

# 新一代发光材料技术破解OLED“不可能三角”

当前,全球面板头部企业竞相投资建设高世代(如8.6代)OLED产线,在面板显示面积扩大的同时,对屏幕核心发光材料的效率、功耗、发光均匀性、使用寿命、抗衰减能力等方面也提出了全方位升级的要求。这一系列挑战,最终指向OLED行业困扰多年的“不可能三角”难题——即同时实现高发光效率、高色纯度与长使用寿命。

随着高世代OLED量产进程加速,这一行业共性难题亟待破解,发光材料技术迭代进程也随之提速。日前,由清华大学与江苏三月科技股份有限公司(以下简称“三月科技”)联合研发的第四代OLED核心材料——磷光辅助热活化敏化荧光(pTSF)技术已在维信诺面板上实现量产商用,将这一新技术推向大众视野。OLED核心发光材料的技术突破或将从根本上重塑显示画质、使用寿命与成本规则的底层逻辑,让“不可能”变为“可能”。

## OLED面板对发光效率需求提升

从主要生产手机屏幕的第6代产线,迈向瞄准平板、笔记本电脑和电视的第8.6代(G8.6)产线,高世代面板绝非简单的尺寸放大。它像一面“放大镜”,将此前可能被忽略的材料性能短板成倍地凸显出来。

“随着显示面积大幅增加,OLED面板对发光效率的需求显著提升,这不仅关系到终端产品的功耗控制,还直接影响大尺寸面板的散热效果。”清华大学化学系教授段炼指出,屏幕越大,发光时产生的热量就越多,若材料效率低下,将导致严重的散热难题和可靠性风险。

更大的挑战来自“一致性”。当屏幕面积扩展数倍,如何确保屏幕中心与边缘的色彩、亮度均匀如一?这对材料的成膜均匀性和批次稳定性提出了毫米乃至纳米级的精度要求。“面板发光均匀性是影响视觉体验的关键,要求材料在不同区域的发光强度、色坐标保持高度一致。”三月科技创始人、技术负责人李崇博士强调。此外,用户对大尺寸产品的使用寿命预期更高,这倒逼材料的化学稳定性和抗衰减能力必须同步升级,以应对更长的使用周期。

而OLED发光材料的“不可能三角”,即发光效率、色纯度与器件使用寿命三者难以同时达到理想水平,通常提升效率可能导致色纯度下降或器件使用寿命缩短,追求高色纯度和器件长使用寿命又可能牺牲效率,这一矛盾长期制约着OLED向更大尺寸、更高性能普及。

北京鼎材科技股份有限公司OLED事业部总经理刘嵩强调,随着高世代OLED量产进程加速,OLED发光材料打破“不可能三角”难题也需尽快提上日程。



伴随着中国OLED显示面板产能的不断释放,我国的OLED上游原材料得到了长足的发展。以有机发光材料为例,其国产配套比例由2020年不足10%,到现在已经达到40%左右。

## 发光材料技术持续突破

而OLED发光材料技术的持续突破,或让“不可能”变得“可能”,不妨先来简要回顾OLED发光材料的发展历史。

第一代荧光技术作为OLED发光材料技术的发端,其分子结构稳定、成本低,至今仍是蓝光材料的主流方案。但受限于单线态激子发光原理,其理论内量子效率上限仅62.5%,效率不足成为明显短板。

为突破效率瓶颈,第二代磷光技术应运而生。“通过引入重金属原子,让单线态和三线态激子都能发光,理论内量子效率接近100%。”刘嵩表示,但重金属的使用推高了成本,且三线态激子辐射速率慢,导致蓝光、宽色域绿光材料使用寿命受限。

第三代TADF(热活化延迟荧光)技术通过精巧的分子设计(让三重态激子转化为单线态发光),同样能够实现100%理论效率,且无须依赖昂贵的重金属元素,有望显著降低材料成本。但这项技术产业化之路步履维艰,存在高亮度时效率低、稳定性差的缺点。

在此背景下,第四代pTSF技术脱颖而出。据清华大学段炼教授介绍,pTSF技术核心在于构建一个由“TADF特性主体材料+磷光敏化剂+窄谱荧光发光材料”组成的精密协作体系。在这个体系中,三者各司其职:TADF主体负责高效收集和传递能量;磷光敏化剂充当高效的“定向能量桥梁”;最终由窄谱荧光染料发出高纯度的光。

“pTSF技术是融合了TADF材料和磷光材料敏化发光的新一代敏化发光技术,通过多通道的能量转移,实现主客体之间更加充分的能量传

递。”刘嵩解释道,这种“团队协作”模式,巧妙结合了磷光的高能量利用率和荧光的高稳定性与色纯度优势,直指“不可能三角”的核心矛盾。

实测数据印证了其突破性。据刘嵩透露,目前,基于pTSF技术所开发的绿光器件相比已经实用化的磷光器件,在相同色度下效率提升20%以上、使用寿命提升50%以上。

基于和清华的产学研合作,三月科技所开发的系列产业化材料的验证数据也显示,其pTSF材料在效率、使用寿命和色彩表现上全面优于第二代磷光材料,同时因减少对贵金属的依赖,在成本控制上展现出显著潜力。

## 中国构建自主技术壁垒

在这场抢占未来显示产业制高点的发光材料竞赛中,全球主要科技强国依据自身优势,选择了不同的切入路径。

日本作为TADF技术的发源地,九州大学最早提出相关概念,后续日本企业侧重纯TADF材料的分子设计与工艺优化,聚焦中小尺寸显示应用,专利布局集中在早期核心分子结构和基础应用场景;韩国依托下游面板产业优势,在TADF材料的产业化适配、批量生产稳定性控制方面进展较快,技术路线更倾向于“材料-器件-终端”协同开发,专利布局侧重应用层面的工艺改进;德国等欧洲国家则聚焦基础研究与特殊应用场景,在光物理机制研究、高端工业显示材料研发方面有深厚积累,专利布局偏向细分场景创新。

“而中国在该领域的发展呈现‘后发先至’的特点。”李崇分析。早在2011年,清华大学段炼教授便提出了TSF(热活化敏化荧光)技术的原理,

奠定了国内自主创新的基础。在后续与产业界的紧密合作中,研究团队发现了更优解。“在TSF的器件中,存在TADF材料亮态和暗态的循环,影响了器件的效率和使用寿命;而在发光层引入少量的磷光辅助敏化剂,可以打断该循环,实现器件性能的大幅提升。2014年,我们申请了pTSF技术专利,相比国外方案结构更简单实用。”段炼表示。

正是这种对技术的持续深耕和快速迭代能力,让中国团队在pTSF技术路线上抓住了时间窗口。目前,相关产学研联合体在该领域已累计申请发明专利超过300项,形成较为完整的知识产权保护体系,有效突破海外企业在传统磷光、纯TADF领域的专利封锁,构建自主技术壁垒。

2025年年底,维信诺作为面板厂商代表宣布pTSF技术的突破与量产,也是全产业链共同推动的结果。

“伴随着中国OLED显示面板产能的不断释放,我国的OLED上游原材料得到了长足的发展。以有机发光材料为例,其国产配套比例由2020年不足10%,到现在已经达到了40%左右。”刘嵩表示。

李崇指出,随着pTSF等自主技术的成熟,中国材料企业已从“跟随”进入“并跑”乃至“换道领跑”阶段,并开始吸引国际顶级面板企业的关注与合作。

## 一旦量产应用前景无限

pTSF技术的量产之路,曾遭遇双重“拦路虎”。其产业化瓶颈不仅在于材料本身需要达到99.9%以上的超高纯度,还涉及面板制造端的工艺适配。

“早期的pTSF技术成果需要面板客户对现有的蒸镀工艺进行一些改进,因此AMOLED面板厂商持观望态度。”刘嵩坦言。

然而,随着材料性能的持续迭代和以维信诺为代表的中国OLED面板厂商对“三源共蒸”等关键工艺的攻克,障碍被逐一扫清。成熟的材料生产体系和严格的品控,为规模化供应提供了保障。

业内人士普遍认为,一旦跨越量产门槛,pTSF等新一代材料的应用前景将豁然开朗,并将有力推动OLED向更多高端和严苛场景渗透:在高端电视领域,其高色纯度特性可助力实现更广的BT.2020色域标准,满足专业影音和内容创作的需求;在车载显示领域,优异的使用寿命、高温稳定性和全视角一致性,正契合智能座舱中控屏仪表盘等对安全与可靠性的极致要求;在IT产品领域(如笔记本电脑等),高效率与低功耗特性有助于打造更轻薄、续航更长的移动设备;此外,也为柔性、透明等创新显示形态提供了更优异的材料基础。

展望未来,发光材料的技术竞赛将进入更为复杂和深刻的阶段。刘嵩认为,未来OLED发光材料的竞争焦点仍然是知识产权的竞争,这包括围绕新发光原理的基础专利布局,以及随着器件结构日益复杂而产生的海量材料组合与应用专利。 据《中国电子报》作者:谷月

# 不用制冷剂的“冰柜”来了

## 全球首台零下绿色弹卡冷冻装置研制成功

在全球气候变暖危机日益严峻、制冷需求持续攀升的当下,传统冷冻技术因其高能耗与高排放问题,成为可持续发展道路上的“绊脚石”。香港科技大学教授孙庆平团队成功研发出全球首台能够达到零摄氏度以下的绿色弹卡冷冻装置,实现了低至零下12摄氏度的制冷效果。相关研究成果日前发表于《自然》。

“这项突破标志着绿色弹卡冷冻技术的应用范围从室内空调制冷扩展至要求更严苛的全球冷冻业。”论文通讯作者孙庆平表示,该“冰柜”采用无需传统制冷剂的零排放创新技术,为冷冻业的绿色低碳转型提供了切实可行的“中国方案”,为全球应对气候变化贡献了科技力量。

## 直面冷冻业“脱碳”难题

据统计,全球氢氟烃类制冷剂的年排放量在2025年可能超过12亿吨二氧化碳当量,其中约27%来自零下摄氏度以下的冷冻应用,冷冻业的“脱碳”需求迫在眉睫。

弹卡冷冻技术摒弃了传统气体制冷剂,利用镍钛形状记忆合金在受到循环应力时发生固态相变,吸收或释放大潜热的特性来制冷,具备零直接排放与高能效潜力两大优势。然而,长期以来,该技术仅能应用于高于零摄氏度的空调温区。如何让其进入低于零摄氏度的冷冻市场,成为学术界与产业界亟待攻克的难题。

香港科技大学研究助理教授周国安介绍,团队的此次“破冰”体现在材料、传热流体及制冷结构的精心设计上。在材料选择方面,团队选用高镍含量的二元镍钛合金,并通过成分调控将奥氏体结束温度降至零下20.8摄氏度。这种合金在低至零下20摄氏度的环境里,依然能够展现出优异的超弹性和显著的相变潜热,有效工作温窗宽达48.5摄氏度,为制冷提供了强大的材料基础。

传热流体的选择同样至关重要。团队采用的传热物质与镍钛合金表面具有良好的湿润性,能够降低接触热阻,显著提升传热效率。

在制冷结构设计上,设备采用了压缩式主

动回热布雷顿循环,回热器由8个管状镍钛合金单元级联构成,每个单元包含三个薄壁管结构。这种独特的设计扩大了传热面积与体积比,确保了制冷过程的稳定性和高效性。

基于这些创新,一台体积为0.25立方米的桌面型原理样机诞生了。测试结果显示,在1赫兹运行频率下,绿色弹卡冷冻装置成功实现了从约24摄氏度室温到零下12摄氏度冷源的跨越,首次突破零下大关。

## 跨越“三重”挑战

孙庆平指出,将弹卡冷冻技术推入零下,绝非易事。这是一次对材料科学、热力学与机械工程极限的挑战。

首先是材料。传统形状记忆合金的相变温度较高,在零下环境会“失活”,丧失超弹性与潜热释放能力。如何在保证材料机械强度、抗疲劳寿命的前提下,通过原子尺度的成分设计,将其相变温度窗口大幅下移,是第一座需要翻越的“雪山”。孙庆平团队通过对镍钛合金配比的精准把握,成功找到了能在零下“起舞”的合金配方。

其次是热管理。在零下低温区,传热流体的选择变得异常苛刻。它必须兼具低凝固点、高流动性、高热容和高导热性,同时还要与合金材料“相处融洽”,不能腐蚀或产生过高热阻。

普通水或乙二醇溶液已无法满足要求。为此,孙庆平团队选择氯化钙水溶液,体现了他们在传热介质领域的巧妙构思。

最后是结构与系统集成。弹卡制冷依赖于对合金材料施加循环的机械应力。在低温、高频的严苛工况下,如何设计一种既能将应力均匀、高效地传递给每一个合金单元,又要确保结构自身在长期循环载荷下不变形、不疲劳的机械结构,这对机械设计与制造工艺提出了极高要求。团队开发的级联式薄壁管结构及其高达900兆帕的均匀承压能力,正是攻克此关键的钥匙。

据介绍,在户外实测中,绿色弹卡冷冻装置产生的低温流体成功将一个小型隔热腔室的空气温度在60分钟内稳定在零下4摄氏度,并在两小时内将20毫升水完全冻结成冰,证明了其高效冷冻能力。

## 有望重塑冷冻业格局

“我们正积极推动技术的商业化。”为实现这一目标,孙庆平团队将借助形状记忆合金材料、制造工艺、热力学设计及系统工程技术的不断进步,优化弹卡冷冻系统的效率、功率密度和成本竞争力。通过持续研发和创新,团队希望能够实现更大的冷冻功率、更高的效能,使这项技术更好地满足市场需求。

绿色弹卡冷冻装置的成功研制从原理上验证了零排放冷冻技术的可行性,为全球淘汰高GWP(全球变暖潜能值)制冷剂提供了极具竞争力的技术备选方案。据团队估算,该技术一旦在全球冷冻领域获得广泛应用,每年有望减少约3.3亿吨二氧化碳当量的温室气体排放,成为实现全球气候目标的重要力量。

“随着全球对氢氟碳化物的管控日趋严格,这项零排放、低耗能的弹卡冷冻技术有望从根本上重塑冷冻业的格局。”孙庆平认为,该研究成果预示着人类在获取低温的征途上,找到了一条与地球生态和谐共生的新路。

据《中国科学报》作者:朱汉斌

## ► 科工前沿

## 中国科研人员攻克芯片散热世界难题

长期以来,半导体面临一个难题:人们知道下一代材料的性能会更好,却往往不知道如何将它制造出来。西安电子科技大学领军教授周弘比喻道:“就像我们都知道怎么控制火候,但真正把握好却不容易。”西安电子科技大学郝院士、张进成教授团队在这一核心难题上实现了历史性跨越——团队将材料间的“岛状”连接转化为原子级平整的“薄膜”,使芯片的散热效率与综合性能获得了飞跃性提升。这一成果打破了近20年的技术停滞,更在国防与前沿科技领域展现出巨大潜力,相关成果近日发表在国际学术期刊《自然·通讯》与《科学·进展》上。

在半导体器件中,不同材料层之间的界面质量直接决定其整体性能,特别是在以氮化镓为代表的第三代半导体和以氧化镓为代表的第四代半导体中,一个关键挑战在于如何将它们高效、可靠地集成在一起。

传统方法使用氮化铝作为中间的“黏合层”,但“黏合层”在生长时,会自发形成无数不规则且凹凸不平的“岛屿”。“这就像在凹凸不平的堤坝上修建水渠,‘岛状’结构表面崎岖,就会导致热量在界面传递时阻力极大,形成‘热堵点’。”周弘解释,热量散不出去,就会在芯片内部累积,最终导致性能下降甚至器件烧毁。

该团队的突破在于从根本上改变了氮化铝层的生长模式。他们开发出“离子注入诱导成核”技术,将原来随机、不均匀的生长过程,转变为精准、可控的均匀生长。这项工艺使氮化铝层从粗糙的“多晶岛状”结构,转变为原子排列高度规整的“单晶薄膜”。

这一转变带来了质的飞跃,平整的单晶薄膜大大减少了界面缺陷,热量可快速通过缓冲/成核层导出。实验数据显示,新结构的界面热阻仅为传统“岛状”结构的三分之一。

这项材料工艺革新解决了从第三代到第四代半导体都面临的共性散热难题,为后续的性能爆发奠定了关键基础。

周弘表示,这项研究成果的核心价值在于,它成功将氮化铝从一种特定的“黏合剂”,转变为一个可适配、可扩展的“通用集成平台”,为解决各类半导体材料高质量集成的世界性难题,提供了可复制的中国范式。 据《光明日报》作者:张哲浩 李浩