

新型紫外光致发光图像高速采集装置的研制 及其在筛分天然钻石中的应用

梁 榕¹, 兰 延^{1,2}, 高 孔¹, 张小虎¹, 陈慕雨¹, 王鸿浩¹, 陆太进³

(1. 珠宝玉石首饰国检集团深圳研究所有限公司, 广东 深圳 518020; 2. 国检中心深圳实验室有限公司, 广东 深圳 518020; 3. 国家珠宝玉石首饰检验集团有限公司, 北京 100013)

摘要: 为了提高批量小颗粒钻石的筛查效率和准确性, 研制了一种新型紫外光致发光图像高速采集装置——珠宝首饰观察鉴定仪(DDO), 通过对激发光波长、工业相机等的选用和结构设计技术突破, 以及对发光现象采集方式进行创新, 实现了批量观察不同宝石间的光致发光现象和发光延迟现象差异等, 从而实现对宝石高效检测。对 20 000 粒以上无色天然钻石、合成钻石和钻石相似品进行的 DDO 测试结果表明, 98%~99% 的无色天然钻石在紫外光激发光停止后的 0.1~10 ms 内可观察到的碧蓝色磷光现象, 为天然钻石典型特征, 合成钻石和其他无色宝石的发光特征(发光颜色、强度、持续时间、结构分区)明显区别于天然钻石, 由此建立了一种通过观测包括荧光、衰减时间在 100 ms 内的连续发光(磷光)特征差异性作为筛分条件快速、准确筛分无色天然钻石的新方法。本装置提高了钻石鉴定的准确度和检测效率, 对天然钻石的筛查通过率可高达 99%, 对合成钻石和仿钻石的筛查准确性可达 100%。

关键词: 珠宝首饰观察鉴定仪(DDO); 钻石; 荧光; 磷光

中图分类号: P619.241

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)03-0592-07

Development of a new ultraviolet photoluminescence image high-speed acquisition device and its application in screening natural diamonds

LIANG Rong¹, LAN Yan^{1,2}, GAO Kong¹, ZHANG Xiao-hu¹, CHEN Mu-yu¹, WANG Hong-hao¹ and LU Tai-jin³

(1. NGTC Gems & Jewelry Institute of Shenzhen Co., Ltd., Shenzhen 518020, China; 2. National Gemstone Testing Center Shenzhen LabCo., Ltd., Shenzhen 518020, China; 3. National Gems & Jewelry Testing Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to improve the screening efficiency and accuracy of batch small particle diamonds, this paper developed a new type of ultraviolet photoluminescence image high-speed acquisition device—jewelry observation and identification instrument (DDO). Through the selection of excitation light source, industrial camera, structural design technology breakthroughs, and innovation in the collection method of luminescence phenomena, it achieved batch observation of photoluminescence phenomena and luminescence delay differences between different gemstones, thereby achieving efficient detection of gemstones. The DDO test results on over 20 000 colorless natural diamonds, synthetic diamonds, and imitation diamonds show that 98% to 99% of colorless natural diamonds exhibit a blue phosphorescence phenomenon within 0.1~10 ms after the cessation of ultraviolet light excitation, which is a typical feature of natural diamonds. The luminescence characteristics (luminescence color, intensity, duration, structural zoning) of synthetic diamonds and other colorless gemstones are significantly different from natural diamonds. Therefore, a new method for rapid and accurate screening of colorless natural diamonds is established by observing the differences in continuous luminescence (phosphorescence) characteristics, including fluorescence and decay

收稿日期: 2024-01-18; 接受日期: 2024-03-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42073008); NGTC 科研基金项目(20210700-2, NGTC2019002)

作者简介: 梁 榕(1987-)女, 硕士, 副高级工程师, 主要从事珠宝玉石的检测及仪器研发研究, E-mail: liang_rong107@126.com。

time within 100 ms, as screening conditions. This device improves the accuracy and detection efficiency of diamond identification, with a screening pass rate of up to 99% for natural diamonds and 100% for synthetic and imitation diamonds.

Key words: jewelry determining observation system (DDO); diamond; fluorescence; phosphorescence

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42073008); NGTC Research Fund Project (20210700-2, NGTC2019002)

我国是世界上工业级合成金刚石的主要生产国之一,在合成钻石产量上同样占据全球的主导地位,2018年中国宝石级合成钻石产量已达到500万克拉,小颗粒无色合成钻石的产出量更是达到全球的90%(Lu *et al.*, 2019)。目前合成钻石已经形成上游毛坯生产→中游毛坯加工、成品镶嵌→终端销售等完整的合成钻石产业链。由于切割小颗粒天然钻石的工厂也参与切割合成钻石,造成小颗粒合成钻石频繁出现混入在天然钻石中。2012年,国家珠宝玉石质量检验检测中心(NGTC)首次在国内珠宝首饰中发现了无色CVD合成钻石(Song *et al.*, 2012)。2015年,NGTC、美国宝石研究院(GIA)等相继在钻石首饰中检测到小颗粒无色HTHP合成钻石(兰延等, 2015; Wasura and Piradee, 2015)。这之后,在批量钻石裸石和镶嵌饰品中混有合成钻石的情况成为普遍现象。同时,近年多家企业在采购的小颗粒天然钻石中不但发现混有合成钻石,还有合成立方氧化锆、合成碳化硅(莫桑石)等仿钻石,这极大地增加了钻石排查鉴定难度。如何有效、快速筛分小颗粒天然钻石与合成钻石、仿钻石,是当前国内外宝石学研究领域的重点和难点问题。

实验室鉴定钻石采用筛选法,对钻石利用紫外-可见-近红外吸收光谱、红外吸收光谱、光致发光光谱、发光特征和生长结构发光图像等测试手段逐步筛选、鉴定(张蓓莉等, 2012; Sally *et al.*, 2017; 梁榕等, 2019; 杨池玉等, 2021)。然而光谱类仪器对样品大小和形状有一定的要求,对于小于0.03 ct的样品由于仪器分辨率不足、样品返回信号弱等难以取得有效测试。因此,通常小颗粒的钻石优先利用发光性检测设备进行初次筛查。用于观察钻石荧光特征、磷光特征或生长结构特征的仪器,主要包括宽频诱导发光性测试仪、钻石观察仪(Diamond-View™)和阴极发光仪(张蓓莉等, 2012; 兰延等, 2016)等。然而,DiamondView™和阴极发光仪的测试舱空间较小,需逐粒测试样品,操作复杂,不适用于对大批量和镶嵌钻石样品的初次筛查。宽频诱导发光性测试仪等近年批量小颗粒钻石筛查的主流设

备,是通过肉眼观察钻石的荧光和衰减时间较长的磷光现象,对天然钻石和合成钻石进行区分。但他们对天然钻石的筛查通过率只有95%~97%,对于荧光较弱以及非蓝白荧光的天然钻石由于无法与合成钻石区分开,因此无法通过检验。日积月累,许多企业积压了数百至数千克拉的异常荧光的天然钻石无法有效利用,造成了资源浪费和经济损失。

针对行业内筛分天然钻石遇到的难题,本文设计了一种新型的紫外光致发光图像高速采集装置-DDO珠宝首饰观察鉴定仪(专利号CN216747403U),可以同时观察多个样品的在深紫外光源激发下的荧光以及光源停止后延时在100 ms内的短暂或持续的发光现象(包括发光颜色、强度、持续时间、结构分区),并可对图像进行放大、采集。通过对大量无色天然钻石、HPHT合成钻石、CVD合成钻石和仿钻石样品被光源激发后在不同延时时间下测试观察,分析它们之间的差别,从而建立一种以荧光、衰减时间在100 ms内的连续发光特征差异性作为筛分条件,快速、准确筛分无色小颗粒(最小为0.002 ct)天然钻石的新分析方法。

1 仪器的工作原理和结构

1.1 仪器的工作原理

珠宝首饰观察鉴定仪(DDO,图1)采用高能紫外光源,经二向色镜的滤光作用后获得波长为180~230 nm紫外光,用于激发宝石发光。人眼对光的反应时间平均为225 ms,为观察到衰减时间小于肉眼反应时间的光致发光现象,设备通过程序控制光源信号和工业相机采集信号,当激发光照射宝石时相机同步采集宝石的荧光图像,当激发光照射停止后相机延时采集衰减时间小于100 ms的宝石磷光图像,由此观察到宝石的更短衰减时间发光特征。

1.2 仪器结构设计

DDO珠宝首饰观察鉴定仪(专利号CN216747403U,图1)主要由激发光模块、波段分选模块、图像采集模块、控制模块、样品台以及升降系

统等组成,其结构如图2所示。激发光模块固定于仪器侧面,波段分选模块在激发光模块前端,波段分选模块利用二向色镜对光源进行分选,以获得有效激发样品的最优激发波长和宽范围的光斑照射。图像采集模块包含相机和镜头设置于样品台上方,并都固定在升降机构上,由控制模块将激发光模块和

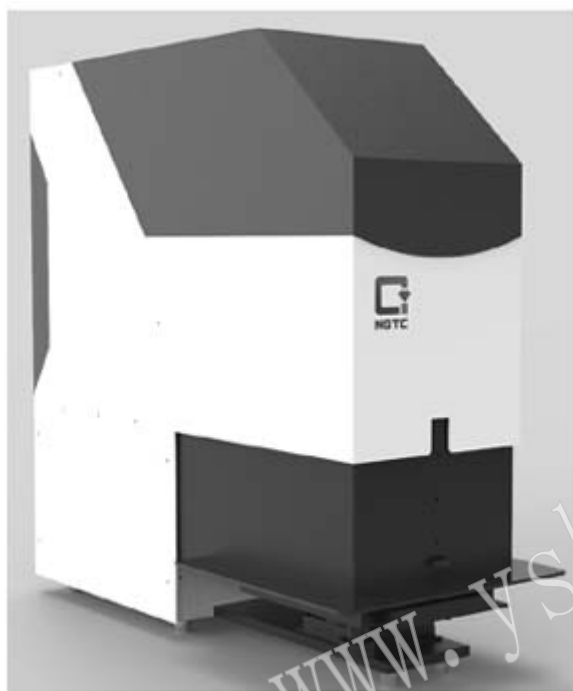


图1 DDO珠宝首饰观察鉴定仪
Fig. 1 Jewelry determining observation system (DDO)

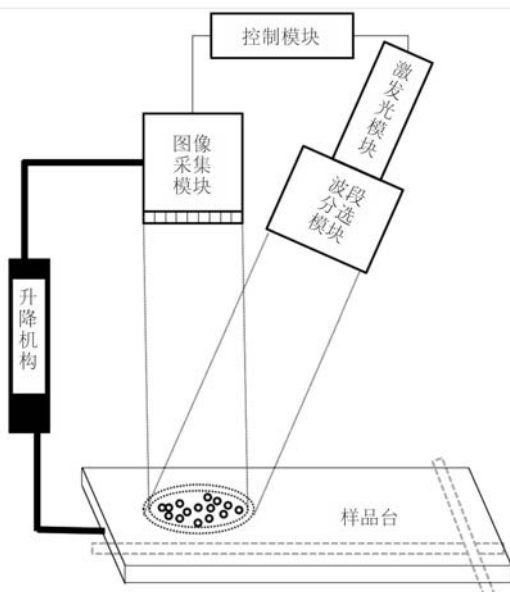


图2 DDO珠宝首饰观察鉴定仪结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the structure of jewelry determining observation system

图像采集模块进行电性连接,升降机构可控制调节图像采集模块与样品台之间的距离,样品台周围设置有可上下提拉的遮光罩。测试时将宝石放在样品台上,关闭遮光罩,通过调节升降机构使得图像采集模块的视场成像区域位于样品上,激发光透过波段分选模块后照射在宝石上,通过控制模块发出指令控制光源信号和图像采集信号,实现光源激发样品时的荧光现象采集,和光源激发停止后样品发射光持续时间小于100 ms的磷光现象快速采集。

2 关键技术及创新点

该仪器能同时观测多个样品被光源激发后衰减时间小于100 ms,尤其是在0.1~10 ms发光的特征(发光颜色、发光强度、衰减曲线),这是目前国内同类设备所不具备的技术,实现该功能主要解决了以下关键技术。

采用180~230 nm的高能紫外激发光源经过波段分选模块中的二向色镜对波段进行分选,并使得照射到样品台的光强度均匀、辐照范围广(40 mm×25 mm),并且激发波段可有效激发钻石、刚玉、祖母绿、翡翠等宝石发光,适用于各种宝石的紫外光激发发光特征的观察。

采用高速工业相机,程序控制光源的激发时间和相机的采集时间,使得仪器可以连续观察宝石在光源激发时,以及光源激发停止后时间小于100 ms内的发光现象。此技术在目前国产光致发光观察设备中为首创,国产其他可观察磷光的设备均是肉眼观察激发光停止后225 ms以上的发光现象。

大样品的发光性测试,是珠宝检测的难点和瓶颈所在,该设备对机械结构进行了创新,通过升降机构扩大设备的图像采集模块的上下运动幅度,使得可测样品高度范围扩大;采用三面开放式的上下拉门设计,形成无障碍测试空间,方便人工操作取放样品,由此实现了国内首个可以测试超大件首饰,包括戒指、手镯、项圈等全部镶嵌款式和裸石的光致发光现象采集设备。

综上所述,DDO珠宝首饰观察鉴定仪在具备传统紫外激发荧光设备的荧光和长磷光观测功能的基础上,DDO珠宝首饰观察鉴定仪利用程序控制光源和工业相机,实现了宝石小于100 ms,尤其是0.1~10 ms短暂的磷光现象的实时持续观察,这在国内外宝石矿物发光性观测设备中属领先水平。在结构设

计和测试方式方面,鉴于国内外的发光性测量设备由于光源光斑辐照范围和测试舱体积都较小,仅能检测单个小颗粒样品,因此 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪通过扩大激发光源辐照范围(40 mm×25 mm)和采用可移动的二维平台(80 mm×80 mm),实现了可同时测试 200 粒约 0.01 ct/粒的钻石样品或者手镯、项

圈等较大体积的复杂镶嵌饰品,并通过机械控制样品台左右移动,可以实现每天 4 万多粒裸石样品(最小为 0.002 ct)的快速检测效率(表 1)。另外,通过特制的定位样品盘和软件图像采集定位,可快速、准确将其中的疑似合成钻石、仿钻石样品挑选出来,并可进一步对样品的生长结构图像特征放大观察鉴定。

表 1 常见紫外光致发光现象观察设备功能对比表
Table 1 Function comparison of UV-excited photoluminescence observation equipments

	珠宝首饰观察鉴定仪	宽频诱导发光性测试仪	钻石观察仪
功能模式	荧光、短暂磷光、较长持续磷光	荧光、较长持续磷光	荧光、较长持续磷光
天然钻石通过率	99%	96%~97%	99%
准确性	100%	100%	100%
样品类型	多个裸石、戒指、手镯、项圈等各种款式	多个裸石、戒指、手镯等	单个裸石、戒指等小饰品
检测通过效率	约 40 000 粒/天	约 39 000 粒/天	约 400 粒/天

3 DDO 在筛分天然钻石中的应用

3.1 实验部分

实验样品包括 10 000 粒质量在 0.003~0.300 ct 之间的无色天然钻石,以及 NGTC 近年收集的 8 000 粒质量在 0.003~0.500 ct 之间的无色 HPHT 合成钻石、2 000 粒质量在 0.003~1.000 ct 之间的无色 CVD 合成钻石、5 000 粒合成立方氧化锆,以及 2 000 粒碳化硅(莫桑石)。这些样品包括有镶嵌饰品以及裸石。天然钻石以及合成钻石样品的颜色级别均在 D~K 之间,净度级别为 VVS~SI。部分天然钻石可见矿物包裹体及羽状裂隙,HPHT 合成钻石通常可见金属触媒包裹体,CVD 合成钻石通常可见黑色无定型碳、石墨包裹体,由于这些包裹体在外观上没有十分明显的区别,因此,单凭肉眼无法将天然钻石与合成钻石区分开;合成立方氧化锆和莫桑石虽然可通过放大观察与钻石相区分,但是它们一旦被挟夹在批量小颗粒钻石中时,会给检测带来极大的困难。

测试方法:① 使用 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪观测天然钻石、HPHT 合成钻石、CVD 合成钻石、合成立方氧化锆、莫桑石样品在不同衰减时间下的发光特征,并对所有测试结果进行统计,分析钻石、合成钻石、仿钻石在发光特征上的差异,论证设备的可靠性;② 在相同实验环境下对同一个样品连续观测 10 次,并采集图像进行对比,测试设备的重复性;③ 每周用同一台设备对同一个样品进行观察,连续观测 10 周,并采集图像进行对比,测试设备的稳

定性;④ 用 3 台 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪对上述样品进行测试,观察对比同个样品在 3 台设备中的发光现象是否相同,测试设备的一致性。

3.2 分析结果

3.2.1 DDO 对天然钻石的测量结果

在 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪的激发光源照射下,10 000 粒天然钻石中,98%为蓝白色荧光,1.5%为绿、蓝夹绿色荧光,0.5%为蓝紫色、黄色荧光等(图 3a),部分大颗粒样品可观察到天然的生长结构。

98%具蓝白荧光的天然钻石以及 70%具绿色荧光的天然钻石在激发光停止后的 10 ms 内,相机可捕捉到碧蓝色的磷光现象(图 3b),并随着延时时间增加发光现象快速减弱;少量非蓝白荧光的天然钻石在激发光停止的 10 ms 内依然呈现绿色、黄色、暗黄色等发光。

绝大部分天然钻石在光源停止激发的 100 ms 后观察不到磷光(图 3c),少量钻石可观察到中-弱的较长磷光(衰减时间大于 100 ms)现象。

3.2.2 DDO 对合成钻石的测量结果

对于 HPHT 合成钻石,8 000 粒样品都显示强-极强的绿色荧光(图 3a),部分样品可见典型的立方八面体生长结构。需特别指出的是,当紫外光源停止激发的 100 ms 后,HPHT 合成钻石均有极强长磷光现象(图 3c),并且发射光的持续时间可达 3 s 以上。

在 2 000 粒 CVD 合成钻石样品,有 98%CVD 合成钻石样品显示强的绿色荧光,2%发出中-强红色、紫红、黄色、蓝紫色或分层的 2~3 种颜色荧光(图 3a),

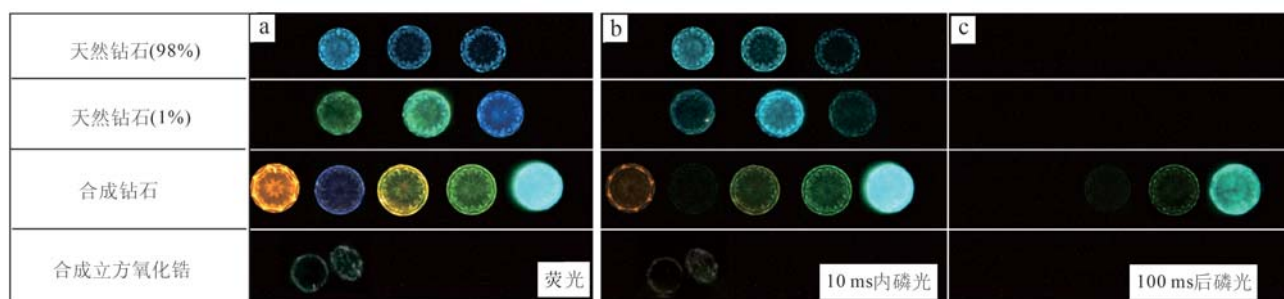


图 3 利用 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪观察到的无色天然钻石、合成钻石和合成立方氧化锆的发光图像

Fig. 3 Images of colorless natural diamonds, synthetic diamonds, and synthetic cubic zirconia observed with a DDO jewelry determining observation system

部分样品可见典型的层状生长结构。

99% 的 CVD 合成钻石,在激发光停止后的 10 ms 内,可观察到明显的绿-草绿色的磷光现象(图 3b),1% 的少量红色、紫色荧光的 CVD 合成钻石在激发光停止后,发射光衰减很快,甚至可小于 1 ms。

几乎所有具绿色荧光的 CVD 合成钻石在激发光停止后,发射光持续时间较长(大于 100 ms),部分样品可达到 2 s,磷光强度强至弱(图 3c)。

3.2.3 DDO 对仿钻石测量结果

在 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪的激发光源照射下,5 000 粒合成立方氧化锆均显示中等-弱的绿色荧光(图 3a);在激发光停止后,发射光衰减时间较短,通常小于 1 ms,并呈现肉粉色的极短暂磷光现象(图 3b)。2 000 粒莫桑石在 DDO 的激发光源照射下为惰性,即便将相机增益调到最大均观察不到发光现象。

3.2.4 设备的重复性、稳定性、一致性

在相同实验环境下,对同样的天然钻石、高温高压合成钻石、CVD 合成钻石、合成立方氧化锆、合成碳化硅样品进行观察 10 次,同个样品发光现象测试结果前后一致,表明测试设备的重复性良好。

每周一用同一台 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪对同一个样品进行观察,连续观测 10 周,同个样品发光现象测试结果 10 周内前后一致,测试设备稳定性良好。

利用 3 台 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪对相同样品进行测试的发光现象相同,表明设备间的一致性良好。

3.3 分析与讨论

天然钻石呈现的蓝色荧光通常与晶体结构中的

N3 缺陷有关,自然界大于 95% 的天然钻石具有 N3 缺陷有关的发光特征(Zaitsev, 2001; Breeding and Shigley, 2009; 张蓓莉等, 2012),这与 DDO 珠宝首饰观察鉴定仪检测到 98% 的天然钻石具有蓝色荧光的结果一致。蓝色荧光是 IaAB 型天然钻石的典型特征,因为氮的聚合需要一定温度、压力下长时间的作用,无色合成钻石的形成时间较短,无法使晶格中的氮完全发生聚合,未经处理的合成钻石中往往不含氮或仅含少量单氮,不具有与 N3 缺陷有关的蓝色荧光特征。少量天然钻石呈现的绿色、红色、紫色等荧光可能与晶体结构中的 H3 缺陷、NV⁰ 缺陷以及结构位错等缺陷等有关,较难从发光颜色上与合成钻石区分。

大量样品测试结果显示,约 98%~99% 的天然钻石在激发光源关闭后 10 ms 内可观察到的碧蓝色发光是天然钻石的典型特征(图 3b),该磷光现象可能与天然钻石中的晶格缺陷有关。同时天然钻石的磷光衰减速度较快,绝大部分在激光关闭 100 ms 后观察不到发光现象,这与大多数合成钻石的绿色长时间持续的发光现象不同。

未经过后期处理的无色 CVD 合成钻石,往往呈红色、紫红色、蓝紫色荧光,并且发射光衰减时间很短,甚至小于 1 ms,短于天然钻石。而对于带褐色调的 CVD 合成钻石经过高温高压处理后可去除褐色,并有少量氮原子发生聚合,形成 H3 缺陷(由 2 个氮原子和 1 个空位组成 [N-V-N]⁰),产生绿色荧光和磷光(Wang *et al.*, 2012; Shigley and Breeding, 2013),并且在激光停止 100 ms 后依然可以发光。

常用于仿钻石的立方氧化锆和莫桑石的晶体结构和成分特征与钻石截然不同,因此发光特征也与钻石有明显差别。合成立方氧化锆被激发后的发射

光衰减时间较短,通常小于1 ms,并呈现独特的肉粉色。莫桑石在激发光源照射下为惰性,观察不到发光现象。

综上所述,由于无色天然钻石和合成钻石、仿钻石在生长环境上存在明显差异,它们晶体内部缺陷也存在明显差别,因此产生了截然不同的发光现象。根据钻石受光源激发出荧光和不同衰减时间磷光的特征(颜色、强度、持续时间等)差异对比分析,无色天然钻石中98%显示蓝白色荧光和1%显示其他颜色荧光(图3a),在停止激发的10 ms内可观察到碧蓝色磷光(图3b),100 ms后观察不到磷光(图3c);合成钻石、合成立方氧化锆为非蓝白色的其他各种颜色荧光(图3a),在停止激发的10 ms内可观察到非碧蓝色的其他颜色磷光或观察不到磷光(图3b),100 ms后合成立方氧化锆以及部分合成钻石观察不到磷光(图3c),绝大部分合成钻石可观察到强-弱的磷光(图3c),由此得到利用DDO珠宝首饰观察鉴定仪筛分天然钻石的方法:①可将典型蓝白荧光且激光关闭100 ms后观察不到磷光现象作为天然钻石的鉴别依据;②可将激发光源关闭后10 ms内观察到的碧蓝色磷光作为天然钻石的鉴别依据(图4);③具其他颜色的短或长时间衰减磷光的样品,作为疑似非天然钻石筛查出来进行进一步其他仪器检测。由此,DDO珠宝首饰观察鉴定仪可将99%以上的天然钻石与合成钻石、仿钻石区分开(图4)。与传统的发光性设备相比,DDO珠宝首饰观察鉴定仪提高了天然钻石的检测通过率,剩下的1%的钻石

可作为疑难样品进行光致发光光谱、红外光谱等综合测试。

4 结论

新型紫外光致发光高速采集仪(DDO珠宝首饰观察鉴定仪)可以连续观察到钻石微秒至毫秒级衰减的发射光,包括荧光和磷光,实现同时、快速、准确地检测大批量的(最小为0.002 ct)钻石裸石以及较大体积的镶嵌饰品,为钻石鉴定提供了新的检测手段,解决了99%的天然钻石批量筛选的问题。经过试验和实际应用,研制的DDO珠宝首饰观察鉴定仪具有良好的重复性、稳定性和一致性。

应用DDO珠宝首饰观察鉴定仪,以无色天然钻石和合成钻石、仿钻石之间的荧光和不同衰减时间的磷光特征(发光颜色、强度、持续时间、结构分区)差异性作为筛查条件,对天然钻石的筛查通过率可达99%,对合成钻石与仿钻石的筛查准确性可达100%,并避免了样品形状、大小的影响,有效实现了快速检测各种款式的无色钻石饰品。该仪器已经被作为天然钻石的初次排查检测工具运用到实际的企业和实验室检测工作中,并取得了良好应用效果,对于解决当前钻石危机有着重要的意义。同时,本仪器也可对其他宝石、矿物品种的微秒至毫秒级衰减磷光测试方面做进一步拓展性研究工作,扩展仪器应用范围。

References

- Breeding C M and Shigley J E. 2009. The "type" classification system of diamonds and its importance in gemology [J]. *Gems & Gemology*, 45(2): 96~111.
- Lan Yan, Liang Rong, Lu Taijin, *et al.* 2015. Identification characteristic of near-colourless Melee-sized HPHT synthetic diamond in Chinese jewelry market[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 17(5): 12~17(in Chinese).
- Lan Yan, Lu Taijin, Zhang Congsen, *et al.* 2016. Development of a new multi-spectral induced luminescence imaging system (GV5000) and its application in screening Melee-sized near-colorless synthetic diamonds and natural diamond [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(5): 505~512(in Chinese).
- Liang Rong, Lan Yan, Zhang Tianyang, *et al.* 2019. Multi-spectroscopy studies on large grained HPHT synthetic diamonds from Shandong,

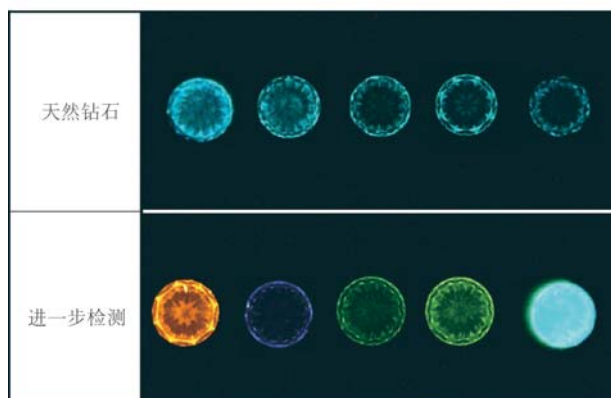


图4 利用DDO珠宝首饰观察鉴定仪观测到的无色样品较短时间衰减磷光特征

Fig. 4 Short time decay phosphorescence characteristics of colorless samples observed using DDO jewelry determining observation system

- China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 39(6): 1 840~1 845(in Chinese).
- Lu T J, Ke J, Lan Y, *et al.* 2019. Current status of Chinese synthetic diamonds[J]. The Journal of Gemmology, 36(8): 642~651.
- Sally E M, James E and Christopher M B. 2017. Observations on HPHT-grown synthetic diamonds: A review [J]. Gems & Gemology, 53(3): 262~285.
- Shigley J E and Breeding C M. 2013. Optical defects in diamond: A quick reference chart[J]. Gems & Gemology, 49(2): 107~111.
- Song Z H, Lu T J, Lan Y, *et al.* 2012. The identification features of undisclosed loose and mounted CVD synthetic diamonds which have appeared recently in the China gem market[J]. The Journal of Gemmology, 33(1~4): 45~48.
- Wang W, D'haenens-Johansson U F S, Johnson P, *et al.* 2012. CVD synthetic diamonds from gemsis corp [J]. Gems & Gemology, 48(2): 80~97.
- Wasura S and Piradee S. 2015. Near-colorless Melee-sized HPHT synthetic diamonds identified in GIA laboratory[J]. Gems & Gemology, 51(2): 183~184.
- Yang Chiyu, Lu Taijin, Zhang Jian, *et al.* 2021. Spectral characteristics and electrical-magnetic properties of gem quality synthetic diamonds under high temperature and pressure[J]. Rock and Mineral Analysis, 40(2): 217~226(in Chinese with English abstract).
- Zaitsev A M. 2001. Optical Properties of Diamond Data Handbook[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 320.
- Zhang Beili and Wang Manjun. 2012. Systematic Gemmology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 54, 88~90, 110, 128~130, 132~135 (in Chinese).

附中文参考文献

- 兰 延, 梁 榕, 陆太进, 等. 2015. 国内市场小颗粒无色高温高压合成钻石的鉴定特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 17(5): 12~17.
- 兰 延, 陆太进, 张丛森, 等. 2016. 新型 GV5000 宽频诱导发光测试仪的研制及其应用于筛分无色小颗粒合成钻石和天然钻石[J]. 岩矿测试, 35(5): 505~512.
- 梁 榕, 兰 延, 张天阳, 等. 2019. 山东产大颗粒高温高压合成钻石的多种谱学方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 39(6): 1 840~1 845.
- 杨池玉, 陆太进, 张 健, 等. 2021. 河南产宝石级高温高压合成钻石的谱学特征及电磁性研究[J]. 岩矿测试, 40(2): 217~226.
- 张蓓莉, 王曼君. 2012. 系统宝石学[M]. 北京: 地质出版社, 54, 88~90, 110, 128~130, 132~135.