arXiv:2303.02754v1 [physics.optics] 5 Mar 2023

关于将有机半导体用作光镊实验操作柄：捕获和操控聚苯胺（PANI）微粒

Kairon M. Oliveira*、Tiago A. Moura、Jana´ısa L. C. Lucas、Alvaro V. N. C. Teixeira、M´arcio S. Rocha 和 Joaquim B. S. Mendes**

摘要
本文提出使用有机半导体聚苯胺（PANI）制备球形微粒，作为光镊（OT）实验的操作柄。我们首次利用高斯（TEM_{00}）光束光镊，展示了对PANI微球的稳定捕获与操控。我们针对多种不同参数表征了陷阱刚度，包括微珠半径、激光功率以及微珠与样品室盖玻片之间的距离，证实了这种材料用于光学操控的可行性。由于PANI的有效光学性质可通过合成过程调节，本文还提出了相关的新应用。因此，本研究的结果为在OT应用中使用聚合物半导体材料打开了大门。

关键词
光镊 — 聚苯胺 — 粒子 — 半导体 — 导电聚合物 — 光学陷阱

维索萨联邦大学物理系，巴西米纳斯吉拉斯州维索萨，邮编*36570-900****通讯作者**：kairon.oliveira@ufv.br ****通讯作者**：joaquim.mendes@ufv.br

引言

利用光学捕获方法操控微米尺寸和纳米尺寸物体的技术，自 20 世纪 60 年代末 Arthur Ashkin 的开创性工作以来，推动了多个知识领域的革命 [5]。本文重点介绍一些主要应用，包括捕获单个病毒和细菌 [6], 、单细胞操控 [46], 、用于研究分子间相互作用的单分子力谱学[35, 1, 30] 以及微流变学 [18]。此外，过去十年间，光镊（OT）也成为牵引光束 [38], 、体积显示 [40], 、生物传感器 [36], 、微型马达 [10, 12],等新兴技术的基础 [31]。光镊应用范式的这一近期转变基于两大支柱：一是利用空间光调制器生成更复杂的捕获构型，从而能够产生冻结波等结构光束 [43]；二是新材料应用的兴起，这些材料使人们能够探索辐射与物质之间的其他类型相互作用，超越经典且研究充分的光学力（散射力和梯度力）。

近期，我们课题组发现，由拓扑绝缘体制成的微米级粒子在传统高斯（TEM_{00}）光束光镊的操控下，会呈现出非常有趣的振荡动力学。这种动力学可以通过改变一些简单的装置参数来调节，例如激光功率，或粒子与用于构建样品室的盖玻片之间的距离 [10]。在这项研究之后，人们也在半导体颗粒（锗 [12] 和硅 [28]）中观察到了类似行为，此外还发现了一个特点：在这种情况下，振荡取决于激光束的偏振方向。在半导体和拓扑绝缘体微球中观察到的这种振荡动力学，为光镊开辟了新的应用前景，例如用于微流变学研究，以及单分子热机 [9] 和微型马达 [32]的开发。

在这一视角下，开发其他类型的颗粒，使其光学性质能够在合成过程中加以调控，对于构建基于光学操控的新技术至关重要。尤其是在各种可用材料中，聚合物聚苯胺（PANI）是一个很好的选择，因为它的许多光学和导电参数（载流子密度、吸收系数、折射率、反射率等）都可以通过改变周围溶液的pH值来调控。事实上，改变pH值可以引起聚合物结构中化学键的变化，从而改变其氧化状态，并因此改变其碱性[8, 7]。此外，PANI成本低、易于合成，且比其他导电聚合物 [7], 更稳定；其性质可调，因此能够在适当的溶液中合成这种材料的微球，使这些微球甚至可以表现出半导体特{char-

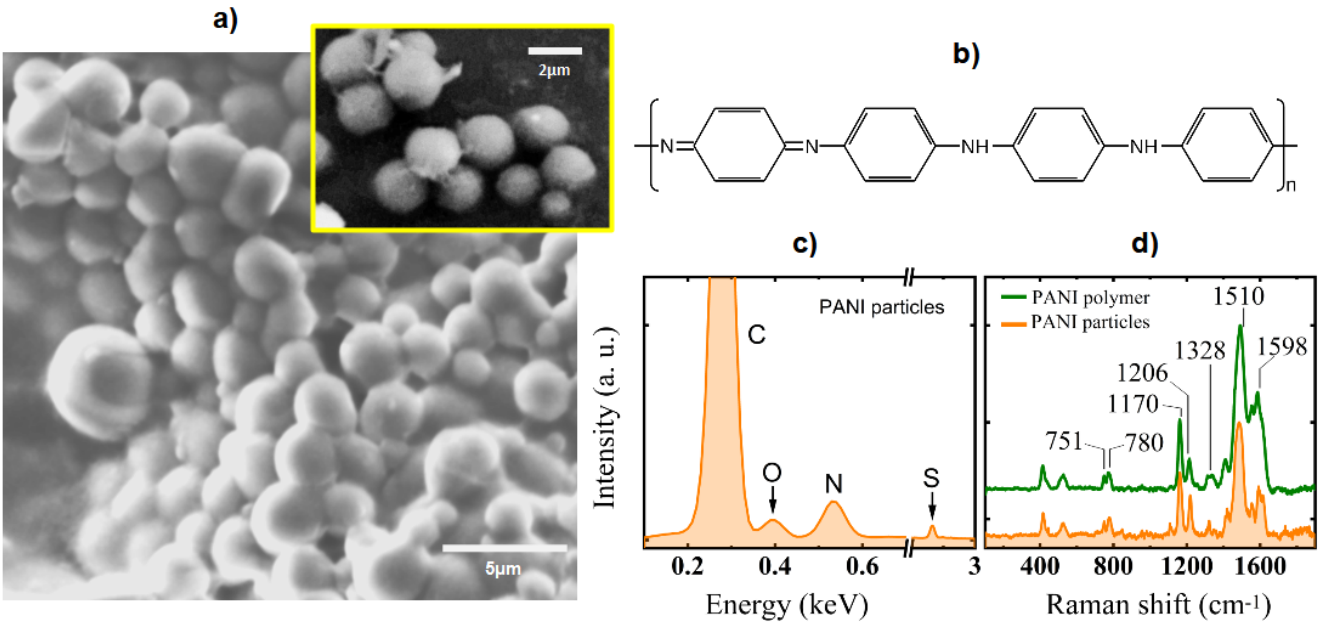

图1。（**a**）采用扫描电子显微镜（SEM）获得的合成PANI颗粒的典型图像。（**b**）PANI在pH值 = 14 下的分子结构，以及（**c**）采用能量色散光谱获得的PANI颗粒原子组分信号。（**d**）PANI颗粒和翠绿亚胺碱态PANI聚合物的拉曼光谱。

性 [13]。此外，PANI具有有趣的电子和光学性质，因此非常适合应用于电子学、光学、储能、环境科学、自旋电子学以及金属防腐等广泛领域 [37, 14, 45, 25, 24]。

PANI与稳定剂（如表面活性剂或其他聚合物）的结合可形成超分子结构，在不改变其电导率特性的情况下保护该聚合物免受介质降解。板状、棒状 [48], 管状 [42, 47],凝胶 [45],和粒子 [41, 33] 均为可利用PANI构建的结构实例。此外，通过单体苯胺的聚合反应可合成尺寸分散性低的聚苯胺粒子，通常在酸性介质中进行，并使用多种稳定剂，如聚乙烯醇（PVA）、聚乙烯吡咯烷酮（PVP）、胶体二氧化硅 [41, 33], 和十二烷基硫酸钠（SDS）[22]。

本研究中，我们以聚乙烯吡咯烷酮为稳定剂制备了球形 PANI颗粒，旨在提出将这种材料用于光镊实验。之所以使用聚乙烯吡咯烷酮，是因为与其他表面活性剂相比，它已被证明具有更高的效能 [41, 33]，这可能是由于其吡咯烷酮基团与聚苯胺之间具有良好的相互作用。我们表明，取决于合成参数，使用高斯光束光镊可以稳定地捕获和操控微米级 PANI颗粒。此外，我们还表征了陷阱刚度（κ）如何随若干重要参数变化：微珠半径、激光功率，以及在 pH值为 14 时的微珠高度（即微珠中心到样品室盖玻片的距离）。在不同条件下进行的测试表明，这一 pH值最适合本文所述实验，PANI微球呈现半导体特性，能够实现稳定捕获；此外，其尺寸也适宜，处于微米范围内，且不会发生明显聚集（在较低 pH值下聚集更常见）。事实上，在酸性 pH值下，由于材料的导电性增强、粒子易形成更大的聚集体，我们的装置无法实现稳定捕获。据我们所知，目前尚无关于 PANI 等有机半导体颗粒的光学捕获与操控的研究。因此，本研究通过明确展示这类材料用于光镊实验的可行性，推动了相关研究的发展。

材料与方法

PANI 微粒的合成与表征

我们的 PANI 粒子按照文献中先前报道的方法合成 [41, 33], , 具体步骤如下：将 2.5 mL、浓度为 1 M 的过硫酸铵（APS）水溶液缓慢加入 10 mL 水溶液中，该溶液含有 0.072 mM 聚乙烯吡咯烷酮（PVP）、0.26 M 苯胺和 97 mM 氯化氢。整个过程中，溶液都置于低光照环境中，并用铝箔包裹。温度维持在 0 °C。加入引发剂期间（1 小时），用磁力搅拌子搅拌溶液，之后继续搅拌 4 小时。2 小时后，可以观察到特征性的深绿色。从这一步起，样品静置 24 小时。

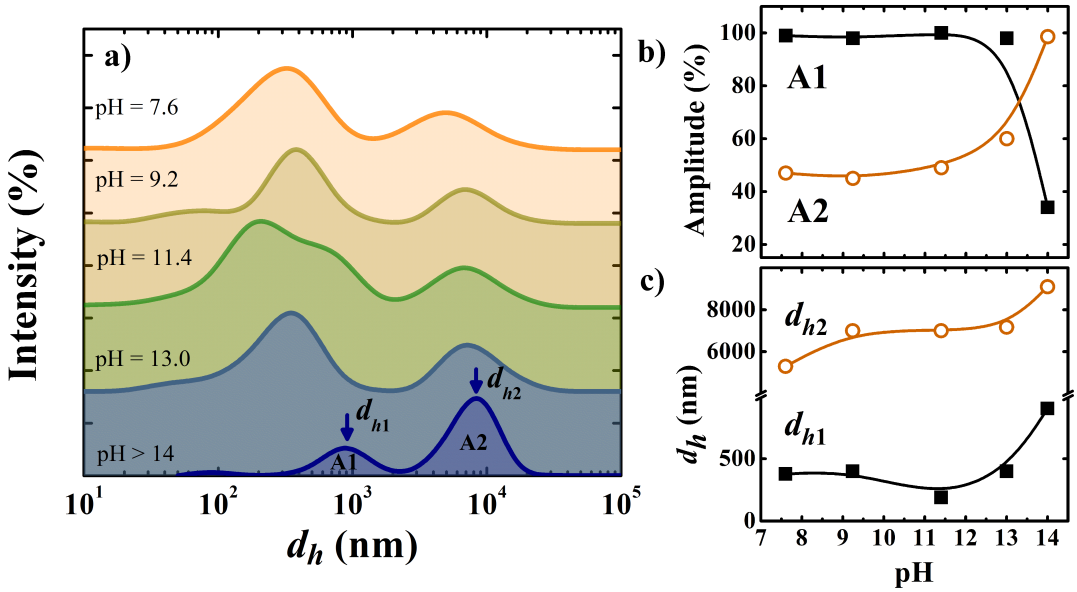

图2. (a) 采用 CONTIN方法对动态光散射（DLS）测量所得的自相关函数进行拟合，得到 PANI微球的粒径分布（流体力学直径d_h）。**(b)** 振幅和**(c)**流体力学直径随溶液 pH值的变化情况，表明 PANI颗粒的有效尺寸可通过该参数调节。

用于光镊样品时， 200 μL 的上述溶液按 1:5（V/V）的比例分散于氢氧化钠溶液（2.5 mM）中，其 pH值为 ＞14。所得溶液经搅拌并超声处理 8 分钟。还通过扫描电子显微镜（JEOL，型号 JSM-6010LA，配有能量色散X射线能谱探测器，分辨率为 133 eV）对 PANI 颗粒进行检查，以确认其球形形貌和组成。在这种情况下，合成过程中形成的微球用滤纸与溶剂分离，并用去离子水和丙酮清洗，以去除未反应的苯胺、PVP 和 APS，然后进行成像。此类分析的典型结果见图 1。

通过能量色散能谱（图1 (c)）验证了粒子的组成，并检测到碳、氮和氧。样品中还含有少量硫，这可能是由于部分过硫酸铵残留在粒子结构中。使用氩离子激光器（λ = 514 nm）和放大倍数为50倍的显微镜物镜进行了拉曼光谱测量（Renishaw InVia显微拉曼光谱仪）。图1 (d)再次验证了粒子的组成，其中将 PANI颗粒的拉曼光谱与翠绿亚胺碱形态的 PANI 的拉曼光谱进行了比较。以下峰的存在再次证实了粒子的组成：1598 cm^{-1} (C=C伸缩振动）；1510 cm^{-1} (N-H变形振动）；1328 cm^{-1} (醌式环的 C–C伸缩振动）；1206 cm^{-1} (C-N伸缩振动）；1170 cm^{-1}(C-H变形振动）；780和751 cm^{-1} (PANI翠绿亚胺碱中的环变形振动）；533和417 cm^{-1} (PANI翠绿亚胺碱中的面外环变形振动）。

我们还进行了动态光散射（DLS）为表征 PANI颗粒的粒径分布而进行的测量。在这些实验中，将重新分散于不同 pH值（7.6、9.2、11.4、13.0 和 ＞14）氢氧化钠或氯化氢水溶液中的 PANI颗粒进行超声处理 8 分钟，并获得散射强度相关图。这些测量使我们得以研究通过改变溶液 pH值实现不同掺杂程度时，粒子的尺寸变化。采用 CONTIN 方法拟合散射强度自相关函数，得到图 2（a）所示的强度粒径分布。无论使用何种 pH值，通常都能观察到两个群体：较小的群体直径为几十纳米（群体1），较大的群体直径则高出一至两个数量级（群体2）。大颗粒的直径达微米级，这一结果似乎不太可能是通过动态光散射测得的可靠结果，可能是由灰尘或杂质等造成的伪影。不过，所有样品的强度自相关函数均呈平滑曲线，并且重复测量数次后结果相同（见补充信息）。尽管这些实验测得的大直径并不可靠（颗粒的扩散率可能因沉降过程而被高估），但其直径的数量级以及随 pH值变化的趋势仍值得信赖。随着溶液 pH值降低，群体2的强度占比也随之降低。此外，降低 pH值时，两个群体的流体力学直径均呈减小趋势（图 2（c））。这可能是由于聚苯胺链发生质子化：在较高 pH值下质子化程度较低或不发生质子化，而在较低 pH值下质子化显著，从而提高了链的溶解度。图 2 （b）和（c）显示了振幅（A1 和 A2）以及

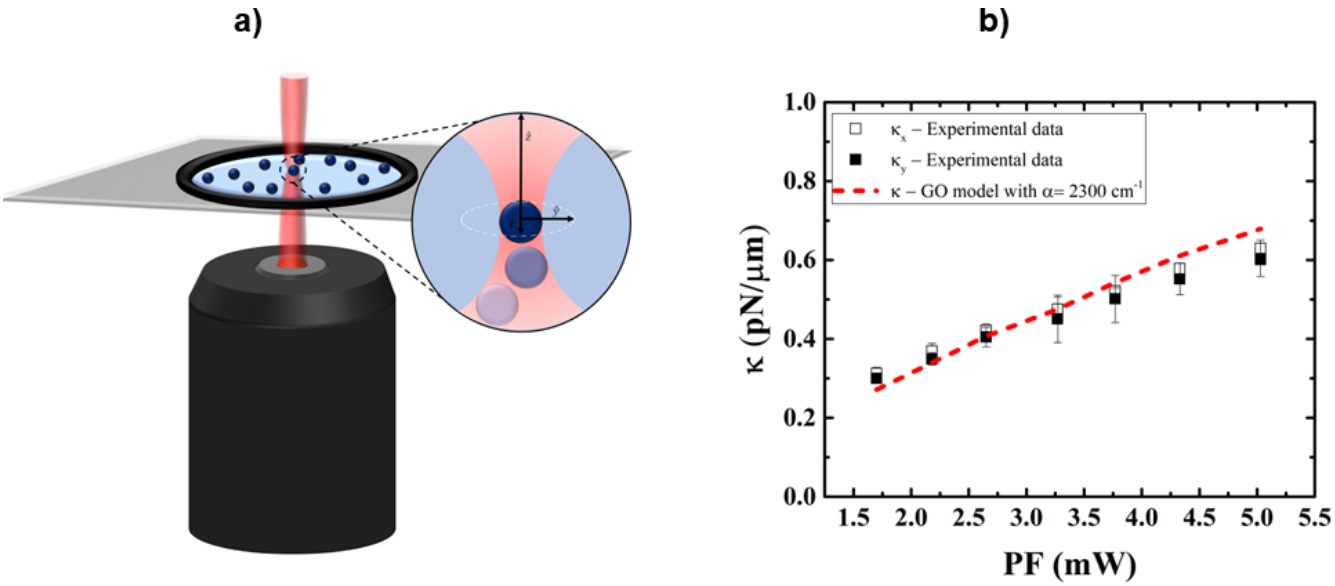

图3。 (a) 光镊装置和样品室的示意图。**(b)** 方块： 两个相互垂直方向（x 和y）的横向捕获刚度 κ随焦点处的激光功率PF变化的关系。红色虚线：吸收系数为 $\alpha = 2300\ \mathrm{cm}^{-1}$的微球的无像差几何光学（GO）预测值。实验数据和理论数据均取自半径为$a = (3.17 \pm 0.02)\ \mu$m、位于盖玻片上方$h = 10\ \mu$m高度处的微球。在相同条件下进行一系列不同测量后，计算所得均值标准误作为实验数据点的垂直误差棒。

两个群体的峰值直径（d1 和 d2）。

光镊装置

光镊（OT）由一台线偏振红外激光器组成，该激光器以通常的高斯（TEM_{00}）模式运行，波长为 λ = 1,064 nm，在物镜入口处测得束腰为（8.80 ± 0.08）mm（物镜孔径直径为6.0 mm）。光镊安装在配备 100×数值孔径为1.4的油浸物镜的Nikon Ti-S倒置显微镜上。样品室由夹在两片玻璃盖玻片之间的O形圈构成，并将聚苯胺胶体溶液加入该O形圈内部（见图3（a））。

结果与讨论

在所有光镊实验中，我们通过视频显微术测定每个所选微珠在溶液中自由扩散时的扩散系数，据此确定其流体力学半径。我们使用 CMOS 相机（Basler ac1920-155uc）对微珠在光学势中的位置进行为期一分钟的布朗涨落分析，从而测量陷阱刚度 κ。我们的分析流程的技术细节已在其他地方描述 [2]。

在图3的(b)面板中，我们展示了测得的实验陷阱刚度（方块），它是焦点处激光功率（PF）的函数，测量方向为垂直于激光传播方向（x 和y）的两个轴（z）。这些测量使用半径为$a = (3.17 \pm 0.02)\mu m$ 的PANI微球进行，微球位于样品室底部盖玻片表面上方 10 μm 处。

所示的红色虚线是我们课题组此前开发的几何光学（GO）模型给出的理论预测结果 [34]。该模型基于Ashkin原始模型，用于描述球形颗粒所受的辐射力[4], , 并通过材料的吸收系数将颗粒的光吸收纳入模型 [11]。在本研究中，忽略球差的模型版本与实验数据吻合得更好，因此本文所展示的所有GO计算均采用这一设定。原因与颗粒不可忽略的吸收有关，这会限制GO计算，尤其是在计算光学像差时，后文将对此予以说明。GO计算的完整细节见原始参考文献 [34, 11]。值得指出的是，图3 中所示理论与实验的比较（以及后续图中的比较）是绝对比较，因为理论数据是在未使用拟合参数的情况下获得的。事实上，计算理论陷阱刚度所需的大多数参数均经过仔细测量，包括微珠半径、微珠距盖玻片的高度、激光功率和束腰（PANI的折射率为1.8，该数值来自文献 [16]）。此外，对于PANI，我们采用了 $\alpha = 2300\ \mathrm{cm}^{-1}$的吸收系数，这与文献 [13]一致。 α这一数值使GO模型与我们的实验结果吻合得最好，表明在所用的1,064 nm波长下，PANI微珠具有相当强的吸收。

光学陷阱中的吸收性微珠可能表现出不同的行为。当吸收系数与

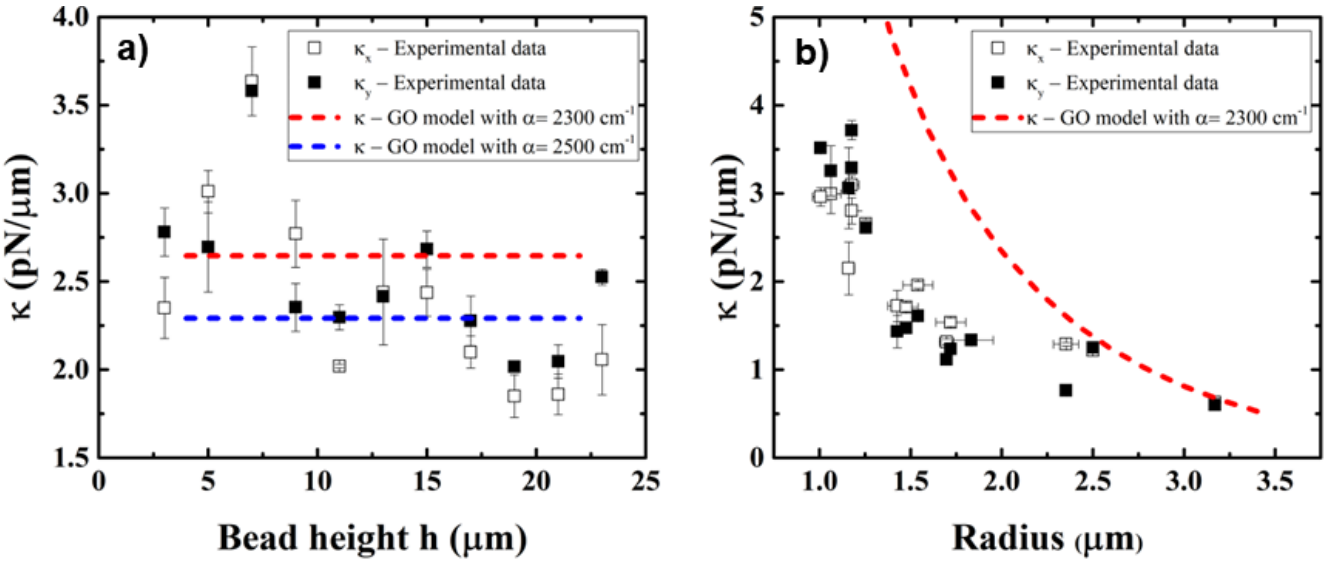

图 4。 (a) 方块： 两个相互垂直方向（x 和 y）上的横向捕获刚度 κ 随微珠高度h（相对于盖玻片）变化的关系。 红色虚线：吸收系数为 $\alpha = 2300\ \mathrm{cm}^{-1}$的微球在无像差几何光学（GO）条件下的预测值。 蓝色虚线：吸收系数为 $\alpha = 2500\ \mathrm{cm}^{-1}$时的类似理论预测值。实验数据和理论数据均是在焦点处激光功率为 $PF = 9.65$ mW、微珠半径为 $a = (2.50 \pm 0.03)\ \mu$m 的条件下获得。**(b)** 与面板 (a) 相同类型的数据和理论计算；此处通过改变微珠半径并保持高度$h = 10\ \mu$m 和焦点处激光功率$PF = 4.97$ mW 不变而获得。实验数据点的垂直误差棒表示均值标准误，该误差由在相同条件下进行的一系列不同测量计算得出。

金属的吸收系数相当时（$\alpha_{metals} \simeq 10^5\ \mathrm{cm}^{-1}$ [21]），光吸收通常会产生光泳力，其作用远大于梯度力，导致微米级微球无法被捕获。另一方面，当吸收系数远小于金属的吸收系数时，光吸收会削弱陷阱刚度 [11]。

在图3中可以看到，陷阱刚度的实验数据随激光功率变化时略微偏离了经典的线性规律。此外，在所用的最低功率下，实验数据略高于理论预测；而在所用的最高功率下则出现相反的情况。其他吸收性微球也曾出现并验证过这种行为（尽管所用激光功率更高） [2]，这有力地表明，PANI微珠的吸收系数依赖于光强，如锗或硅等传统半导体的情况一样[26, 27]。换言之，在半导体中，激光强度增大会提高自由电荷载流子的产生速率，进而通过自由载流子（FC）吸收机制提高吸收系数（α_{FC}） [26, 17]。因此，可以这样解释实验数据偏离线性规律的现象：当功率低于 ~ 30.5 mW时，吸收系数略低于$2300 cm^{-1}$ （因此，实验 κ 值高于GO模型的预测值）；而当激光功率高于3.5 mW时，吸收系数略高于$2300 cm^{-1}$ （因此，实验 κ 值低于GO模型的预测值）。

在图4中，(a)面板展示了测得的横向（x 和 y）陷阱刚度 κ 随微珠高度 h 的变化（方块）。这些测量使用半径为 $a = (2.50 \pm 0.02)\ \mu$m 的 PANI微球进行，焦点处的激光功率固定为 $PF = 9.65$ mW。我们还展示了 GO模型的预测结果，其采用与图3(b)相同的吸收系数，$\alpha = 2300\ \mathrm{cm}^{-1}$（红色虚线）；此外，为便于比较，还展示了 $\alpha = 2500 \mathrm{cm}^{-1}$（蓝色虚线）。我们纳入这两个不同的 α 值，以强调吸收对激光功率的依赖所产生的影响：请注意，本例中焦点处的功率是图3(b)中所用功率的两倍，因此预计此时 PANI颗粒的吸收更强。此外，值得注意的是，κ 的实验数据随微珠高度增加略有下降。另一方面，无球差的 GO模型预测，随着微珠高度 (h) 变化，κ 保持恒定，如图4(a)中的水平虚线所示。球差通常会使激光焦点劣化，降低使用高斯光束构建的光镊的捕获效率 [34, 29]。因此，这一结果表明我们的系统并未完全免受球差影响，不过其影响很小。

最后，我们还通过改变微球的半径，研究了 κ 的行为，如图4（b）所示。GO模型已被证明能够有效预测κ 随介电聚苯乙烯微球半径变化的规律，其尺寸范围为$a >> \lambda$ 至$a \simeq \lambda$ [34]。对于PANI，我们的实验数据表现出预期的 κ 随微球半径变化的规律，即呈双曲线形，但所得数值小于预测值

对于 $a < 2.5\ \mu$m，GO模型给出了上述结果。这表明，对于吸收性微球，当$a \simeq \lambda$时，GO模型无法很好地近似陷阱刚度，因此需要更复杂的模型来预测κ的行为，例如包含其他光学像差 [15]的 MDSA+模型，或者广义洛伦兹-米理论方法 [19]。

对于透明聚苯乙烯微球，当 κ 半径变化时，若 $a \simeq \lambda$，GO模型能够成功预测其变化，这是因为当粒子位于光轴上时，对陷阱有贡献的入射光线不受显著衍射和共振效应的影响；这些效应只有通过米氏散射才能得到良好描述 [44]。对于 PANI 等吸收性微球，其散射类型与透明粒子中的散射截然不同 [20], , 其中包括被吸收的光子湮灭等效应。因此，米氏散射效应变得更加重要，当 $a \simeq \lambda$时，GO模型便开始失效，这与我们的实验数据一致（图 4(b)）。无论如何，即使没有更好的模型来预测 PANI颗粒的陷阱刚度随微珠半径的变化，该量仍可通过实验高精度地测定，从而确保 PANI 能够在较宽的粒径范围内被高斯光束光镊稳定捕获。因此，本研究的结果为将新型半导体聚合物材料用作光镊应用的操作柄开辟了道路。

此外，请注意，在当前情况下（pH值 =14 且使用的激光功率较低），光泳效应与该系统无关。图 4b 的数据可以得出这一结论。事实上，如果光泳力在这种情况下发挥作用，我们会预期随着粒子半径增大，实验数据会偏离 GO模型，因为光泳对较大的粒子影响更显著，而该模型并未计算这种效应。然而，图 4b 中的数据呈现出相反的趋势：对于较大的粒子，实验结果与理论结果趋于一致。这一结果有力地表明，在所用实验条件下，光泳力与当前系统无关，尽管在其他条件下（较低的pH值、较高的激光功率等）这一情况可能发生显著变化。

结论

总之，我们已成功合成出尺寸范围较宽（半径为1 - 3. 5 μm）的球形PANI颗粒，非常适合用于光镊实验。我们在高斯（TEM_{00}）光束光镊中对这类颗粒的光学捕获进行了全面表征，证实了将这种聚合物半导体材料用作该技术操控介质的可行性。结果表明，PANI颗粒表现得类似于无机半导体，其吸收系数趋于随激光功率的增加而增大。此外，预计该系数还取决于溶液pH值 [3], 以及制备微球时所使用的PANI/稳定剂比例 [23]。这些特性表明PANI颗粒的光学操控可以受到强烈调制，并且不能排除获得类似于无机半导体所观察到的振荡行为的可能性 [12, 28] 。此外，由于这些颗粒由有机半导体制成，因此与无机半导体相比，它们更容易用其他Polymers和/或分子进行功能化，以用于微流变学及其他领域中的特定应用。最后，作为本工作的一个重要展望，值得指出的是，由于PANI颗粒具有半导体特性，可以通过电荷载流子的生成来调制作用于其上的光学力 [28]，例如优化光泳陷阱的构建。此外，调制吸收系数的可能性使得能够在更高波长（约红外）下构建这类陷阱，从而为技术应用的改进打开大门，例如，提高体显示的效率，因为体显示的构建基于光泳陷阱[39]。

补充信息

补充信息可通过链接免费获取。补充信息中包含关于DLS测量的更多细节，以及一段展示非典型光镊实验的视频。

致谢

本研究由国家科学技术发展委员会（CNPq）、研究与项目资助机构（FINEP）、米纳斯吉拉斯州研究资助基金会（FAPEMIG）、高等教育人员提升协调会（CAPES）—资助代码 001，以及自旋电子学与先进磁性纳米结构国家科学技术研究所（INCT-SpinNanoMag）资助。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据可向通讯作者提出合理请求后获取。

参考文献

[1] ALVES, P. S., MESQUITA, O. N., AND ROCHA, M. S. 控制 β-环糊精-DNA结合反应中的协同性。*J. Phys.Chem.Lett. 6* (2015), 3549–3554.[2] ANDRADE, U. M. S., GARCIA, A. M., AND ROCHA, M. S. 用于操控超顺磁微球的贝塞尔光束光镊。*Appl. Opt.60,* 12(2021), 3422– 3429.

[3] ANENE, C. R., AND NWOKOYE, A. O. C. pH值对聚苯胺羧甲基纤维素薄膜光吸收的影响。*IOSRJ. Appl. Phys12*, 3 (2020), 17–24.[4] ASHKIN, A. 射线光学区间内单光束梯度激光陷阱对介电球施加的力。*Biophys.J.61*, 2 (1992), 569–582.[5] ASHKIN, A. 光学捕获与操控小型中性粒子、原子和分子的历史。载于单分子光谱学。Springer, 2001, pp. 1–31.[6] ASHKIN, A., AND DZIEDZIC, J. M. 光学捕获与操控病毒和细菌。*Science 235*, 4795 (1987), 1517–1520.[7] BABEL, V., AND HIRAN, B. L. 聚苯胺复合材料综述：合成、表征与应用。*Pol. Compos. 42*, 7 (2021), 3142–3157.[8] BEYGISANGCHIN, M., RASHID, S. A., SHAFIE, S., SADROLHOSSEINI, A. R., AND LIM, H. N. 聚苯胺及聚苯胺薄膜的制备、性质与应用——综述。*Polymers 13*, 12 (2021), 2003.[9] BLICKLE, V., AND BECHINGER, C. 微米级随机热机的实现。*Nat. Phys. 8*, 2 (2012), 143–146.[10] CAMPOS, W. H., FONSECA, J. M., DE CARVALHO, V. E., MENDES, J. B. S., ROCHA, M. S., AND MOURA- MELO, W. A. 拓扑绝缘体粒子作为光诱导振子：迈向动态力测量与光学流变学。*ACS Phot. 5*, 3 (2018), 741– 745.[11] CAMPOS, W. H., FONSECA, J. M., MENDES, J. B. S., ROCHA, M. S., AND MOURA-MELO, W. A. 光吸收如何改变光镊中微粒所受的辐射力。*Appl. Opt. 57*, 25 (2018), 7216–7224.[12] CAMPOS, W. H., MOURA, T. A., MARQUES, O. J. B. J., FONSECA, J. M., MOURA-MELO, W. A., ROCHA, M. S., AND MENDES, J. B. S. 锗微粒作为光镊中的光诱导振子。*Phys. Rev. Res. 1*, 3 (2019), 033119.[13] DE PAIVA, A. B., CORRER, G. I., UGUCIONI, J. C., CARVALHO, G. R., JASINEVICIUS, R. G., AND DE GODOY, M. P. F. 翠绿亚胺盐聚苯胺薄膜的光电导特性。*Synt. Metals281*(2021), 116915.[14] DING, K., CHEN, J., ZHANG, D., SHI, F., LI, B., TIAN, W., HE, X., WANG, L., AND WANG, H. 在铝上电化学沉积十二烷基硫酸钠掺杂的叶柄状聚苯胺及其作为新型锂离子电池集流体的应用。*Synt. Metals 278*(2021), 116837.[15] DUTRA, R. S., VIANA, N. B., MAIA NETO, P. A., AND NUSSENZVEIG, H. M. 光镊的绝对标定包含像差的镊子。应用物理快报 *100*，13（2012），131115。[16] FARAG, A. A. M.、ASHERY, A. 和 RAFEA, M. A. 旋涂聚苯胺薄膜的光学色散和电子跃迁表征。*Synt.Metals160*（2010），156–161。[17] FOX, M. 固体的光学性质。牛津大学出版社，2001。[18] GIESELER, J.、GOMEZ-SOLANO, J. R.、MAGAZZ`U, A.、CASTILLO, I. P.、GARC´IA, L. P.、GIRONELLA- TORRENT, M.、VIADER-GODOY, X.、RITOR, F.、PESCE, G.、ARZOLA, A. V.、VOLKE-SEP`ULVEDA, K. 和 VOLPE, G. 光镊——从校准到应用：教程。*Adv. Opt.Phot. 13*，1（2021），74–241。[19] GOUESBET, G.、GR´EHAN, G. 和 MAHEU, B. 使用布罗姆维奇形式研究高斯光束被米氏散射中心散射。*J. Opt.16*，2（1985），83。[20] HULST, H. C. 和 VAN DE HULST, H. C. 小颗粒的光散射。Courier Corporation，1981。[21] JOHNSON, P. B. 和 CHRISTY, R. W. 贵金属的光学常数。*Phys.Rev.B6*，12（1972），4370。[22] KIM, B.-J.、OH, S.-G.、HAN, M.-G. 和 IM, S.-S. SDS胶束溶液中聚苯胺纳米颗粒的合成与表征。*Synth. Metals122*，2（2001），297–304。[23] MANSOUR, A. F.、ELFALAKY, A. 和 MAGED, F. A. PANI/PVA共混物的合成、表征及光学性质。*IOSRJ.Appl. Phys 7*，4（2015），37– 45。[24] MENDES, J. B. S.、GUEDES, R. C. O. 和 CUNHA, R. O. 通过自旋塞贝克实验研究聚苯胺中的自旋输运和自旋到电荷电流转换。*Journalof Magnetism and Magnetic Materials543*（2022），168635。[25] MENDES, J. B. S.、SANTOS, O. A.、GOMES, J. P.、AS- SIS, H. S.、FELIX, J. F.、RODR´IGUEZ-SU´AREZ, R. L.、REZENDE, S. M. 和 AZEVEDO, A. 聚苯胺中的高效自旋输运。*PhysicalReviewB 95*，1（2017），014413。[26] MEYER, J. R.、BARTOLI, F. J. 和 KRUER, M. R. 半导体中的光学加热。*Phys. Rev.B 21*，4（1980），1559。[27] MEYER, J. R.、KRUER, M. R. 和 BARTOLI, F. J. 半导体中的光学加热：Ge、Si、InSb 和 GaAs 中的激光损伤。*J. Appl.Phys.51*，10（1980），5513– 5522。[28] MOURA, T. A.、ANDRADE, U. M. S.、MENDES, J. B. S. 和 ROCHA, M. S. 用作光镊实验操作柄的硅微粒。《光学快报》*45*，5（2020），1055–1058。

[29] OLIVEIRA, L.、CAMPOS, W. H. 和 ROCHA, M. S. 利用环形光束对超顺磁微珠进行光学捕获和操控。*Meth. Protoc.1*，4（2018），44。[30] OLIVEIRA, L. 和 ROCHA, M. S. 力谱学揭示了离子强度对DNA-顺铂相互作用的影响：调控结合参数。《物理评论*E*》*96*（2017），032408。[31] POLIMENO, P.、MAGAZZU, A.、IATI, M. A.、PATTI, F.、SAIJA, R.、BOSCHI, C.、DONATO, M. G.、GUCCIARDI, P. G.、JONES, P. H.、VOLPE, G. 和 MARAG`O, O. M. 光镊及其应用。*J.Quant. Spec.Rad. Trans. 218*（2018），131–150。[32] QUINTO-SU, P. A. 在光镊中实现的微观蒸汽机。*Nat. Commun.5*，1（2014），1–7。[33] RIEDE, A.、HELMSTEDT, M.、RIEDE, V. 和 STE- JSKAL, J. 聚苯胺分散体。9. 使用不同稳定剂研究颗粒形成的动态光散射。*Langmuir14*，23（1998），6767–6771。[34] ROCHA, M. S. 面向本科生的光镊：理论分析与实验。*Am. J.Phys. 77*，8（2009），704–712。[35] ROCHA, M. S.、L´UCIO, A. D.、ALEXANDRE, S. S.、NUNES, R. W. 和 MESQUITA, O. N. DNA-补骨脂素：单分子实验和第一性原理计算。*Appl. Phys. Lett. 95*（2009），文章编号253703。[36] RODR´IGUEZ-SEVILLA, P.、LABRADOR-P´AEZ, L.、JAQUE, D. 和 HARO-GONZ´ALEZ, P. 用于生物传感的光学捕获：材料与应用。*J.Mat. Chem.B5*，46（2017），9085–9101。[37] SHI, M.、BAI, M. 和 LI, B. 以SDS为软模板合成用于高性能超级电容器的介孔交联聚苯胺。*J. Mat. Sci.53*，13（2018），9731–9741。[38] SHVEDOV, V.、DAVOYAN, A. R.、HNATOVSKY, C.、EN- GHETA, N. 和 KROLIKOWSKI, W. 一种长程偏振控制光学牵引光束。*Nat. Phot.8*，11（2014），846–850。[39] SHVEDOV, V. G.、HNATOVSKY, C.、RODE, A. V. 和 KROLIKOWSKI, W. 利用瓶状光束对空中颗粒进行稳健的捕获和操控。*Opt. Exp. 19*，18（2011），17350–17356。[40] SMALLEY, D. E.、NYGAARD, E.、SQUIRE, K.、WAG- ONER, J. V.、RASMUSSEN, J.、GNEITING, S.、QADERI, K.、GOODSELL, J.、ROGERS, W.、LINDSEY, M.、COST- NER, K.、MONK, A.、PEARSON, M.、HAYMORE, B. 和 PEATROSS, J. 一种光泳阱体显示。《自然》*553*，7689（2018），486–490。[41] STEJSKAL, J.、KRATOCHV´IL, P. 和 HELMSTEDT, M. 聚苯胺分散体。5. 聚（乙烯醇）和聚（N-乙烯基吡咯烷酮）作为空间稳定剂。*Langmuir 12*, 14 (1996), 3389–3392.[42] STEJSKAL, J., PEK´AREK, M., TRCHOV´A, M., AND KOLSK´A. 在掺入导电聚吡咯纳米管的大孔三聚氰胺海绵上吸附有机染料。《应用聚合物科学杂志》*139*, 20 (2022), 52156.[43] SUAREZ, R. A. B., AMBROSIO, L. A., NEVES, A. A. R., ZAMBONI-RACHED, M., AND GESUALDI, M. R. R. 冻结波的实验光学捕获。《光学快报》*45*, 9 (2020), 2514–2517.[44] VIANA, N. B., ROCHA, M. S., MESQUITA, O. N., MAZOLLI, A., NETO, P. A. M., AND NUSSENZVEIG, H. M. 迈向光镊的绝对标定。《物理评论*E*》*75*, 2 (2007), 021914.[45] WU, K., HUANG, J., TU, J., XU, X., HUANG, H., LIU, Y., LI, L., AND YAO, J. 具有排列整齐的纤维形貌的增强型聚苯胺-十二烷基苯磺酸盐水凝胶，作为耐用的锌离子电池电极材料。*Synt. Metals 274*(2021), 116721.[46] ZHANG, H., AND LIU, K.-K. 用于单细胞的光镊。《英国皇家学会跨学科期刊》*5*, 24 (2008), 671–690.[47] ZHOU, C., HAN, J., AND GUO, R. 通过稀阴离子表面活性剂溶液制备聚苯胺矩形亚微米管这一新型纳米结构。《物理化学杂志*B*》*112*, 16 (2008), 5014–5019.[48] ZHOU, C., HAN, J., AND GUO, R. 在稀SDS/氯化氢溶液中合成聚苯胺分级结构：纳米结构覆盖的矩形管。大分子 *42*, 4 (2009), 1252–1257.

目录图（目录图示）

