

文章编号 1004-924X(2025)20-3228-11

阶梯式聚磁永磁定位磁针设计与试验

刘 强^{1,2}, 宋仕辉^{1*}, 牛萍娟², 陈云喆², 俞建荣³

(1. 北京石油化工学院 精密电磁装备与先进测量技术研究所, 北京 102617;

2. 天津工业大学 分离膜与膜过程国家重点实验室, 天津 300387;

3. 福州水影流芯科技有限公司, 福建 福州 350000)

摘要:为提升 Mini/Micro LED 芯片流磁巨量转移中永磁定位阵列磁针的磁密峰谷效应, 提出了一种阶梯式聚磁永磁定位磁针。针对该阶梯式聚磁永磁磁针结构, 建立了包含非线性退磁效应和磁路饱和特性的多阶等效磁路模型, 以及考虑芯片运动特性和流固耦合作用的力学动态模型。在此基础上, 以提升磁场峰谷变化率和峰谷变化速率为核心目标, 借助有限元分析软件对磁针各阶高度与直径参数进行了分步参数化仿真, 确定了特定几何尺度及工艺约束下高性能磁针的最优三维结构参数。基于优化结果研制了一台磁针样机, 并通过磁针磁密测量试验和巨量转移试验验证了优化结果的有效性。结果表明, 优化后的磁针磁密峰谷变化率 δ 达到 82.3%, 峰谷变化速率 ζ 达到 44.8 mT/mm, 分别提升了 20.1% 和 28.7%。在 180 mm × 160 mm 的接收基板上进行了 4 500 颗芯片的流磁巨量转移实验, 转移时间仅为 3 min, 相较于现有方案用时减少了 40%。

关 键 词: 巨量转移; 阶梯式结构; 动态模型; 磁场优化

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253320.3228

CSTR: 32169.14.OPE.20253320.3228

Design and experiment of stepped polymagnetic permanent magnet positioning magnetic needle

LIU Qiang^{1,2}, SONG Shihui^{1*}, NIU Pingjuan², CHEN Yunzhe², YU Jianrong³

(1. Institute of Precision Electromagnetic Equipment and Advanced Measurement Technology,
Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. State Key Laboratory of Separation Membranes and Membrane Processes, Tiangong University,
Tianjin 300387, China;

3. Fuzhou Shuiyingliuxin Technology Co., Ltd, Fuzhou 300387, China)

* Corresponding author, E-mail: 15049053458@163.com

Abstract: To improve the magnetic density peak-to-valley effect of the permanent magnet positioning array magnetic needle in the fluid magnetic mass transfer of Mini/Micro LED chips, a stepped polymagnetic permanent magnet positioning magnetic needle was proposed. For this stepped polymagnetic permanent magnet needle structure, a multistage equivalent magnetic circuit model incorporating nonlinear demagnetization effects and magnetic circuit saturation characteristics, as well as a mechanical dynamic model consid-

收稿日期: 2025-07-30; 修订日期: 2025-08-18.

基金项目: 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划资助项目 (No. BPHR20220110)

ering chip motion characteristics and fluid-structure interaction, were established. Based on this, with the core objectives of improving the magnetic field peak-to-valley change rate and peak-to-valley change speed, the height and diameter parameters of each stage of the magnetic needle were subjected to step-by-step parametric simulation using finite element analysis software. This determined the optimal three-dimensional structural parameters for a high-performance magnetic needle under specific geometric scale and process constraints. A prototype magnetic needle was developed based on the optimization results, and the effectiveness of the optimization was verified through magnetic needle magnetic density measurement tests and mass transfer tests. The results show that the optimized magnetic needle achieved a magnetic density peak-to-valley change rate δ of 82.3% and a peak-to-valley change speed ζ of 44.8 mT/mm, representing improvements of 20.1% and 28.7%, respectively. A fluid magnetic mass transfer experiment involving 4 500 chips was conducted on a 180 mm $\times$ 160 mm receiving substrate, with a transfer time of only 3 minutes, reducing the time by 40% compared to existing solutions.

Key words: mass transfer; stepped structure; dynamic model; magnetic field optimization

1 引 言

随着显示技术的发展,微型发光二极管(Mini/Micro LED)作为继液晶显示器和有机发光二极管之后的新一代LED技术,与前代技术相比具有亮度高、响应快、功耗低、寿命长、色彩还原度高等优点^[1-4],为高效率、大批量生产提供了强大动力。Mini/Micro LED的RGB芯片需要从不同的基板上生成,在生长后完成芯片在基板间的转移^[5]。因芯片尺寸微小且数量巨大,相较于传统技术需要更高的转移精度和更快的转移速率。目前业内为解决转移精度和速率的问题,尝试了多种解决方案以提高效率和降低成本^[6-9],这些方案通常借助物理化学作用实现芯片从生长基板到接受基板的批量转移,该技术统称为巨量转移技术,是Mini/Micro LED制造的主要瓶颈之一。

巨量转移的技术策略可按视觉系统、生长基板和接受基板的纵向空间位置是否一致,分为测转共位技术和测转非共位技术两类。当前巨量转移的主流策略是拾取放置技术^[10-11],其中的转移非共位技术如摆臂式技术,存在不可避免的不共位行程问题^[12],转移共位技术如测量非共位的针刺技术、印章技术,以及测量共位的激光释放技术等则无此问题。针刺技术的点对点转移存在效率低,速度慢的问题^[13]。印章技术通过滚轴完成芯片与接受基板的直接接触,能够达到较高良率,然而随着滚轴的复用造成

误差积累,导致精度会不断降低^[14]。激光释放技术利用激光形成气泡弹出,将选定芯片与印章分离,从而实现高传输速率,但分离成功率较低,导致良率不足^[15]。非主流技术策略包括测转非共位的化学剥离技术和测转共位的激光剥离技术,它们通过氢氟酸腐蚀或激光烧蚀实现芯片从原基板的脱落^[16-17]。然而,随着基板尺寸的扩大,化学剥离的空间非均匀性^[18]和激光烧蚀的热累积效应^[19]导致良率大幅降低,因此只能用于制备小面积基板。目前最前沿的自组装技术利用流体作为传输介质,通过芯片的疏水力或亲水力进行位姿调节,能够同时保证良率和速率,属于测转共位技术,是发展前景最广、理想产能最高的巨量转移方案之一^[20]。其中流磁巨量转移通过流场运载和磁场牵引,实现高精度定位和转移,在实现测转共位的同时,采用流磁双系统驱动以提高效率,是巨量转移的可靠发展方向。

流磁巨量转移的原理是利用流体运载芯片,借助磁针精准锁附芯片,采用视觉系统识别和校正芯片^[21]。因此,转移机理、磁针、磁性芯片是流磁巨量转移的三大技术核心。其中,磁针的定位牵引能力是决定芯片转移速率和良率的关键。文献[22]提出了利用磁体阵列和流场共同作用实现芯片到接受基板的转移过程,是磁针概念的雏形。文献[23]提出了一种磁力摆正、流体顺正的巨量转移,正式进行了磁针的使用,但方案中采用的通电螺线管对磁针磁场造

成了干扰。文献[24]提出了一种永磁磁场和电磁磁场耦合的磁针,精准控制磁针磁力以保证芯片姿态不翻转。但该方法中磁针产生的高磁密值的区域过大,难以精确控制芯片落点,需要进行多次校正操作提高良率,降低了巨量转移的效率。文献[25]通过加工方式优化了磁针的加工效率,但未对磁针结构进行有效调整。本文提出了一种阶梯式聚磁永磁定位磁针,通过对磁针的阶梯式设计在磁针上方形成磁场更聚焦、峰谷效应更明显的磁场,确定磁针结构的优化方案,并借助有限元进行优化。在此基础上,对设计出的磁针进行实验测试,验证其磁密分布及芯片转移效果。

2 磁针方案

圆柱形磁针只能实现导磁效果,无法实现聚磁效果,如图 1(a)所示。锥形磁针和圆台形磁针存在变截面和倾斜曲面结构,在小尺寸维度下对

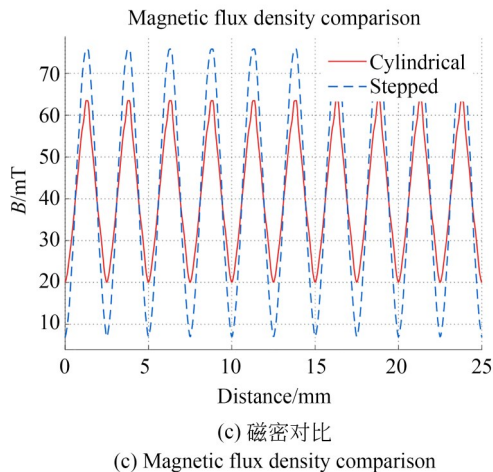
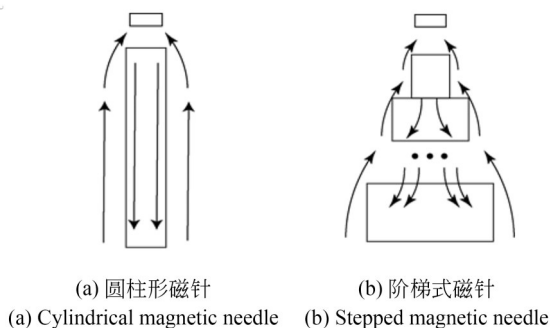


图 1 聚磁效果对比

Fig. 1 Comparison of the magnetic gathering effect

永磁体类脆性材料进行此类加工会产生崩边和裂纹。阶梯式磁针结构可压缩磁感线分布,实现无偏置聚磁效果,磁针自下而上直径逐阶减小,如图 1(b)所示。这种结构迫使磁场向尖端聚集,形成显著的高梯度磁场(如图 1(c)所示),使磁场在磁针尖端处最大,而在相邻磁针之间的谷区则迅速衰减。因此,多阶结构相较于单阶圆柱形磁针能够实现更强的聚磁效果,显著提升磁针对芯片的精准锁附能力。

永磁定位磁针阵列的整体结构主要包括磁针底座、永磁层、导磁层和位于其上方的聚磁针体,如图 2 所示。其工作原理是:永磁层产生磁场,该磁场经导磁层传导后,被磁针聚焦增强。聚焦后的强磁场将上方载具中的芯片精准吸引至针尖位置,随后流体作用将芯片摆正,以便进行后续焊接。为此,需要确保磁场在针尖处足够强以有效吸附芯片,而在非尖端区域足够弱,避免干扰流体对非目标区域芯片的冲刷作用。这种磁场强度在空间上呈现显著高峰与低谷的特征,称为峰谷效应。

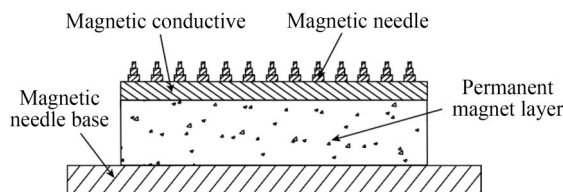


图 2 多阶聚磁永磁定位磁针结构图

Fig. 2 Structure diagram of multistage concentrating permanent magnet positioning magnetic needle

3 磁路和力学分析

永磁定位磁针的核心目标是建立高强度、高梯度、聚焦且稳定的磁场,以满足定位精度、作用距离和抗干扰能力的要求。为提高巨量转移速率,需要针对磁针磁通密度的分布特性,建立磁针系统的等效磁路模型和芯片运动动力学模型,识别模型中的核心变量及其可行域,进而优化结构参数并验证阶梯式聚磁方案的性能优势。

3.1 磁路分析

文献[24]已经证明,在芯片参数确定的前提

下,要确定磁针对芯片的作用力大小和分布情况,只需获取磁针在芯片处的气隙磁密 B 值。然而,文献[24]仅针对圆柱形磁针进行了磁路分析。针对本文提出的多阶磁针结构,采用等效磁路法,选取三枚磁针单元建立多阶磁路数学模型。

在多阶磁针模型中,每一阶磁针均可由下至上视为不断减小的内阻。考虑磁路饱和效应,建立多阶磁针等效磁路,如图3和图4所示。图中 F_{pm} 为永磁体的磁动势, R_{pm} 为其内阻。 R_m 为导磁体的磁阻, $R_{r1} \sim R_m$ 为磁针第1阶至第 n 阶的磁阻。 R_u 和 R_d 分别为上、下气隙区域的磁阻, R_a 为磁针两侧气隙区域的磁阻。

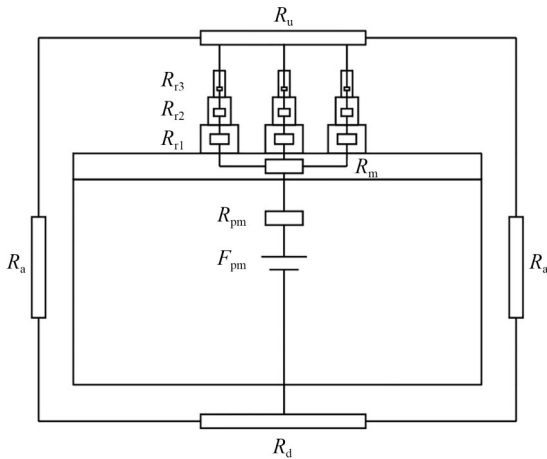


图3 磁针磁路

Fig. 3 Magnetic needle magnetic circuit

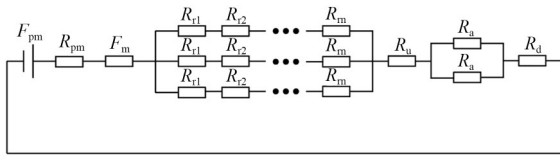


图4 等效磁路

Fig. 4 Equivalent magnetic circuit

根据等效磁路图可计算出磁通量 Φ :

$$B_{ri} = \frac{4H_c h_{pm} (1 - B_{pm}/B_r)^\alpha}{\pi [\Lambda(pm) + \Lambda(m) + \sum_{i=1}^n \frac{h_{ri}}{3\mu_0 \mu_{sat} \tanh(B_{ri}/B_{sat}) A_{ri}} + \mu_u \Lambda(u) + \mu_a \Lambda(a)/2 + \mu_d \Lambda(d)] D_i^2}, \quad (5)$$

$$B_a = \frac{4H_c h_{pm} (1 - B_{pm}/B_r)^\alpha}{\pi [\Lambda(pm) + \Lambda(m) + \mu_u \Lambda(u) + \mu_a \Lambda(a)/2 + \mu_d \Lambda(d)] D_a^2}. \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{F_{pm}}{R_{pm} + R_m + \sum_{i=1}^n \frac{R_{ri}}{3} + R_u + \frac{R_a}{2} + R_d}. \quad (1)$$

定义算子 $\Lambda(x) = \frac{1}{\mu_0 \mu_x A_x} \int_0^{h_x} dh$, 对式中各项进行计算建立的初始模型如下:

$$\begin{cases} F_{pm} = \mu_0 \mu_{pm} A_{pm} H_c \Lambda(pm) \\ R_{pm} = \Lambda(pm), R_m = \Lambda(m) \\ R_{ri} = \Lambda(ri), R_a = \mu_a \Lambda(u) \\ R_a = \mu_a \Lambda(a), R_d = \mu_d \Lambda(d) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: H_c 为永磁体矫顽力; μ_0 为真空磁导率; h_{pm} , μ_{pm} , A_{pm} 分别为永磁体的磁化长度、相对磁导率、截面面积; h_m , μ_m , A_m 分别为导磁体的磁化长度、相对磁导率、截面面积; h_{ri} , μ_{ri} , A_{ri} 分别为第 i 级磁针的磁化长度、相对磁导率、截面面积; h_u , h_a , h_d 分别为磁针上方、磁针两侧、绕磁针一周的气隙中磁力线经过长度。

考虑永磁体的退磁曲线非线性特性,引入实际磁通密度 B_{pm} 、剩余磁通密度 B_r 和表征退磁曲线斜率变化的拟合参数 α ,则磁动势的表达式改为:

$$F_{pm} = H_c h_{pm} \left(1 - \frac{B_{pm}}{B_r}\right)^\alpha. \quad (3)$$

考虑磁路饱和效应,引入饱和磁导率 μ_{sat} 和饱和磁通密度 B_{sat} ,则磁针各阶磁阻的表达式改为:

$$R_{ri} = \frac{h_{ri}}{\mu_0 \mu_{sat} \tanh(B_{ri}/B_{sat}) A_{ri}}. \quad (4)$$

定义各阶磁针上表面直径为 D_i ,相邻磁针间气隙单位面积为 D_a ,则各阶磁针的磁通密度 B_{ri} 如式(5)所示,气隙位置的磁通密度 B_a 如式(6)所示。可以看出,相较于文献[23]中的磁针,磁路模型增加了磁针各阶尺寸对磁通密度分布的影响。通过两式可知, $B_{ri} \propto 1/D_i^2$, $B_a \propto 1/D_a^2$,减小磁针高阶直径可显著提升尖端磁密梯度。

3.2 力学分析

在磁针工作过程中,可根据芯片运动状态将其分为远场趋近、梯度捕获、精准锁定三阶段。在三阶段中,芯片受到磁针和流体的动态作用。文献[24]仅针对静态芯片的受力进行了分析,未考虑运动状态下芯片的受力变化和流体对芯片的影响。为此,本文综合考虑磁力随芯片位置的变化和芯片所受流场力,构建了力学动态模型。

根据芯片在流场中的运动建立坐标系,以流体流动方向为X轴正向,垂直向下方向为Z轴正向,受力方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\text{fluid}} + F_{\text{mag},x} + F_{\text{drag},x} \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{\text{grav}} + F_{\text{mag},z} - F_{\text{buoy}} - F_{\text{drag},z} \end{cases}, \quad (7)$$

其中: m 为芯片质量, F_{fluid} 为流体推力, $F_{\text{mag},x}$ 和 $F_{\text{mag},z}$ 为磁力在X方向和Z方向的分力, $F_{\text{drag},x}$ 和 $F_{\text{drag},z}$ 为斯托克斯阻力在X方向和Z方向的分力, F_{grav} 为芯片重力, F_{buoy} 为芯片所受浮力。忽略流体旋转效应,芯片的各项受力为:

$$\begin{cases} F_{\text{fluid}} = \frac{1}{2} C_D \rho_f A u_f^2 \\ F_{\text{mag},x} = m_x \frac{\partial B_x}{\partial x} \\ F_{\text{mag},z} = m_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \\ F_{\text{drag}} = 6\pi\eta R v_{\text{rel}} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: C_D 为阻力系数,低速球体绕流雷诺数小于1时取0.47, ρ_f 为流体密度, A 为芯片投影面积, u_f 为流体速度, m_x 和 m_z 为芯片在X方向和Z方向的磁矩分量, B_x 和 B_z 为X方向和Z方向磁场强度, F_{drag} 为斯托克斯阻力, η 为流体黏度, R 为芯片等效半径, v_{rel} 为相对速度。在远场趋近阶段,磁力可忽略,芯片以流速运动,运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} C_D \rho_f A u_f^2 - 6\pi\eta R \left(\frac{dx}{dt} - u_f \right) \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = (m - \rho_f V) g - 6\pi\eta R \frac{dz}{dt} \end{cases}. \quad (9)$$

在梯度捕获阶段,磁力主导横向定位,运动

方程中磁力项显著影响轨迹,运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = m_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{C_D \rho_f A u_f^2}{2} - 6\pi\eta R \left(\frac{dx}{dt} - u_f \right) \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = m_z \frac{\partial B_z}{\partial z} + (m - \rho_f V) g - 6\pi\eta R \frac{dz}{dt} \end{cases}. \quad (10)$$

在精准锁定阶段,强磁场梯度使芯片快速沉降至磁针尖端,运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = m_x \frac{\partial B_x}{\partial x} - 6\pi\eta R \frac{dx}{dt} \\ \frac{dz}{dt} = \frac{m_z}{6\pi\eta R} \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{cases}. \quad (11)$$

引入核心参数水平磁场梯度 $\zeta_x = \Delta B_x / \Delta x$ 和垂直磁场梯度 $\zeta_z = \Delta B_z / \Delta z$,根据运动方程可知,捕获时间 $t_c \propto 1/\zeta_x$,沉降时间 $t_s \propto 6\pi\eta R h / m_z \zeta_z$ 。在设计过程中,需实现高 ζ_x 以进行快速X向定位,高 ζ_z 以实现快速Z向沉降。

4 磁针设计

阶梯式磁针中永磁体、导磁体、磁针的轴向尺寸参数,通过改变磁路饱和程度来调节磁通密度的峰谷变化率,进而影响磁针抓取芯片的快速性和稳定性等动态响应特性。而各阶磁针的直径及相邻磁针间气隙的横向尺寸参数,则决定了磁针各级位置及气隙位置磁通密度的峰谷变化速率,进而影响磁针芯片的抓取精度。因此,本文分别从磁针高度和磁针直径这两个关键的结构参数维度对磁针进行磁场分析和优化设计,以实现磁场性能的整体优化。

4.1 设计要求

根据磁路分析与微装配工艺要求,磁针参数需同时满足磁场性能、结构稳定性和工艺可实现性三重约束,具体参数要求如下:

(1) 磁针间距:2.5 mm。

基板芯片间距(Pitch)为2.5 mm,磁针需与芯片阵列严格匹配,以实现精准定位。

(2) 磁场峰谷值:峰值 >60 mT,谷值 <20 mT。

基于磁路和力学分析,在梯度捕获阶段和精准锁定阶段,磁力需显著大于重力、浮力、流体阻力及流体扰动的合力,以实现快速、可靠的沉降锁定。峰值 >60 mT是确保磁力在毫秒级时间

内克服阻力完成可靠沉降的下限要求。

在谷区,残余磁力必须远小于流体推力,以确保芯片能被流体有效推动,避免被错误吸附。仿真和实验表明,当谷值>20 mT时,残余磁力梯度会导致芯片在非目标区域出现不可忽略的滞留现象。

(3) 磁针整体高度不大于 1 mm。

磁针的磁场强度随距离增大而急剧衰减,同时需要穿透底部基板并在目标工作点达到要求的峰谷值。限制磁针高度小于 1 mm 是保证磁场在目标位置仍有足够强度的物理约束。

(4) 磁针最大直径不大于 0.5 mm。

谷区磁密主要由相邻磁针的漏磁耦合贡献,磁针直径增大则导致谷区宽度减小,显著增强耦合,限制磁针最大直径是优化磁路效率,提升尖端性能的基础。直径过小对加工精度要求提高,且影响结构强度。0.5 mm 是满足磁场性能和加工可行性的折中上限。

(5) 磁场密度峰谷变化率大于 75%,峰谷变速率大于 40 mT/mm。

为直观表达磁场磁密峰谷值变化的情况,将垂直磁场梯度和水平磁场梯度量化为峰谷变化率 $\delta(\%)$ 和峰谷变化速率 $\zeta(\text{mT/mm})$,表达式为

$$\left\{\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \times 100\% \\ \zeta &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{\max} - B_{\min}}{\Delta x}\end{aligned}\right., \quad (12)$$

其中: $B_{\max}$ 和 $B_{\min}$ 分别为磁针磁密的最大值和最小值, n 为磁针数量, Δx 为磁针磁密的最大值和最小值所在位置之间的距离。

高峰谷变化率是实现芯片只在目标尖端被强吸附和在非目标区域易被流体冲刷的基础, $\delta>75\%$ 确保了显著的峰谷差异。峰谷变化速率决定芯片从进入作用范围到精确定位所需要的总时间, $\zeta>40 \text{ mT/mm}$ 提供足够大的磁场梯度来驱动快速沉降和快速横向定位。

4.2 磁针阶数

采用钕铁硼作为永磁层材料,电工纯铁作为导磁层及磁针材料,针对磁针的磁场分布进行方案设计。受磁针高度和直径限制,阶梯数过多会导致磁针刚度急剧下降,而二/三阶设计可以在保证刚度的前提下,通过改变尺寸优化磁场分布特性。为选定阶梯式磁针的阶数,以圆柱形磁针作为对比基础,对二阶磁针和三阶磁针方案进行初始设计。圆柱形定位磁针尺寸如表 1 所示,二阶和三阶磁针尺寸分别如表 2 和表 3 所示,表中 I, II, III 分别代表第一阶、第二阶、第三阶磁针。

采用数值分析法,通过 ANSYS 软件对二阶和三阶磁针进行有限元分析,并将磁针上方 1 mm 处气隙磁密和圆柱形磁针进行对比,如图 5 所示。

根据仿真结果,圆柱形磁针的峰谷变化率 δ 为 68.5%,峰谷变化速率 ζ 为 34.8 mT/mm;二阶

表 1 圆柱形定位磁针尺寸

Fig. 1 Cylindrical magnetic needle initial design dimensions (mm)

参数名称	磁钢长度	磁钢宽度	磁钢高度	导磁体长度	导磁体宽度	导磁体高度	磁针直径	磁针高度	两磁针间距
数值	50	30	5	50	30	0.3	0.2	0.6	2.5

表 2 二阶磁针初始设计尺寸

Fig. 2 Two-order magnetic needle initial design dimensions (mm)

参数名称	磁钢长度	磁钢宽度	磁钢高度	导磁体长度	导磁体宽度	导磁体高度	磁针直径 I	磁针高度 I	磁针直径 II	磁针高度 II	两磁针间距
数值	50	30	5	50	30	0.3	0.2	0.3	0.1	0.3	2.5

表 3 三阶磁针初始设计尺寸

Fig. 3 Three-order magnetic needle initial design dimensions (mm)

参数名称	磁钢长度	磁钢宽度	磁钢高度	导磁体长度	导磁体宽度	导磁体高度	磁针直径 I	磁针高度 I	磁针直径 II	磁针高度 II	磁针直径 III	磁针高度 III	两磁针间距
数值	50	30	5	50	30	0.3	0.2	0.2	0.15	0.2	0.1	0.2	2.5

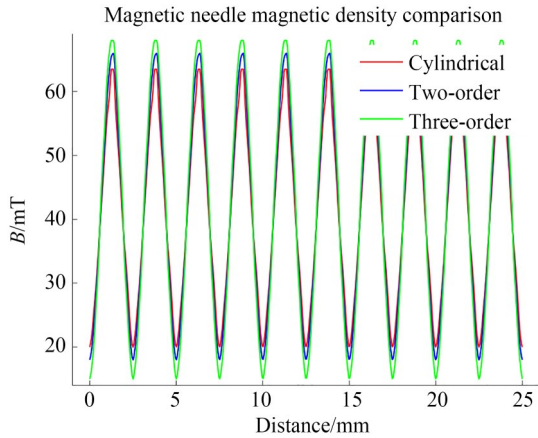


图5 磁针磁密对比

Fig. 5 Magnetic needle magnetic density comparison

磁针的峰谷变化率 δ 为72.7%,峰谷变化速率 ζ 为38.4 mT/mm;三阶磁针的峰谷变化率 δ 为77.9%,峰谷变化速率 ζ 为42.4 mT/mm。综合考虑实际应用需求和磁针磁密变化,选取三阶磁针进行进一步优化。由公式(5)和公式(6)可知,磁针各阶高度和直径对磁密的影响解耦。鉴于

交互作用不显著,采用分步优化以兼顾效率和性能。由于磁针的径高比限制,直径对高度有限制作用,高度对直径无影响,因此在进行高度优化后进行直径优化。

4.3 高度优化

为进一步提高磁针的峰谷变化率及峰谷变化速率,将三阶磁针的高度 h_1, h_2, h_3 作为核心设计变量,建立基于刚度约束的优化模型。

设置三阶磁针由下至上的高度分别为 h_1, h_2, h_3 ,根据磁针刚度限制,高度优化的可行域为:

$$\begin{cases} 0.5 \text{ mm} \leq h_1 + h_2 + h_3 \leq 1 \text{ mm} \\ h_3 \leq h_2 \leq h_1 \end{cases}$$

考虑底层磁针对磁场的主控作用和上层磁针工艺可实现性,对高度 h_1 在0.2~0.6 mm的范围内进行仿真,对高度 h_2 和 h_3 在0.2~0.3 mm的范围内仿真。通过构建模型,得到仿真结果如图6所示。综合考虑优化域和磁密要求,选择 h_1 高度为0.4 mm, h_2 高度为0.2 mm, h_3 高度为0.2 mm。

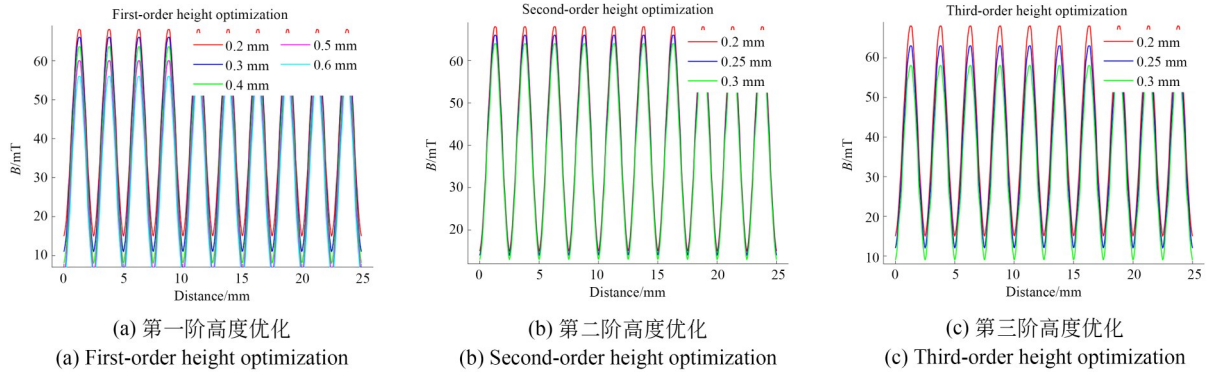


图6 磁针高度优化

Fig. 6 Magnetic needle height optimization

4.4 直径优化

磁通密度峰谷特性不仅与高度参数相关,还受到磁针直径梯度分布的显著影响。因此,将三级磁针直径 d_1, d_2, d_3 作为独立变量构建优化空间。

设置三阶磁针由下至上的直径分别为 d_1, d_2, d_3 ,根据磁路效应与机械加工精度的双重约束,确定直径可行域为:

$$\begin{cases} 0.2 \text{ mm} \leq d_1 \leq 0.3 \text{ mm} \\ 0.1 \text{ mm} \leq d_2 \leq 0.2 \text{ mm} \\ 0.1 \text{ mm} \leq d_3 \leq 0.2 \text{ mm} \\ d_3 < d_2 < d_1 \end{cases}$$

直径 d_1, d_2, d_3 步长均设置为0.05 mm,仿真结果如图7所示。结合磁密峰谷分布,优选 d_1, d_2, d_3 长度分别为0.3 mm,0.2 mm,0.1 mm。

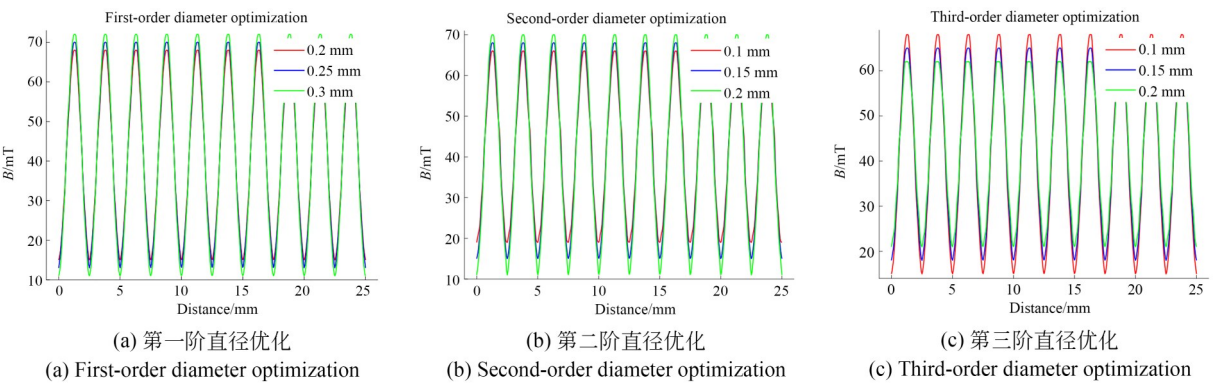


图 7 磁针直径优化

Fig. 7 Magnetic needle diameter optimization

4.5 优化结果

基于仿真计算结果,磁针最终优化尺寸如表 4 所示,最终优化磁针的仿真结果如图 8 所示。磁针上方磁场密度的峰值为 69 mT,谷值为 12 mT,满足设计要求。和文献[24]

中的圆柱形磁针相比,磁密峰谷变化率 δ 从 68.5% 提升至 82.6%,峰谷变化速率 ζ 从 34.8 mT/mm 提升至 45.6 mT/mm,分别提升了 20.6% 和 30.0%,磁密峰谷效应明显提升。

表 4 三阶磁针最终优化尺寸

Fig. 4 Three-order magnetic needle final optimized size (mm)

参数名称	磁钢长度	磁钢宽度	磁钢高度	导磁体长度	导磁体宽度	导磁体高度	磁针直径 I	磁针高度 I	磁针直径 II	磁针高度 II	磁针直径 III	磁针高度 III	两磁针间距
数值	50	30	5	50	30	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	2.5

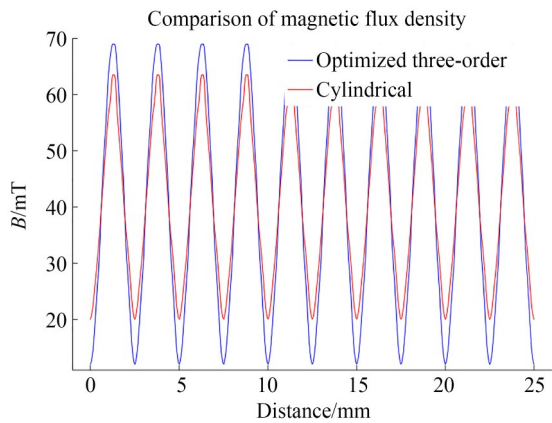


图 8 磁通密度对比

Fig. 8 Comparison of magnetic flux density

工,每颗仅进行单次加工以确保其同轴度,如图 9 所示。

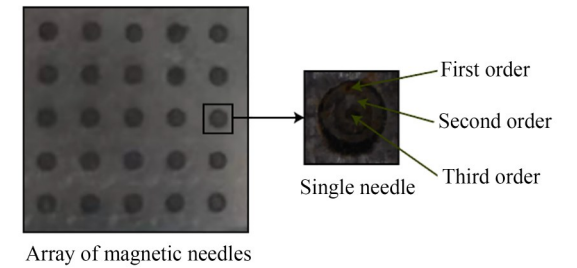


图 9 定位磁针

Fig. 9 Positioning magnetic needle

5 试验验证

根据最终优化尺寸,研制出一种阶梯式聚磁永磁定位磁针,采用雕刻手段完成三阶磁针加

对该磁针进行磁密测量试验和巨量转移试验,以验证其优化效果。

5.1 磁密测量试验

采用精密高斯计对磁针进行磁密测量,测量

位置为磁针上表面 1 mm 处,选取中心区域的 100 颗磁针进行测量。 X 方向和 Y 方向的单步扫描步长均设置为 0.05 mm,扫描步数为 600,采集磁密数据。最终磁密实测结果如图 10 所示,其表现趋势与公式(5)和公式(6)相一致。磁针上表面磁密峰值 $B_{\max}$ 为 68 mT,峰谷变化率 δ 为 82.3%,峰谷变化速率 ζ 为 44.8 mT/mm,与圆柱形磁针相比,分别提升了 20.1% 和 28.7%,基本与仿真数据吻合。

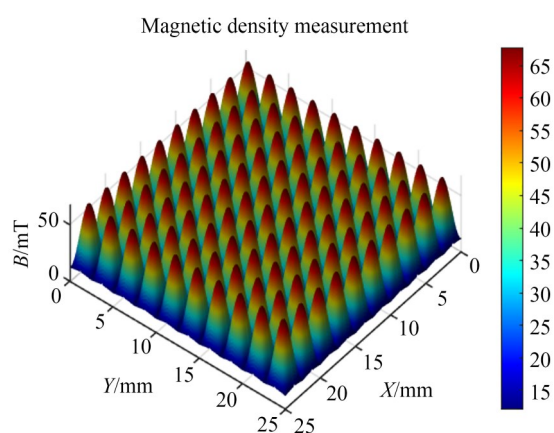


图 10 磁密测量

Fig. 10 Magnetic density measurement

5.2 巨量转移试验

采用流磁巨量转移实验工装开展芯片抓取试验,试验装置如图 11 所示。试验流程首先将芯片剥离至流场入口处,随后通过精确调节流体流量,实现芯片在水平方向的稳定匀速运动。

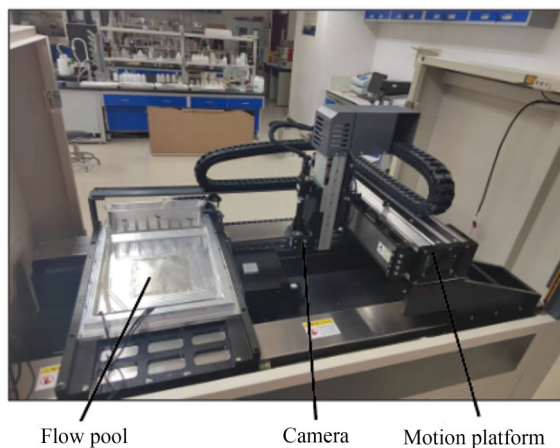


图 11 磁针抓取芯片工装

Fig. 11 Magnetic needle gripping chip tooling

在接受基板上方,通过定位磁针对芯片进行精准吸引,与此同时借助流体作用力进一步调整芯片的空间姿态。经过多次试验验证,芯片转移的结果如图 12 所示。本方案在没有通电线圈辅助的情况下,即可顺利完成芯片的精准抓取,从而显著简化了系统结构并降低了系统复杂度。

在 180 mm×160 mm 的接收基板上,顺利完成了 4 500 颗芯片的批量流磁巨量转移实验,转移过程仅耗时 3 min,展现了大规模并行转移的高效性与可行性。与采用圆柱形磁针的方案相比,用时减少了 40%。

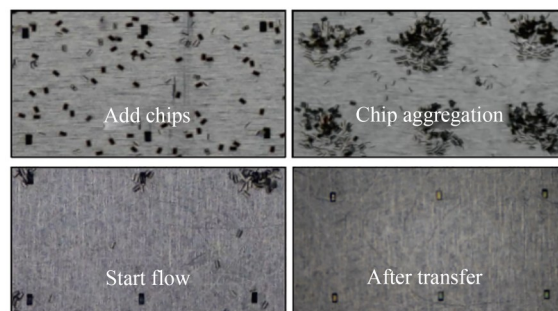


图 12 芯片吸引固定实验

Fig. 12 Chip suction fixation experiment

6 结 论

针对现有流磁巨量转移技术中磁针结构简单、定位能力差的问题,在现有磁针技术基础上,提出了一种阶梯式聚磁永磁定位磁针设备。通过阶梯式结构设计实现高效聚磁,从而增强磁针对芯片的定位能力和抓取能力。建立了阶梯式聚磁磁针的磁路模型和力学动态模型,并借助有限元软件对其各阶充磁高度及聚磁面积进行了设计和优化。基于优化后的磁针进行测试,通过磁场测量试验与巨量转移试验验证优化效果。根据实验结果,磁针上表面磁密峰值为 68 mT,谷值为 12 mT,磁密峰谷变化率 δ 为 82.3%,峰谷变化速率 ζ 为 44.8 mT/mm,分别提升了 20.1% 和 28.7%,转移用时减少 40%。磁场性能和巨量转移试验结果表明该磁针对芯片的抓取精度显著提升,能够有效提高流磁巨量转移的效率和良率,为 LED 市场提供有力的技术支持。

作者贡献声明:

刘 强:论文构思,方法论,获取资助,审核与编辑写作;

宋仕辉:论文构思,验证,可视化呈现,初稿

写作;

牛萍娟:调查研究,数据管理,项目管理;

陈云喆:调查研究,数据管理,项目管理;

俞建荣:指导,形式分析,提供资源。

参考文献:

- [1] MENG W Q, XU F F, YU Z H, *et al.* Three-dimensional monolithic micro-LED display driven by atomically thin transistor matrix [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(11): 1231-1236.
- [2] 乔健, 吴振铎, 彭信翰, 等. Micro-LED 芯片激光去除机理及工艺参数优化 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(9): 1360-1370.
QIAO J, WU Z D, PENG X H, *et al.* Mechanism for laser-induced damage bad chip of Micro-LED and optimization of processing parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1360-1370. (in Chinese)
- [3] LI L Z, LIU C B, SU Y Z, *et al.* Micro-LEDs: heterogeneous integration of microscale GaN light-emitting diodes and their electrical, optical, and thermal characteristics on flexible substrates [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3 (1) : 1870005.
- [4] 冯奇斌, 肖慧丽, 杨玲, 等. 用于超薄 MiniLED 背光模组的光学膜设计 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2548-2555.
FENG Q B, XIAO H L, YANG L, *et al.* Design of optical film for ultra-thin MiniLED backlight modules [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29 (11) : 2548-2555. (in Chinese)
- [5] KIM T I, JUNG Y H, SONG J Z, *et al.* High-efficiency, microscale GaN light-emitting diodes and their thermal properties on unusual substrates [J]. *Small*, 2012, 8(11): 1643-1649.
- [6] PARBROOK P J, CORBETT B, HAN J, *et al.* Micro-light emitting diode: from chips to applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15 (5): 2000133.
- [7] CHEN Z, YAN S K, DANESH C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54 (12) : 123001.
- [8] VIREY E H, BARON N, BOUHAMRI Z. 11-3: overlooked challenges for microLED displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 129-132.
- [9] 王伟, 赵甜甜, 刘强, 等. Mini/Micro LED 巨量转移技术研究与发展现状 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(2): 183-199.
WANG W, ZHAO T T, LIU Q, *et al.* Research and development status of Mini/Micro LED mass transfer technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2): 183-199. (in Chinese)
- [10] KIM J, KIM J H, CHO S H, *et al.* Selective lift-off of GaN light-emitting diode from a sapphire substrate using 266-nm diode-pumped solid-state laser irradiation [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122 (4): 305.
- [11] KRAUSE, STEPHAN. Selective femtosecond laser Lift-off process for scribing in thin-film photovoltaics [J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2015, 10(3): 274-278.
- [12] 陈哲吾, 卿启湘, 文桂林, 等. 摆臂式转移机构力学特性分析 [J]. *中国机械工程*, 2012, 23(21): 2562-2567.
CHEN Z W, QING Q X, WEN G L, *et al.* Mechanical property analysis of a swing-arm transport mechanism [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(21): 2562-2567. (in Chinese)
- [13] 刘强, 马宁, 王伟, 等. 针刺巨量转移平台用高推力聚磁式直线电机 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32 (9): 1347-1359.
LIU Q, MA N, WANG W, *et al.* High thrust focused magnetic linear motor for needling massive transfer platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1347-1359. (in Chinese)
- [14] Researchers Submit Patent Application, "Active Matrix Display Panel with Ground Tie Lines", for Approval (USPTO 20160056204) [J]. *Electronics Newsweekly*, 2016.
- [15] MILLER R, MARINOV V, SWENSON O, *et al.* Noncontact selective laser-assisted placement of thinned semiconductor dice [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufactur-*

- ing Technology, 2012, 2(6): 971-978.
- [16] TRINDADE A J, GUILHABERT B, MASSOUBRE D, *et al.* Nanoscale-accuracy transfer printing of ultra-thin AlInGaN light-emitting diodes on-to mechanically flexible substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(25): 253302.
- [17] RAPHAEL R B. Review of impulse coupling with materials[C]. *Excimer Lasers: Their Applications & New Frontiers in Lasers*. Arlington. SPIE, 1984.
- [18] KIM J Y, CHO Y H, PARK H S, *et al.* Mass transfer of microscale light-emitting diodes to unusual substrates by spontaneously formed vertical tethers during chemical lift-off[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4243.
- [19] JEONG J, JIN D K, CHOI J, *et al.* Transferable, flexible white light-emitting diodes of GaN p-n junction microcrystals fabricated by remote epitaxy[J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106075.
- [20] PARK S C, FANG J, BISWAS S, *et al.* Approaching roll-to-roll fluidic self-assembly: relevant parameters, machine design, and applications[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 24(6): 1928-1937.
- [21] 张利辉, 牛德树, 张育恒. 一种流磁自组装巨量转移装置及转移方法: 中国, 117334797A[P]. 2024-01-02.
- ZHANG L H, NIU D S, ZHANG Y H. A fluid-magnetic self-assembly massive transfer device and transfer method: China, 117334797A[P]. 2024-01-02. (in Chinese)
- [22] MORRIS C J, ISAACSON B, GRAPES M D, *et al.* Self-assembly of microscale parts through magnetic and capillary interactions [J]. *Micromachines*, 2011, 2(1): 69-81.
- [23] 张育恒, 牛德树, 张利辉, 等. 一种磁力摆正、流体顺正的巨量转移方法: CN117334796A[P]. 2024-01-02.
- ZHANG Y H, NIU D SH, ZHANG L H, *et al.* A method for massive transfer of magnetic alignment and fluid alignment: China, 117334796A[P]. 2024-01-02. (in Chinese)
- [24] 刘强, 焦飞腾, 孙海威, 等. 新型流磁巨量转移用永磁偏置定位磁针[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(19): 2911-2920.
- LIU Q, JIAO F T, SUN H W, *et al.* Permanent magnet bias positioning magnetic needle for novel fluid magnetic mass transfer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(19): 2911-2920. (in Chinese)
- [25] 孙海威, 宋仕辉, 张财政, 等. 一种微型芯片用零偏置磁场的永磁转移装置及方法: 中国, 118899375A[P]. 2024-11-05.
- SUN H W, SONG S H, ZHANG C Z, *et al.* A permanent magnet transfer device and method for microchips requiring zero bias magnetic field: China, 118899375A[P]. 2024-11-05. (in Chinese)

作者简介:



刘 强(1983—),男,江西九江人,教授,博士生导师,2013年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事 Mini/Micro LED 巨量转移和磁悬浮轴承技术研究。E-mail: liuqiangbuaa@163.com

通讯作者:



宋仕辉(2001—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,主要从事 Mini/Micro LED 巨量转移和磁悬浮天车技术研究。E-mail: 15049053458@163.com