-jet printing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 157-160.
- [18] MENDES A O, FIADEIRO P T, RAMOS A M M, et al. Development of an optical system for analysis of the ink-paper interaction[J]. Machine Vision and Applications, 2013, 24: 1733-1750.
- [19] CHEN Y X, SU N, ZHANG K T, et al. Effect of fiber surface treatment on structure, moisture absorption and mechanical properties of luffa sponge fiber bundles[J]. Industrial Crops & Products, 2018, 123: 341-352.
- [20] LINDER T, LOFQVIST T. Anisotropic light propagation in paper[J]. Nordic Pulp and Paper Research, 2012, 27(2): 500-506.
- [21] SODHI G S, KAUR J. Physical developer method for detection of latent fingerprints: A review [J]. Forensic Sciences, 2016, 6(2): 44-47.
- [22] RICCI C, PHIRIYAVITYOPAS P, CURUM N, et al. Chemical imaging of latent fingerprint residues [J]. Applied Spectroscopy, 2007, 61 (5): 514-522.
- [23] 许林茹. 电化学发光成像技术在潜在指纹显现与成分识别中的应用[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- XU L R. Development and component recognition of latent fingerprints by electrochemiluminescence imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [24] NAKAMURA A, OKUDA H, NAGAOKA T, et al. Portable hyperspectral imager with continuous wave green laser for identification and detection of untreated latent fingerprints on walls[J]. Forensic Science International, 2015, 254: 100-105.
- [25] 李红霞,钮洁青,陈敬蓉,等. 荧光成像无损显现纸张潜指印研究[J]. 激光与光电子学进展,2016,53: 023002.
- LI H X, NIU J Q, CHEN J R, et al. Noninvasive detection of latent fingerprints on papers using fluorescence imaging technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53: 023002.
- [26] MALEGORI C, ALLADIO E, OLIVERI P, et al. Identification of invisible biological traces in forensic evidences by hyperspectral NIR imaging combined with chemometrics[J]. Talanta, 2020, 215: 120911.
- [27] 张巍巍,程浩,肖慧荣,等. 荧光式传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报,2020,41(4):1-13.
- ZHANG W W, CHENG H, XIAO H R, et al. Advances of fluorescence-based sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 1-13.
- [28] AKIBA N, SAITOH N, KUROKI K. Fluorescence spectra and images of latent fingerprints excited with a tunable laser in the ultraviolet region [J]. Journal of Forensic Sciences, 2007, 52(5): 1103-1106.
- [29] 王细生,王志红,郑翔鹏,等. 谷氨酸酶促反应中光替代谷氨酸氧化酶的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2000,39(5):637-641.
- WANG X SH, WANG ZH H, ZHENG X P, et al. A study on light as a substitute for glutamic acid oxidase in the enzymatic reaction of glutamic acid[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2000, 39(5): 637-641.
- [30] 宋言明,张雄雄,孙广开,等. 纳米金改善激光诱导等离子体探测方法研究 [J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):21-27.
- SONG Y M, ZHANG X X, SUN G K, et al. Study on the improvement of laser induced plasma detection method by Au-nanoparticles [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 21-27.
- [31] 陈凤英,杨林,黎祥妨. 丹参酮 II A-磺酸钠与牛血清蛋白的相互作用[J]. 商洛学院学报,2019,33(2): 1-4.
- CHEN F Y, YANG L, LI X F. The interaction between sodium tanshinone II a-sulfonate and bovine serum albumin [J]. Journal of Shangluo University, 2019, 33(2): 1-4.
- [32] 黄春霞,荀苏杭,陈静,等. 镧谷氨酸咪唑配合物的合成、表征及荧光性质[J]. 化学试剂,2011,33(10): 873-875,950.
- HUANG CH X, XUN S H, CHEN J, et al. Synthesis, characterization and fluorescence properties of lanthanum complex with glutamic and imidazole ligands [J]. Chemical Reagents, 2011, 33(10): 873-875, 950.
- [33] 宋彦军,李甘雨,张健,等. 黄绿色明矾石玉的矿物学特征及颜色成因研究[J]. 岩矿测试,2020,39(5): 706-719.
- SONG Y J, LI G Y, ZHANG J, et al. Mineralogical characteristics and coloration mechanism of yellow-green alunite jade [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(5): 706-719.
- [34] 董春法. 化学还原法制备单分散纳米银与纳米铜的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- DONG CH F. Synthesis of monodispersed silver and copper nanoparticles via chemical reduction methods[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [35] SAITOH N, AKIBA N. Ultraviolet fluorescence spectra of fingerprint [J]. The Scientific World Journal, 2005,

5: 355-366.

- [36] 赵成,黄立华,凌丽青,等. 渗透性纸张上潜在指纹检测技术研究[J]. 中国激光,2018,45(7):138-146.
ZHAO CH, HUANG L H, LING L Q, et al. Detection of latent fingerprints on porous papers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 138-146.
- [37] 张玉新. 荧光光度法直接测定环境水中十二烷基苯磺酸钠[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1991, 14(3):236-238.
ZHANG Y X. The spectrofluorometric determination of sodium dodecylbenzene sulfonate concentration in environmental water [J]. Journal of Liaoning Normal University(Natural Science), 1991, 14(3): 236-238.
- [38] 王帆,陈建国,高跃明,等. LED 诱导与 CCD 采集的基因芯片扫描仪设计[J]. 电子测量与仪器学报,2018, 32(5):68-73.
WANG F, CHEN J G, GAO Y M, et al. Design of gene chip scanner based on LED induction and CCD collection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5): 68-73.
- [39] 涂俊超,张丽艳. 视觉辅助下的激光振镜模型参数分步标定[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):236-247.
TU J CH, ZHANG L Y. Two-step parameter calibration for galvanometric laser scanners using binocular stereo vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 236-247.

作者简介



凌丽青,2006年于长春理工大学获得学士学位,2009年于中国科学院研究生院获得硕士学位,现为中科院上海光学精密机械研究所工程师,主要研究方向为光电检测技术及应用。

E-mail: lingliqing@siom.ac.cn

Ling Liqing received her B.Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2006, and received her M.Sc. degree from Graduate School of the Chinese Academy of Sciences in 2009. She is currently an engineer at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include photoelectric detection technology and application.



黄立华(通信作者),2003年于华中科技大学获得硕士学位,2009年于中国科学院研究生院获得博士学位,现任中科院上海光学精密机械研究所研究员,主要研究方向为光学痕迹探测技术和光刻机控制技术。

E-mail: hlh@siom.ac.cn

Huang Lihua (Corresponding author) received her M.Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2003, and received her Ph.D. degree from Graduate School of the Chinese Academy of Sciences in 2009. She is currently a researcher at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include optical trace detection technology and control technology of lithography machine.