

方向性发光新技术构筑高效透明荧光太阳能聚光器

宋杨*, 赵海光*

青岛大学物理科学学院/生物多糖纤维成形与生态纺织国家重点实验室, 青岛 266071

* 联系人, E-mail: yangsong@qdu.edu.cn; hgzhao@qdu.edu.cn

High-efficiency transparent luminescent solar concentrators enabled by novel directional emission

Yang Song* & Haiguang Zhao*

College of Physics, State Key Laboratory of Bio-Fibers and Eco-Textiles, Qingdao University, Qingdao 266071, China

* Corresponding authors, E-mail: yangsong@qdu.edu.cn; hgzhao@qdu.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0778

当清晨的阳光透过玻璃窗洒进房间, 你是否想过, 透明的窗户除了可以带来光明和温暖, 还能直接将太阳能转化为电能? 在建筑集成光伏快速发展的今天, 科学家们致力于研发既能保持高透明度、又能高效发电的光伏器件。近日, 青岛大学赵海光、宋杨团队联合米兰理工大学、威尼斯大学及中国科学技术大学等研究机构, 在荧光太阳能聚光器 (luminescent solar concentrator, LSC) 领域取得突破。研究团队通过“电场定向-光聚合”技术实现了量子棒/聚合物复合薄膜的方向性发射, 将器件光电转换效率提升至4.92%, 并在60%以上透光率下实现了2.39%的光利用效率。该工作为透明光伏研究提供了新思路, 成果发表于*Physical Review Letters*^[1]。

荧光太阳能聚光器的结构非常巧妙: 一块透明的聚合物平板中嵌入荧光材料, 四周安装长条形太阳能电池。阳光照射时, 荧光材料吸收太阳光并发射荧光, 由于全内反射效应, 大部分荧光会像在光纤中一样, 被限制在平板内部并向边缘传播, 最终被四周的太阳能电池捕获并转化为电能。因为与现有的聚合物玻璃和夹胶玻璃工艺兼容, LSC器件在实现高透明度的同时还具有极低的安装和维护成本, 这使其在建筑集成光伏和农业光伏等领域应用前景广阔。

因为兼具半导体的宽吸收以及原子分子的强发射特点, 量子点是目前制作LSC器件的最佳材料。然而, 以往研究多局限于使用各向同性发光的量子点, 这种量子点向各个方向的发光强度均相同, 当被嵌入波导材料中时, 约20%~30%的发

射光无法参与全内反射而逃逸, 这制约了LSC效率的进一步提升。该研究发现, 调控量子点使其更多向侧面发光, 可大幅提升LSC效率。首先, 垂直于器件平面的偏振光源会向侧面发射更多光子, 更易发生全内反射, 从而将更多光汇聚至边缘(图1(a))。其次, 理论分析表明, 垂直偏振的方向性发射能显著减少传输损耗: 大角度发射的光到达边缘的路径更短, 被重吸收或散射的概率更低(图1(b))。并且, 计算结果显示, 器件尺寸越大、传输损耗越高, 方向性发射的增效越明显(图1(c)), 这为提升器件效率指明了新方向。

要实现方向性发射, 首先需要寻找合适的发光材料, 研究团队将目光投向了一种特殊的纳米材料——量子棒。相比球形量子点, 量子棒具有天然的偏振发光特性, 并且其吸收与发射光谱重叠小, 重吸收概率低, 极适合用于制作LSC器件。通过巧妙设计核壳结构, 团队制备的CdSe/CdZnS量子棒同时实现了96%的高量子产率与0.77的高发光偏振度, 这为实现高效率方向性发射LSC器件铺平了道路。

解决了发光材料的问题, 下一步是如何让量子棒在聚合物基质中整齐“站立”。为此, 团队开发了一种全新的“电场定向-光聚合”技术(图1(d)): 利用量子棒自身的电偶极矩, 在透明ITO玻璃间施加强交变电场, 可诱导量子棒沿电场方向竖直排列; 同时, 与量子棒混合的长链聚合物单体在紫外光照下可形成致密交联网络, 这样既保持了量子棒的分散性, 又固定了取向。掠入射小角X射线散射与角分辨光致发光测试证实, 量子棒在薄膜中高度竖直取向, 器件发射方向性高达

引用格式: 宋杨, 赵海光. 方向性发光新技术构筑高效透明荧光太阳能聚光器. 科学通报, 2026, 71: 5212–5213

Song Y, Zhao H. High-efficiency transparent luminescent solar concentrators enabled by novel directional emission (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 5212–5213, doi: 10.1360/CSB-2026-0778

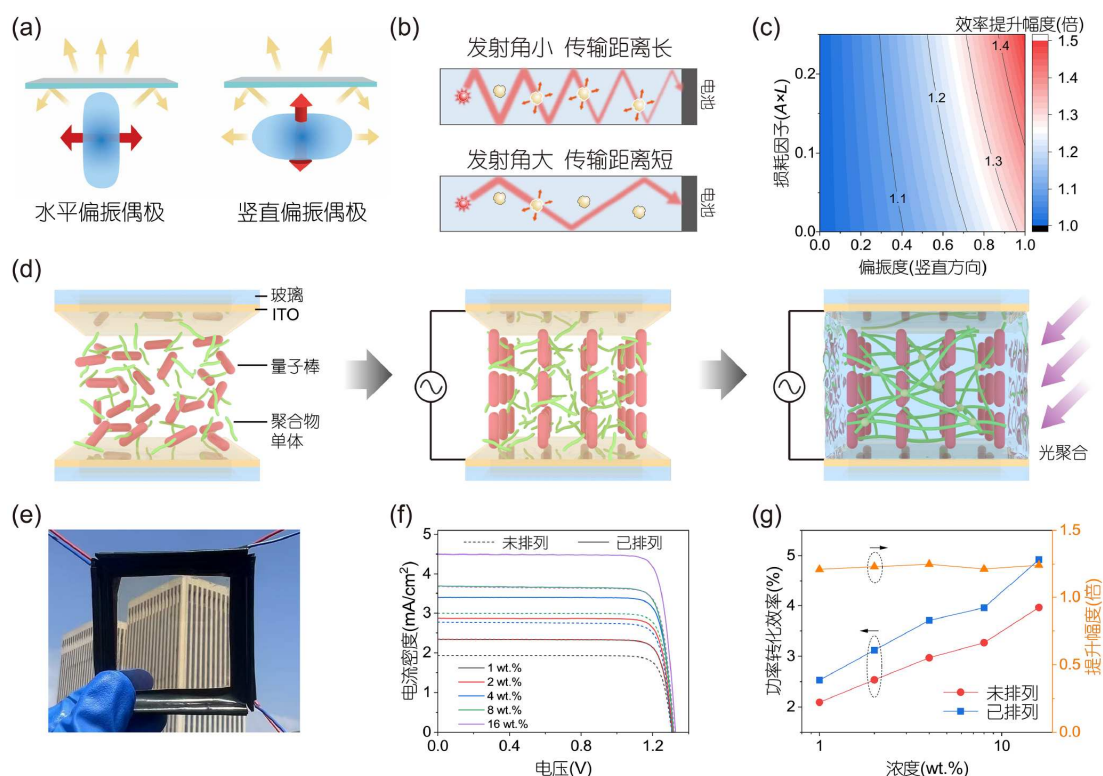


图 1 (网络版彩色)(a) 竖直偏振偶极向侧面发光更多, 相比水平偏振偶极具有更高的全内反射效率。(b) 相比小角度发射的光线, 大角度发射的光线在导光板中传输距离更短, 传输损耗更低。(c) 综合考虑波导效率提升和传输损耗抑制的协同影响, 计算得出的方向性发射对器件效率的提升幅度。(d) “电场定向-光聚合”技术的示意图。(e) 该工作中制备的LSC器件的实物照片。(f) LSC器件在AM1.5G模拟太阳光辐照下的电流-电压曲线。(g) 不同量子棒浓度的已排列/未排列器件的效率以及提升效果对比^[1]。Copyright © 2026 American Physical Society

Figure 1 (Color online) (a) A vertically aligned dipole exhibits enhanced lateral emission, leading to higher total internal reflection efficiency compared to the horizontally aligned dipole. (b) Compared to light rays emitted at small angles, those emitted at large angles travel shorter propagation distances within the waveguide, thereby experiencing lower propagation losses. (c) Calculated device efficiency enhancement induced by directional emission, taking into account the synergistic effects of improved waveguide efficiency and suppressed propagation losses. (d) Schematic illustration of the “electrically aligned photopolymerization” technique. (e) Photograph of the LSC device fabricated in this work. (f) Current-voltage curves of the LSC device under AM1.5G simulated solar irradiation. (g) Comparison of the efficiencies and corresponding enhancements of aligned versus unaligned devices at various quantum rod concentrations^[1]. Copyright © 2026 American Physical Society

1.42. 基于此, 团队制备了 $3.5 \times 3.5 \times 0.85 \text{ cm}^3$ 的夹胶玻璃LSC器件(图1(e))。结果显示, 取向器件的光电转换效率较未取向器件提升1.23倍, 最高达4.92%(图1(f), (g))。更重要的是, 通过调整量子棒浓度, 器件可在透明度与效率间找到最佳平衡: 平均可见光透过率达64%时, 光利用效率高达2.39%。这一性能指标在量子点基LSC器件中表现突出, 且具备与主流高性能薄膜太阳能电池对标应用的潜力。

青岛大学宋杨副教授此前致力于使用方向性发光量子点提升LED器件的光提取效率^[2,3], 该工作是团队将方向性发光理念引入荧光太阳能聚光器领域的研究成果。该研究建立了方向性发射提升LSC性能的完整理论与技术体系, 也为电偶极操控与功能杂化聚合物的发展提供了新思路。未来随着制备技术不断成熟, 大尺寸、高效率的透明太阳能聚光器有望实现实际应用。

推荐阅读文献

- 1 Ren N, Umer M, Carraro E, et al. Directionally emissive luminescent solar concentrators enabled by electrically aligned quantum rods within a polymer matrix. *Phys Rev Lett*, 2026, 136: 207002
- 2 Song Y, Liu R, Wang Z, et al. Enhanced emission directivity from asymmetrically strained colloidal quantum dots. *Sci Adv*, 2022, 8: eabl8219
- 3 Xu H, Song J, Zhou P, et al. Dipole-dipole-interaction-assisted self-assembly of quantum dots for highly efficient light-emitting diodes. *Nat Photon*, 2024, 18: 186–191