LAM 不用抛光，桌面3D打印机做出光学级透镜

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42983.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

LAM 不用抛光，桌面3D打印机做出光学级透镜。 导读

随着光学成像与传感系统向小型化、高集成度发展，自由曲面光学元件——表面非对称、不具旋转对称性的一类元件——因能灵活调控光传播、压缩系统体积而日益重要。但超精密加工、抛光、离子束处理等传统制造方法受材料兼容性、面型复杂度与成本所限，长期局限于专业实验室与高端工业；近年出现的激光直写等方案精度虽高，设备与环境门槛同样不低。

近日，德国联邦材料研究与测试研究所（BAM）J é r é my Bell 团队在 Light: Advanced Manufacturing发表题为 "Rapid fabrication of optical elements for sensing applications using a standard SLA printer" 的研究，给出了一条低成本路径：用一台消费级SLA（LCD）3D打印机，配合母树脂雾化涂覆与惰性气氛固化，让市售透明光敏树脂达到可用于荧光传感的光学质量——透过率最高约 90%、自发荧光极低、表面粗糙度降至数十纳米、折射率接近N-BK7玻璃。团队进一步在总石油烃试纸、泳池余氯微流控芯片与智能手机新冠 RNA 检测三套系统中完成验证：前两套以树脂透镜直接替换商用玻璃镜、性能持平，第三套则新设计了自由曲面透镜以增强读出。

一、雾化喷涂优化表面粗糙度

值得一提的是，整套流程的门槛很低：打印机是一台消费级LCD桌面机，六种树脂全部从网络零售平台购得，元件设计用开源软件FreeCAD完成，不依赖专业光学加工设备。而本工作的第一大创新，在于开发了一种简便且可重复的非磨损型微米级表面平滑后处理工艺，破解了3D打印光学元件因逐层堆叠产生的"台阶效应"这一核心痛点。微观分析显示，原始打印件整体呈现雾状外观，源自约50 μ m周期的打印层厚以及约2 μ m的光源微透镜阵列聚焦特征导致的表面散射。研究人员避开了两条常规路线的缺陷——无精密仪器时磨削抛光的重现性难以控制，且后续清漆涂层与基体折射率不匹配会引入额外的光学复杂性——直接采用相同的液态光聚合物母树脂，利用气动雾化技术喷出30 – 60
μ m的微液滴，从而在几何结构复杂的表面形成微米级的均匀涂层，填平了表面微观的不平整。

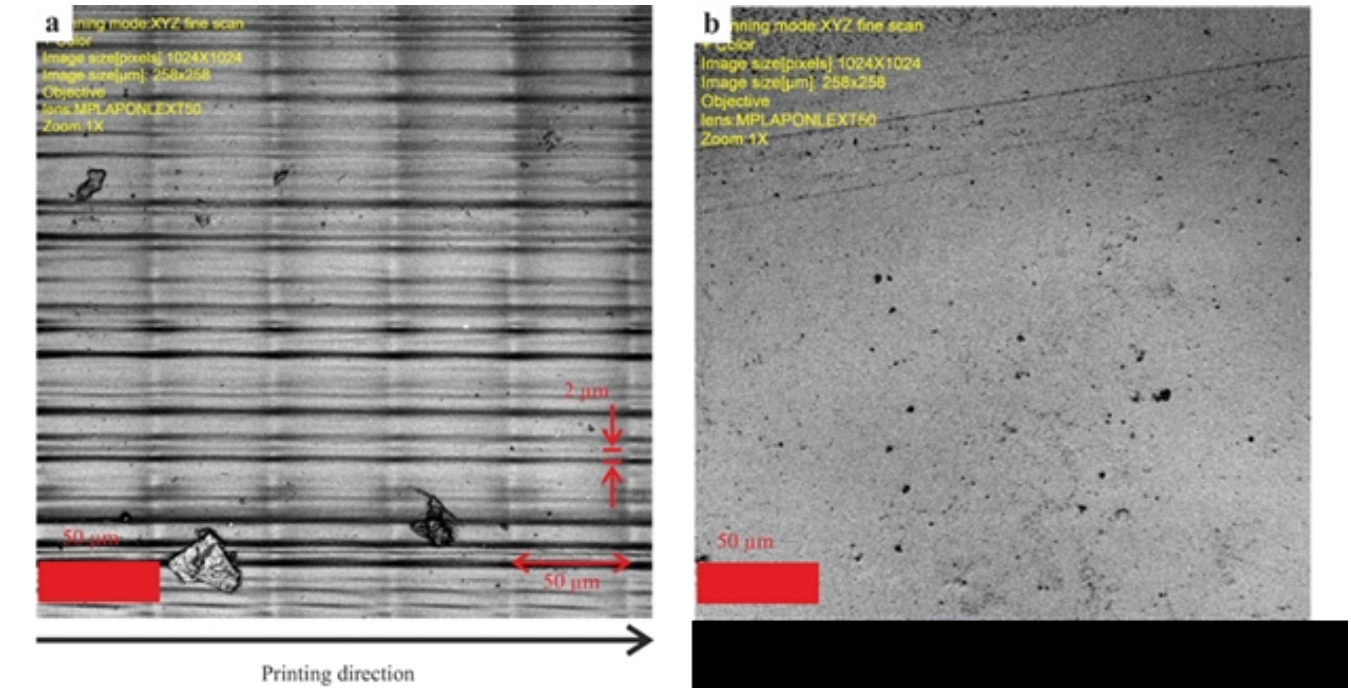


图1：激光共聚焦扫描图像观察3D打印矩形立方块表面。(a)直接打印；(b)雾化后处理

二、多维光学表征与惰性气氛固化工艺

工艺优化后，研究人员对六种市售透明树脂做了系统表征——表面粗糙度、透过率、自发荧光、折射率与长期稳定性，其中自发荧光与折射率针对表现较好的前五种。

表面与结构。经母树脂涂覆后，六种树脂的表面粗糙度均降至数十纳米量级（Ra 14 – 33 nm），已进入与激光抛光等更复杂后处理工艺可比的区间（文献中激光抛光聚合物所得粗糙度为0.12 – 0.61
μm，测试条件与评价参数不尽相同）。结构精度同样达标：打印件与数字设计的尺寸偏差约22 μm、中心区平行度4.3 ± 1.6 arcmin，平凸透镜实测曲率半径13.07 ± 0.05 mm（设计值 13.1 mm）——均落在商用聚合物光学件±10 – 50 μm、1 – 5 arcmin的常规容差之内。

透过率与惰性气氛固化。450 nm以上波段，前五种树脂的透过率达85%，已接近PMMA 与N-BK7玻璃的约90%；树脂6 则在500 nm以下不足80%，短波损耗明显。作者将空气中固化的透过率损失归因于氧抑制：氧与光引发剂作用生成失活的过氧自由基，或直接淬灭已生成的自由基；此外，部分光引发剂在长时间紫外照射下会断裂形成有色重组产物，导致黄变。据此，研究人员把后处理移入氮气或氩气氛中，效果立竿见影——固化时间由空气中的20 – 30 min缩短至1 min，表面也由脆弱转为坚实，黄变被显著抑制，前五种树脂的透过率最高可达90%（树脂6 是唯一例外，未见改善）。

自发荧光。 对荧光传感而言，材料自身的荧光背景比透过率更为关键。激发-发射矩阵（EEM）显示，树脂2在整个工作波段几乎不发光，树脂1与树脂3的荧光也较弱；而树脂4、树脂5荧光最强，发射集中在430 – 550 nm（激发410 – 440 nm），恰好落在多数荧光传感的读出窗口内。作者推测荧光主要来自光引发剂——多数光引发剂在蓝光区有较大的摩尔吸收系数，正对应LCD打印机405 nm的辐照波长；紫外区吸收的光稳定剂也可能有贡献。

折射率与长期稳定性。 前五种树脂在589 nm处的折射率为1.44 – 1.53，与PMMA、聚碳酸酯及N-BK7玻璃（约 1.5）接近，这意味着针对上述材料的既有光学设计可直接移植到该打印工艺上。在空气中避光常温存放两年后，所制备的样品在透过率与自发荧光两方面均仅出现轻微下降。

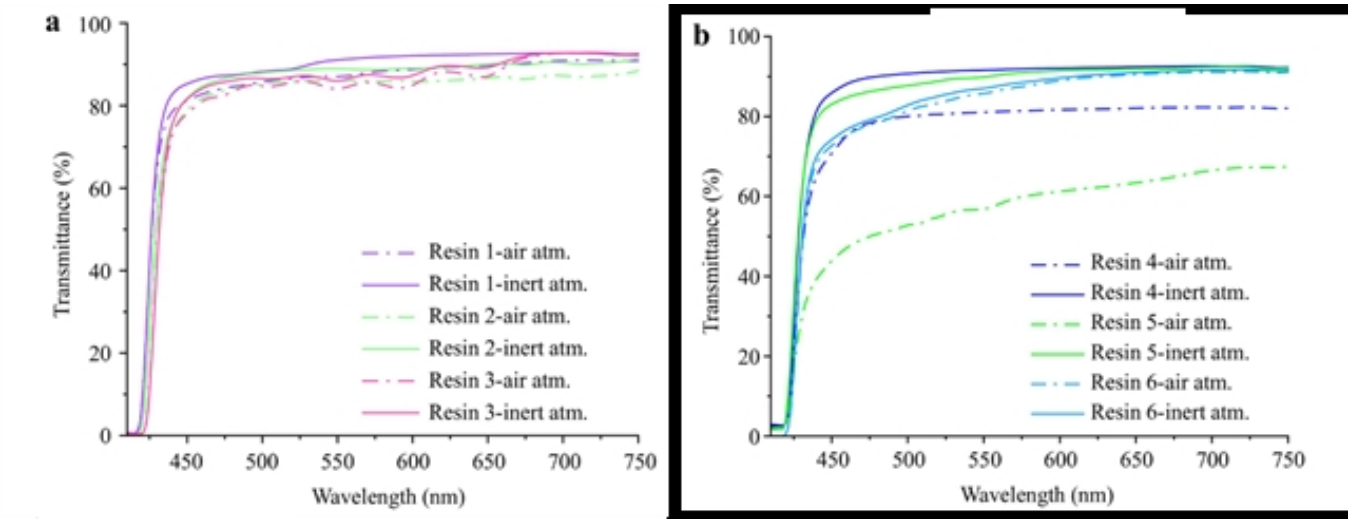


图2：在空气中和在惰性气体中完成后处理工艺的六种树脂透光光谱

三、从等效替代到按传感器定制光路

团队首先用树脂1复制了非球面聚光镜（Ø 25.4 mm）和两片平凸透镜（Ø 12.7 mm，f = 15 mm），将其分别嵌入烃类（总石油烃TPH）条带传感器和基于微流控芯片的泳池余氯实时监测装置。两套装置中，树脂透镜与商用玻璃透镜的标定曲线趋势一致、标准差相当；在余氯装置中，玻璃透镜的重复性误差甚至略高于树脂透镜，作者认为可能与玻璃更易收集环境杂散光有关。

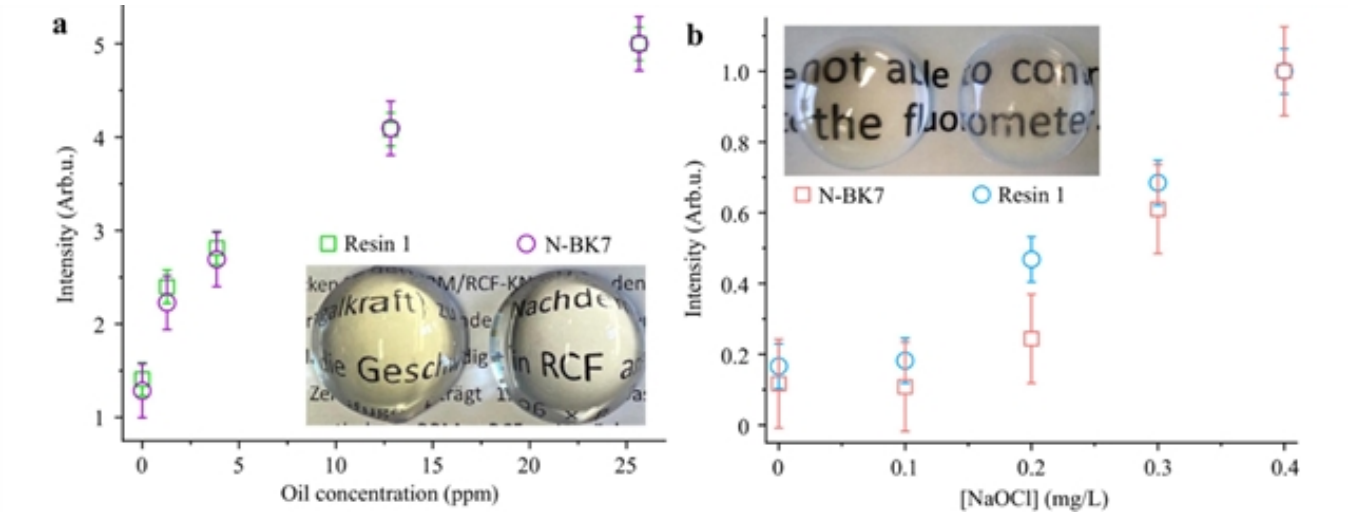


图3：两种微型分析装置采用树脂透镜和玻璃透镜的测试结果。(a)碳氢化合物检测；(b)水体含氯量检测

第三个案例则从替代走向重构。作者把一套原本用于燃油微生物污染检测的分子信标试纸改造为新冠病毒（SARS-CoV-2）RNA 检测：信标发夹环序列改为靶向RdRp-P1基因，一端标记 FAM

荧光团、另一端标记DABCYL淬灭剂；与之配套，为智能手机读出新设计并打印了三片自由曲面透镜。加入镜片后，互补RNA浓度升高时信号显著上升，OFF – ON拐点约为0.1 μM，而测量误差仍约4%，表明树脂透镜在增强信号收集、降低荧光可检出阈值的同时并未明显抬高噪声。需要说明的是，0.1 μM这一拐点由分子信标颗粒自身的响应决定，并非透镜性能的上限。作者也坦言，该灵敏度尚不足以直接检出唾液中的病毒RNA（约500 copies · μL? ^{1}），但与多数已报道的快检方法处于同一水平，配合适当轮次的PCR扩增，该智能手机光学装置即可用于感染者筛查。

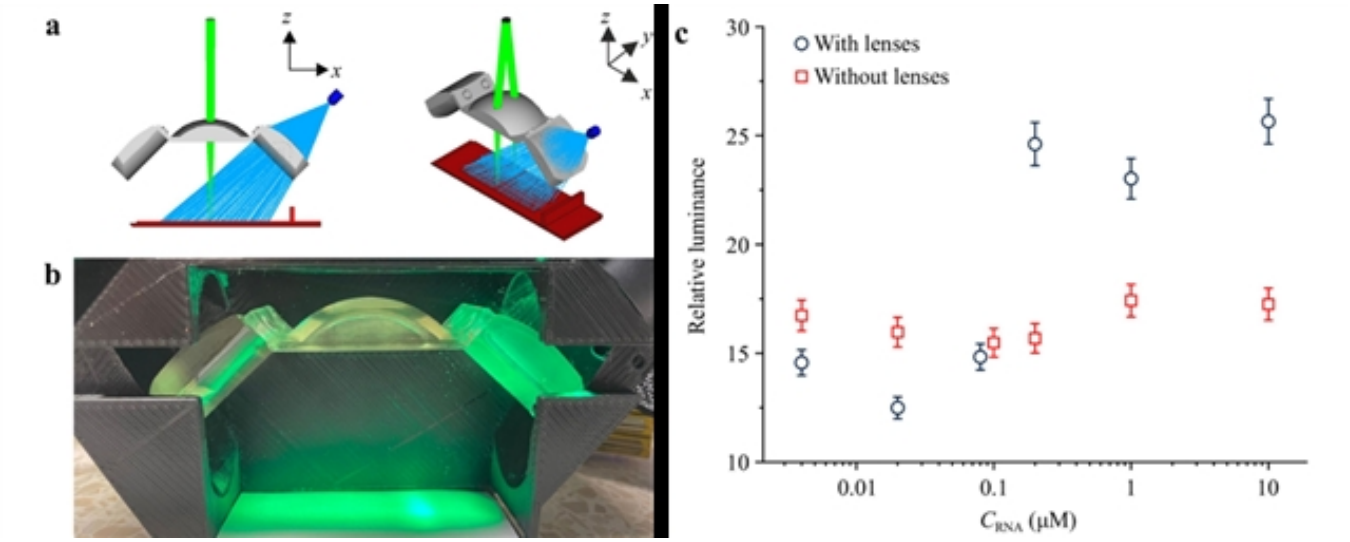


图4：智能手机检测平台的自由曲面光路与SARS-CoV-2 RNA检测响应曲线（黑色：装配三片自由曲面透镜；红色：无透镜）

四、总结与展望

标准SLA平台配合同材质覆层和惰性气氛后固化，可以快速制备具有较高透过率、低自发荧光、低表面粗糙度且折射率接近N-BK7的定制光学元件，并在三类荧光读出中完成验证：其中两套装置直接以树脂镜替换商用N-BK7玻璃镜，标定曲线与重复性均达到同等水平。这项研究把定制光学元件的制造门槛降到了普通实验室可及的水平。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.024

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Jeremy Bell等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发