

# 让世界充满光明： OLED 的广阔前景

表面等离子激元建模和纳米结构电极的设计有望提高有机发光二极管 (OLED) 系统的光输出和效率。

作者 **LEXI CARVER**

托马斯·爱迪生 (Thomas Edison) 在 1879 年拨动开关, 点亮了世界上第一个具有实用意义的灯泡。此后的一个半世纪, 人们对更先进光源的探索从未停歇, 相继发明了多种不同的照明技术, 带来了高亮度、高色彩品质、可调光以及低廉的生命周期成本等诸多特性。

有机发光二极管 (organic light emitting diode) 又称 OLED, 因其可被制成形状各异、大小不一的轻薄发光面板而备受关注。OLED 可被用于制作柔性或可弯曲的照明装置, 时常被安装在带有平面或曲面的部件上, 用于制造诸如汽车尾灯的各类零件, 甚至还能用其制造出极具艺术魅力的“光之花”(见图 1)。

OLED 虽然具有诸多优点, 但与其同胞兄弟 LED 相比, 却在亮度和节能方面稍显逊色。鉴于此方面的原因, 柯尼卡美能达 (Konica Minolta) 公司的研究人员正在全力以赴地研发更先进的设计方案, 以满足人们不断增长的照明需求。柯尼卡美能达公司是世界领先的 OLED 制造商, 常年与日本各重点大学开展密切合作, 致力于开发成像和光学领

域的先进仪器。

Leiming Wang 博士是美国加利福尼亚州圣马特奥市 (San Mateo, California) 柯尼卡美能达实验室的高级研究员。他与研究团队中的其他成员一起专注于使用数值仿真来分析 OLED 的光损失机理, 希望通过虚拟测试找到改进设计的方法。“虽然 OLED 具有很多优点, 但在使用中还是存在诸多局限性, 我们正在努力将这些不利因素减至最少。”他介绍道, “对 OLED 效率影响最大的因素是由光在装置内部的相互作用而引起的复杂等离子激元耦合现象, 这一作用会造成高达 40% 的光损失。”

## » OLED 的工作原理

OLED 由嵌在正电极 (阳极)、负电极 (阴极) 中间的有机半导体构成。图 2 显示了 OLED 器件的构造, 包括一个由透明钢锡氧化物 (ITO) 制成的阳极和一个银制的阴极, 两个电极之间的三个有机层组成。三个有机层分别为: 空穴传输层 (hole transport layer, 简称 HTL)、发光层 (electron transport layer, 简称 EML) 和电子传输



图 1. 豪斯登堡 (Huis Ten Bosch) 是位于日本长崎县佐世保市的一个充满荷兰风情的主题公园。柯尼卡美能达公司联合园方一同开发出“OLED 郁金香”, 在郁金香节的夜晚放出奇光异彩。

层 (electron transport layer, 简称 ETL), 它们都被集成在一个玻璃基板上, 当器件开启时, 光就会穿过这个玻璃基板。

当施加电流时, 电子注入阴极, 并在阳极形成空穴。电子和空穴会穿过各个层相向运动, 最终在发光层相遇并结合, 将能量以光子的形式释放出来。这一过程在电流通过时会不间断地快速发生, 从而引起连续发光。

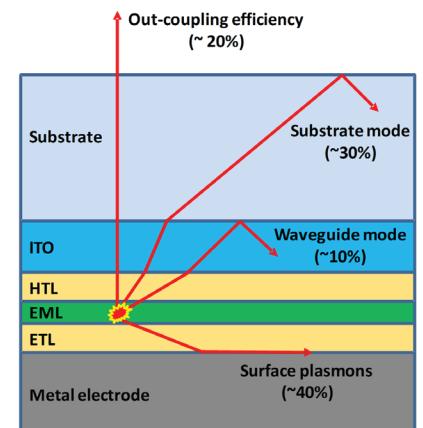


图 2. OLED 多层结构示意图, 图中显示了多种类型的光损失。图注: Substrate - 基底; Substrate mode - 基底模式; Waveguide mode - 波导模式; Surface plasmons - 表面等离子激元; Metal electrode - 金属电极



“通过使用 COMSOL 软件, 我们可以深入了解光损失的产生机理, 并轻松测试由不同设计局限带来的影响, 进而对我们的 OLED 产品进行相应的调整。正是 COMSOL 软件的强大功能, 帮助我们找到了将等离子激元造成的损失减少一半的方法。”

— WANG LEIMING, 柯尼卡美能达公司高级研究员

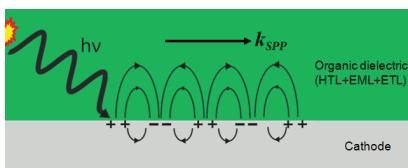


图 3. OLED 中表面等离激元与偶极辐射的耦合示意图。SPP 波会束缚部分光子,使它们无法穿过 OLED 玻璃基板。

## » 抓住“偷窃”光子的“贼”

然而,有些光子却永远无法到达外部世界。造成 OLED 光损失的机理有多种,例如由于每一层的折射率不同导致光在层内反射,而不向外传播(如图 2 所示)。

Wang 博士的团队主要研究光损失的另一模式:在阴极和有机材料之间的界面上发生的偶极发射与表面等离激元的耦合情况。表面等离激元是指由振荡电子形成的沿导体表面传播的波。在 OLED 中,发光层中的辐射偶极子(分子激子)发出的光可以与阴极的电子振荡耦合,从而产生一种叫做表面等离激化激元(surface plasmon polariton, 简称 SPP)的波。SPP 在沿阴极表面传播时会不断衰减,同时带走发射的光子,使它们无法穿透玻璃向外辐射(见图 3)。

换句话说,由于金属阴极紧挨着有机发光层,部分光被阴极的电子吸收,从而引起电子振荡,并形成 SPP。这些现象最终会造成大量的能量以热量的形式损失掉。

Wang 博士借助 COMSOL Multiphysics® 软件中的数值仿真功能,对 OLED 系统中的光(由 EML 发出)和 SPP 进行建模,试图通过分析找到防止光损失的方法。

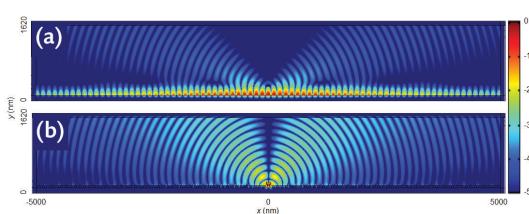
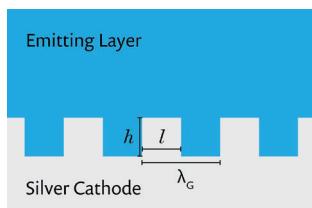


图 4. 左图为阴极的纳米光栅表面。Wang 博士的仿真团队通过对不同栅距高度和宽度产生的效果进行测试,并确定了最佳的排列方式。右图为阴极表面分别采用(a)平面和(b)纳米光栅结构的偶极发射二维场分布仿真。采用平面时,大部分偶极发射都被耦合到 SPP 波中,只有一小部分自由光形式辐射。但采用纳米光栅结构时,这种耦合得到了很好地抑制(b)。

法。一个极具潜力的设想是在阴极中加入纳米光栅结构(见图 4 左侧视图),该结构能破坏 SPP 模式的形成,进而减少偶极发射与等离激元的能量耦合。

Wang 博士的仿真结果显示了在使用不同阴极形状时电磁场的分布情况,以及 OLED 可以辐射出光的多少(见图 4 右侧视图)。通过仿真结果,他的团队已经确认这一现象确实会造成大量光损失。

COMSOL® 软件已成为柯尼卡美能达实验室的重要工具,它不仅能提供强大、全面的功能,并且使用灵活、操作简单。该实验室工作人员正利用这个软件从事各类型课题的研究。“在这个 OLED 项目中,我们可以使用 COMSOL 执行包括数据后处理在内的任何操作。我们还将与波长相关的光学性质导入在仿真模型当中,并基于这些数据进行仿真分析。”Wang 博士说。

他的团队分别为采用平面阴极和纳米光栅结构阴极的 OLED 建立了模型,并尝试使用不同的几何参数来找到最优配置(见图 5)。不仅如此,他们还通过运行仿

真探寻偶极位置的影响,以及由 SPP 引起光损失的波长,进而研究由不同偶极取向造成的影响。团队成员还利用功率流分析的方法来计算从 EML 发出的光中有多少可以从玻璃中逸出。

团队最终借助仿真实证了他们的设想,通过在阴极使用优化过的纳米结构表面,能将等离激元造成的损失减少 50%。

## » 多功能建模使灯光更明亮

借助于一系列仿真工作,Wang 博士的团队得以设计出极具前景的新型 OLED。这种新设计可以使效率得到大幅提升。“我们能够通过对 OLED 系统的模拟来确定阴极纳米光栅结构的最佳配置。”他总结道,“通过使用 COMSOL 软件,我们可以深入了解光损失的产生机理,并轻松测试由不同设计局限带来的影响,进而对我们的 OLED 产品进行相应的调整。正是 COMSOL 软件的强大功能,帮助我们找到了将等离激元造成的光损失减少一半的方法。”

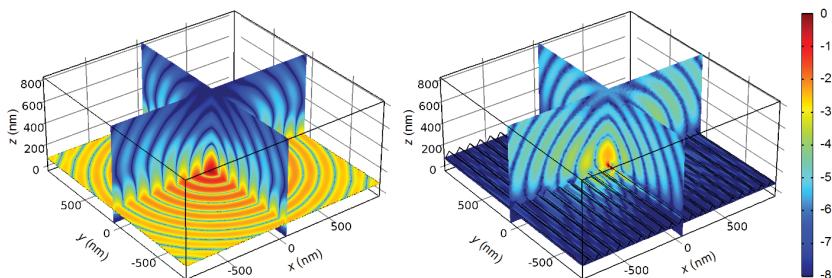


图 5. COMSOL® 软件的仿真结果显示了分别采用平面结构(左图)和纳米光栅结构(中间图)的偶极发射分布情况。光强经过归一化处理后以对数形式绘制。右图显示了几种纳米光栅阴极设计的偶极发射图案。

