

文章编号 1004-924X(2024)19-2911-10

新型流磁巨量转移用永磁偏置定位磁针

刘 强^{1,3*}, 焦飞腾¹, 孙海威², 牛萍娟³, 王子羲⁴

(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. 北京海炬科技有限公司, 北京 100176;

3. 天津工业大学 分离膜与膜过程国家重点实验室, 天津 300387;

4. 清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:针对现有 Mini/Micro LED 巨量转移技术转移效率及自组装转移良率普遍较低, 提出一种“永磁+电磁”磁场耦合的新型流磁巨量转移用定位磁针。为实现磁针上表面对芯片的精准抓取, 设计了电磁偏置线圈, 精准控制磁针上表面的磁力, 利用磁路分析法建立磁针结构与磁针针尖的数学模型, 获取影响磁针上表面气隙磁密的结构参数, 借助有限元法对结构参数进行优化设计。优化后磁针上表面的 $B_{\max}$ 由最初的 57 mT 提高至 68 mT, 相较初始方案增加了 19.2%; 峰谷变化率 δ 由 50.8% 提升至 70.5%, 两大指标参数均优于原方案。基于优化结果研制了一套永磁偏置定位磁针装置, 并进行气隙磁密测试与芯片转移效果测试。结果表明, 优化后的磁针上表面的磁密值 $B_{\max}$ 为 60 mT, 峰谷变化率 δ 为 66.6%, 可在 1 min 内实现上千颗芯片的吸引固定, 满足巨量转移精准抓取芯片的要求, 可配合流体实现芯片的巨量转移过程, 提升了自组装巨量转移技术的效率。

关键词: mini/micro LED; 巨量转移; 永磁偏置; 定位磁针; 优化设计

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243219.2911

Permanent magnet bias positioning magnetic needle for novel fluid magnetic mass transfer

LIU Qiang^{1,3*}, JIAO Feiteng¹, SUNG Haiwei², NIU Pingjuan³, WANG Zixi⁴

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

2. Beijing Haiju Technology Co., Ltd Beijing 100176, China;

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

4. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

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

Abstract: To improve the efficiency and yield of Mini/Micro LED mass transfer and self-assembly, a new positioning magnetic needle using a permanent magnet + electromagnetic magnetic field coupling is proposed. An electromagnetic bias coil is designed to precisely control the magnetic force on the needle's upper surface for accurate chip grasping. Magnetic circuit analysis establishes a mathematical model for the

收稿日期: 2024-08-07; 修订日期: 2024-09-02.

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)

magnetic needle structure, identifying parameters affecting the magnetic flux density in the air gap. The finite element method optimizes these parameters, increasing the $B_{\max}$ on the needle's upper surface from 57 mT to 68 mT, a 19.2% improvement, and enhancing the peak-to-valley variation rate δ from 50.8% to 70.5%. Based on these optimizations, a permanent magnet bias positioning magnetic needle device was developed. Tests show the optimized needle achieves a $B_{\max}$ of 60 mT and a δ of 66.6%, efficiently securing thousands of chips per minute. This meets precise chip grasping requirements and enhances the yield of self-assembly mass transfer technology when combined with fluid.

Key words: mini/micro LED; Mass Transfer(MT); permanent magnet bias; positioning magnetic needle; optimized design

1 引言

Mini/Micro LED 技术作为一种新兴显示技术,具有高亮度、高对比度、长寿命和低功耗等优势,是未来显示领域的发展趋势之一^[1-3]。然而,受到 LED 芯片巨量转移技术的限制,该技术前期需完成目标基板材质、粘合剂种类、传输介质类型等材料的准备工作,再将数以百万计的微小 LED 芯片从生长基板上转移至目标基板焊点位置,并确保每个芯片的位置和亮度均匀一致^[4-5]。当前的转移技术普遍存在转移精度不高、生产效率低、成本高等问题,限制了 Mini/Micro LED 技术的商业化应用^[6-8]。

相较于传统摆臂式巨量转移方案,业内进行了大量的探索和实验,提出了针刺转移、激光剥离、滚轴转印和定向自组装等新型巨量转移技术方案,以此实现更高效、更精密的芯片转移过程^[9]。针刺式技术利用刺针将芯片依次从转移晶膜上剥离,并释放至目标基板上的焊点位置,该技术需要逐个操作芯片,在处理大规模 Mini/Micro LED 显示屏时转移速度较慢^[10]。激光剥离式巨量转移技术可通过整面激光照射的方式将大量微小芯片从转移晶膜上快速剥离,实现高效率的芯片转移,而转移过程激光照射参数不合理则会烧蚀芯片与目标基板^[11]。滚轴转印式巨量转移技术精确控制滚轴的运动和压力,借助滚筒的连续旋转,实现大量芯片的快速转移,当滚筒运动位置发生偏移时,芯片至目标基板焊点位置的定位性较差^[12-13]。定向自组装技术借助流体或磁力的引导,将芯片精准抓取,单次带动大批量芯片运动至目标基板焊点位置,转移过程中需对芯

片间的间距、运动方向、表面特性进行精确控制以保证芯片的转移良率,是业内巨量转移技术效率最高的方案之一,具备良好的应用前景^[14-16]。

精准抓取是实现芯片高效率和高良率自组装的前提,抓取动作需微型磁针具备吸引固定单颗芯片的能力,精准性抓取则依靠高精密磁针磁力控制系统来完成。此外,当芯片被磁针抓取至目标基板焊点位置时,还需借助平台振动力、流体冲刷力等作用力来摆正芯片的姿态,由于芯片被抓取的位姿存在差异,后续芯片姿态调整的一致性难以保证。文献[17]首次提出了基于磁力导向的自组装技术,将芯片表面涂覆软磁材料,利用磁力背板上磁针的磁力实现对芯片在目标基板焊点位置的吸引固定,借助振动台水平方向的摆动力调整芯片姿态,难以保证阵列芯片位置姿态的一致性。在此基础上,文献[18]在目标基板上设置与芯片尺寸相匹配的凹槽作为焊点,并在凹槽底部涂覆强磁材料,借助强磁材料的吸力将芯片精准转移至凹槽内,保证了阵列芯片在目标基板姿态朝向的一致性。但该方案凹槽焊点位置的强磁材料降低了芯片引脚与目标基板焊点之间的导电性,影响芯片的正常发光。文献[19]以圆柱永磁体作为磁针代替目标基板凹槽底部的强磁材料,利用流体的冲刷力将芯片运送至目标基板凹槽附近,借助目标基板的振动与气压辅助将芯片精准释放至凹槽内部,但由于永磁体磁针尺寸过大,无法对芯片正负引脚进行区分,易造成引脚与基板特定焊点位置相差 180°。文献[20]通过调整目标基板下方磁体的运动实现芯片在焊点位置的平面旋转,保证了引脚与特定焊点位置焊接的准确性,借助永磁磁针长距离

吸引运动与凹槽短距离毛细力吸引固定,实现芯片至焊点位置的精准对位,但该方案永磁磁体尺寸过大,产生的磁场不可控,在进行多颗芯片转移时芯片会发生上下堆叠现象。文献[21]在目标基板下方安装永磁体,利用导磁体将永磁磁路引导至目标基板下方,借助永磁磁通密度梯度实现对芯片姿态的微调,通过带有黏度的流体限制芯片的堆叠,但仍不具备对单颗芯片姿态的精准调控能力。

为实现对芯片的精准抓取,文献[22]提出一种磁力辅助LED芯片自组装的转移方式,制备特定规格的圆形芯片使其具备优良的转向与运动能力,并设置与其形状相匹配的目标基板凹槽保证芯片的精准释放,利用磁针的吸附作用带动芯片在流体中完成定向转移,最后借助介电泳力实现芯片在焊点位置的精准吸引固定。文献[23]提出一种对芯片单边引脚镀镍LED芯片的转移方式,利用流体将芯片运送至目标基板焊点位置,借助磁力背板上微型磁针的吸引力实现对芯片的精准抓取。该方案具备精准调控单颗芯片姿态的能力,不依靠特定的基板结构,无需对芯片进行特殊处理就可实现LED芯片的自组装功能,具备良好的转移效率与良率。

本文提出了一种新型流磁巨量转移用“永磁磁场+电磁磁场”耦合的定位磁针,利用永磁磁针实现对目标基板焊点位置芯片的抓取,借助电磁磁场去精准控制磁针上方磁力,保证芯片被抓取的初始姿态统一。考虑现有磁针方案的优点,从精准控制阵列磁针上方磁力的角度出发,采用磁路分析法确定影响磁针磁力的优化参数,借助有限元方案对磁针结构进行优化设计,并对磁针设计优化结构进行磁密测试和芯片转移效果验证。

2 原 理

永磁偏置定位磁针的整体结构如图1所示,主要由磁针底座、永磁层、导磁层、磁针、隔磁环和通电线圈组成。该系统利用永磁层产生三维空间中沿Z向的主磁场,并通过导磁层将主磁路

磁场引导至磁针处,再借助通电线圈产生与主磁场反向的子磁场来实现磁针处磁场的偏置功能,进而实现对磁针磁力的精准控制。当转移系统工作时,芯片首先在激光照射的作用下从源晶膜上剥离,并保持引脚面一致朝下,随后在流体中缓慢下落至目标基板上。在下落过程中,芯片镀镍引脚被磁针精准抓取,并借助流体的冲刷力摆正姿态,最终完成芯片在目标基板焊点位置的吸引固定,芯片转移过程的工艺原理如图2所示。

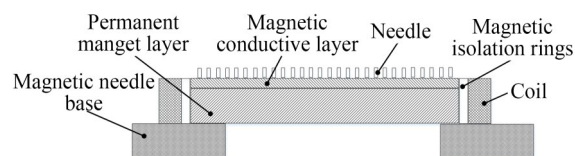


图1 定位磁针结构

Fig. 1 Structure of positioning magnetic needle

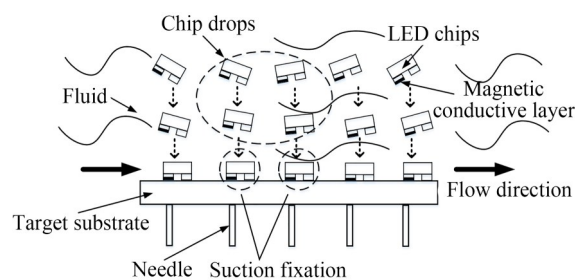


图2 芯片转移过程工艺原理

Fig. 2 Schematic diagram of chip transfer process

3 永磁偏置定位磁针设计

由原理可知,永磁偏置定位磁针方案利用永磁体产生的强磁场进行芯片的抓取,借助电磁线圈产生的反向磁场实现永磁磁针的偏置功能,且对线圈施以小电流即可低成本高效率控制磁针上方的磁力,同时具备批量吸引固定芯片至目标基板焊点位置的能力。本文利用磁路数学分析与有限元分析相结合的方法,确定流磁巨量转移用永磁偏置定位磁针系统最优的结构参数。

3.1 芯片受力数学模型

定位磁针对芯片的吸力模型如图3所示,当芯片运动至目标基板上时,磁针主动吸引目标

基板上方单极引脚镀镍的芯片。根据麦克斯韦电磁吸力方程,磁针对芯片的吸力表示为:

$$F_{\text{abs}} = \frac{1}{2\mu_0} \oint_S B^2 dS, \quad (1)$$

式中: B 为通过芯片镍层的磁通密度; μ_0 为真空磁导率; S 为芯片镍层的面积。

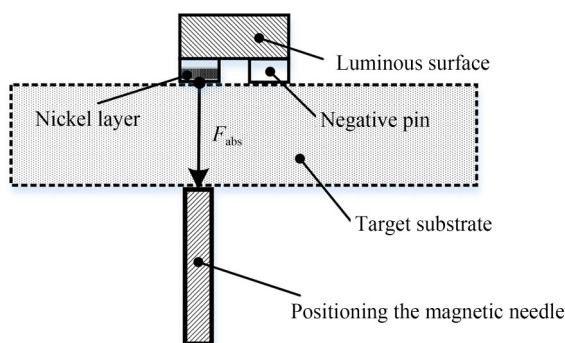


图3 磁针吸取芯片模型

Fig. 3 Magnetic needle sucks chip model

3.2 定位磁针数学模型

在芯片受力的数学模型中,当芯片单极引脚镍层厚度一定时,芯片所受磁针吸引力仅与通过镍层位置的气隙磁密 B 值有关。如图4所示,磁针针尖区域Ⅳ和气隙区域Ⅴ为定位磁针吸引固定芯片的工作区,通过分析磁针上表面气隙磁密 B 值即可获取磁针对芯片的吸力情况。在磁针工作区内,由于导磁体上有近千颗磁针,完整建模较为复杂,且相邻磁针间的磁场干涉较小,因此可选取上方3颗磁针简化磁路模型,以减少计算复杂度并准确反映磁针的工作状态。

针对本方案的磁针模型,建立该永磁定位磁

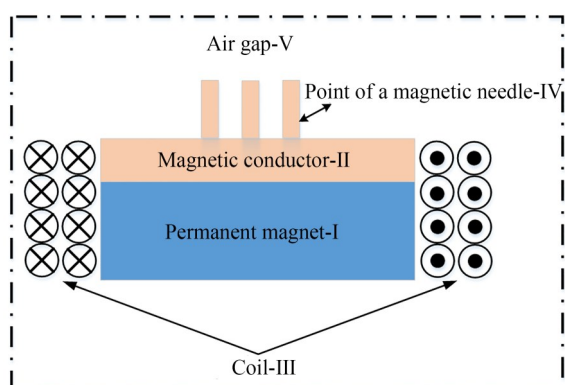


图4 定位磁针模型

Fig. 4 Model of positioning magnetic needle

针系统的等效磁路,如图5所示。 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_{r} 为磁针的磁阻; R_{u} 和 R_{d} 为上、下气隙区域的磁阻, R_{a} 为磁针上方发出的磁力线穿过磁针两侧气隙区域返回至永磁体下方区域的磁阻。

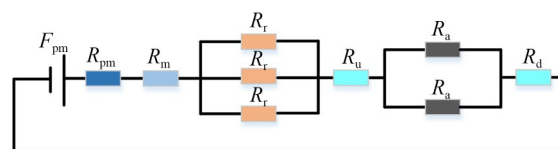


图5 等效磁路

Fig. 5 Equivalent magnetic circuit

根据等效电路计算法可得:

$$\varphi = \frac{F_{\text{pm}}}{R_{\text{pm}} + R_{\text{m}} + \frac{R_{\text{r}}}{3} + R_{\text{u}} + \frac{R_{\text{a}}}{2} + R_{\text{d}}}, \quad (2)$$

定义算子 $\Gamma(x) = \frac{1}{\mu_0} \int_0^x 1dh$,则可得:

$$\begin{cases} F_{\text{pm}} = \mu_0 H_c \Gamma(h_{\text{pm}}), R_{\text{pm}} = \frac{1}{\mu_{\text{pm}} A_{\text{pm}}} \Gamma(h_{\text{pm}}) \\ R_{\text{m}} = \frac{1}{\mu_{\text{m}} A_{\text{m}}} \Gamma(h_{\text{m}}), R_{\text{r}} = \frac{1}{\mu_{\text{r}} A_{\text{r}}} \Gamma(h_{\text{r}}) \\ R_{\text{u}} = \frac{1}{A_{\text{u}}} \Gamma(\delta_{\text{u}}), R_{\text{a}} = \frac{1}{A_{\text{a}}} \Gamma(\delta_{\text{a}}), R_{\text{d}} = \frac{1}{A_{\text{d}}} \Gamma(\delta_{\text{d}}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: H_c 为永磁体矫顽力; $h_{\text{pm}}, h_{\text{m}}$ 和 h_{r} 分别为永磁体、导磁体和磁针磁化长度; μ_0 为空气磁导率; $\mu_{\text{pm}}, \mu_{\text{m}}$ 和 μ_{r} 分别为永磁体、导磁体和磁针相对磁导率; $A_{\text{pm}}, A_{\text{m}}$ 和 A_{r} 分别为永磁体、导磁体和磁针截面面积; A_{u} 和 A_{a} 分别为磁针上侧和两侧气隙区域的截面面积; A_{d} 为永磁体下方气隙区域的截面面积; δ_{u} 和 δ_{a} 分别为磁针上方发出磁力线穿过上侧气隙区域和磁针两侧气隙区域的长度; δ_{d} 为磁针上方发出磁力线返回至永磁体下方气隙区域的长度。

在永磁磁路数学模型的基础上,设置电磁线圈实现定位磁针的偏置功能,利用磁场叠加法分析电磁磁路的励磁作用。搭建空心线圈绕组模型,并对电磁线圈通以直流电产生与永磁磁场反向的均匀磁场,设置 N 为线圈绕组的匝数, i 为通过线圈的电流。由电磁磁路的等效原理可得,通电线圈产生的反向磁动势 F_i 可表示为:

$$F_i = Ni. \quad (4)$$

结合“永磁+电磁”磁路耦合数学模型,获得等效磁路叠加后的总磁动势 F 表示为:

$$F = \mu_0 H_c \Gamma(h_{pm}) - Ni. \quad (5)$$

$$B_r = \frac{\mu_0 H_c \Gamma(h_{pm}) - Ni}{\Gamma(h_{pm})/\mu_{pm} A_{pm} + \Gamma(h_m)/\mu_m A_m + \Gamma(h_r)/(3\mu_r A_r) + \Gamma(\delta_u)/A_u + \Gamma(\delta_a)/(2A_a) + \Gamma(\delta_d)/A_d} \frac{1}{S_r}$$

$$B_g = \frac{\mu_0 H_c \Gamma(h_{pm}) - Ni}{\Gamma(h_{pm})/\mu_{pm} A_{pm} + \Gamma(h_m)/\mu_m A_m + \Gamma(\delta_u)/A_u + \Gamma(\delta_a)/(2A_a) + \Gamma(\delta_d)/(A_d)} \frac{1}{S_g} \quad (6)$$

3.3 磁针针尖数学模型

磁针针尖部分由于其材料特性及几何形状的影响,在磁场中具有较强的局部磁感应强度。磁针针尖局部磁感应强度在不同空间位置上的分布情况直接影响磁针对芯片的精准抓取。为进一步分析磁针针尖位置磁密在空间中的分布情况,更精准表述磁针针尖在空间中磁场分布的具体情况,并考虑针尖与芯片表面之间的磁力作用,采用等效强度磁化法来建立磁针针尖的等效数学模型表示为:

$$\begin{cases} \nabla^2 A_1 = -\mu_0 (J + \times M) & \text{区域 IV} \\ \nabla^2 A_2 = 0 & \text{区域 V} \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为磁针针尖区域 IV 和气隙区域 V 的矢量磁位, J 为磁针的磁极化强度。

考虑针尖处漏磁,磁针等效磁化强度函数用傅里叶级数表示为:

$$M(x) = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{4B_s}{\mu_0 \tau \omega_n} \sin \frac{\omega_n \tau}{2} \sin \frac{\omega_n \tau_p}{2} \sin(\omega_n x)$$

$$\omega_n = \frac{n\pi}{\tau}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} B_{x1} = \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n J_n \cos(\omega_n x) \frac{4B_s}{\tau \omega_n^2} \sinh\left(\omega_n \frac{1}{2}\right) \left[\cosh(\omega_n y) - \tanh\left[\omega_n \left(h_p + \frac{l}{2}\right)\right] \sinh(\omega_n y) \right] \\ B_{y1} = -\sum_{n=1}^{\infty} \omega_n J_n \sin(\omega_n x) \frac{4B_s}{\tau \omega_n^2} \sinh\left(\omega_n \frac{1}{2}\right) \left[1 - \tanh\left[\omega_n \left(h_p + \frac{l}{2}\right)\right] \sinh(\omega_n y) - \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n J_n \sin(\omega_n x) \frac{4B_s}{\tau \omega_n^2} \right] \\ B_{x2} = \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n J_n \cos(\omega_n x) \frac{4B_s}{\tau \omega_n^2} \sinh(\omega_n h_p) / \tanh\left[\omega_n \left(h_p + \frac{l}{2}\right)\right] \sinh(\omega_n y) \\ B_{y2} = -\sum_{n=1}^{\infty} \omega_n J_n \sin(\omega_n x) \frac{4B_s}{\tau \omega_n^2} \sinh(\omega_n h_p) / \sinh\left[\omega_n \left(h_p + \frac{l}{2}\right)\right] \cos(\omega_n y) \end{cases} \quad (11)$$

式中: B_{x1}, B_{y1} 为磁针针尖位置气隙磁密 B_r 在水平及竖直方向上的分量; B_{x2}, B_{y2} 为针尖上方气隙位置气隙磁密 B_g 在水平及竖直方向上的分量。

综上,设置磁针的上表面单位面积为 S_r ,相邻磁针之间气隙位置的单位面积为 S_g ,根据等效磁路计算可得,磁针上表面、相邻磁针之间气隙位置的磁通密度 B_r 和 B_g 分别为:

式中: B_s 表示磁针剩余磁化强度, μ_0 表示空气磁导率, τ 表示磁针宽度, τ_p 表示两磁针之间距离。

根据麦克斯韦方程组,分别建立磁针针尖区域 IV 和气隙区域 V 的泊松方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} = \mu_0 \frac{\partial M(x)}{\partial x} & \text{区域 IV} \\ \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} = 0 & \text{区域 V} \end{cases} \quad (9)$$

磁针针尖区域 IV 和气隙区域 V 的磁场强度 H 和磁通密度 B 满足如下对称边界条件:

$$\begin{cases} H_{x2} \Big|_{y=\frac{l}{2}+h_p} = 0, H_{x1} \Big|_{y=0} = 0, \\ B_{y1} \Big|_{y=\frac{l}{2}} = B_{y2} \Big|_{y=\frac{l}{2}}, H_{x2} \Big|_{y=\frac{l}{2}} = H_{x1} \Big|_{y=\frac{l}{2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: h_p 表示磁针厚度, l 表示气隙长度。

设置 $J_n = \sin \frac{\omega_n \tau}{2} \sin \frac{\omega_n \tau_p}{2}$, 并将式 (6) 进行化简整理, 计算得出磁针针尖区域 IV 和气隙区域 V 空间中的气隙磁密, 经化简可得磁针针尖位置、气隙位置气隙磁通密度 B_r 和 B_g 分别为:

3.4 磁针有限元设计优化

永磁偏置定位磁针磁钢材料为钕铁硼(矫顽力为 796 000 A/m, 相对磁导率为 1.05), 导磁体

及磁针针尖材料均为电工纯铁软磁材料 DT4C (相对磁导率为 4 000); 绕组线圈采用铜制漆包线, 绕线方式为单匝缠绕, 保证线圈槽满率在 60%, 初始设计尺寸如表 1 所示。

表 1 定位磁针的初始设计尺寸

Fig. 1 Initially designed dimensions of positioning magnetic needle

参 数	数 值	参 数	数 值
磁钢长度/mm	50	磁针直径/mm	0.1
磁钢宽度/mm	30	磁针高度/mm	0.5
磁钢高度/mm	4	两磁针间距/mm	2.5
导磁体长度/mm	50	线圈线径/mm	0.5
导磁体宽度/mm	30	线圈匝数/匝	1 000
导磁体高度/mm	0.5	直流电/A	0.5~1

为进一步优化磁针结构, 保证芯片只在磁针针尖处被精准吸引而非针尖位置不吸引, 利用有限元结构化建模的方法对影响磁针针尖处磁密的各关键参数进行优化设计, 选取永磁体高度 p_1 、导磁体高度 p_2 、磁针直径 q_1 、磁针高度 q_2 和两磁针间距 q_3 5 种参数为优化变量, 其他参数维持初始方案不变。建立优化设计变量 W_n 的向量形式为:

$$W_n = [p_1, p_2, q_1, q_2, q_3]. \quad (12)$$

在永磁偏置定位磁针实际应用中, 导磁体与磁针针尖饱和磁化, 考虑导磁体与磁针针尖之间的相互作用, 在原始方案总体结构不变的情况下, 根据工程经验与磁针针尖磁场性能要求, 优化方案的可行域表示为:

$$\begin{cases} 4 \text{ mm} \leq p_1 \leq 5 \text{ mm} \\ 0.3 \text{ mm} \leq p_2 \leq 0.5 \text{ mm} \\ 0.1 \text{ mm} \leq q_1 \leq 0.5 \text{ mm} \\ 0.5 \text{ mm} \leq q_2 \leq 0.5 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq q_3 \leq 2.5 \text{ mm} \end{cases} \quad (13)$$

为准确描述定位磁针针尖位置与非磁针针尖气隙位置的磁密峰谷效应, 引入峰谷变化率 δ , 即:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \times 100\%, \quad (14)$$

式中: $B_{\max}$ 为磁针针尖处磁密的最大值, $B_{\min}$ 为非磁针针尖处气隙磁密的最小值, n 为定位磁针针尖的数量。

在实际工作中, 为实现磁针针尖对芯片的精准抓取, 需使磁针针尖上表面的磁密值大于可吸引固定芯片的磁密最小值, 同时保证非针尖位置上方芯片被流体冲刷带走, 即要求相邻磁针针尖之间磁密具备较高的峰谷变化率。因此, 目标函数为:

$$\begin{cases} \delta = \max f(p_1, p_2, q_1, q_2, q_3) \\ B_{\max} \geq 50 \text{ mT} \end{cases} \quad (15)$$

利用有限元 APDL 参数化建模, 精确控制和调整磁针的几何参数, 对定位磁针结构进行优化设计。考虑到实际生产环节中目标基板的厚度为 1 mm, 本文分析的磁针上表面磁密值默认为磁针上方 1 mm 处的气隙磁密, 利用前文对磁针的磁路分析可得, 定位磁针初始设计方案的仿真结果如图 6 所示。

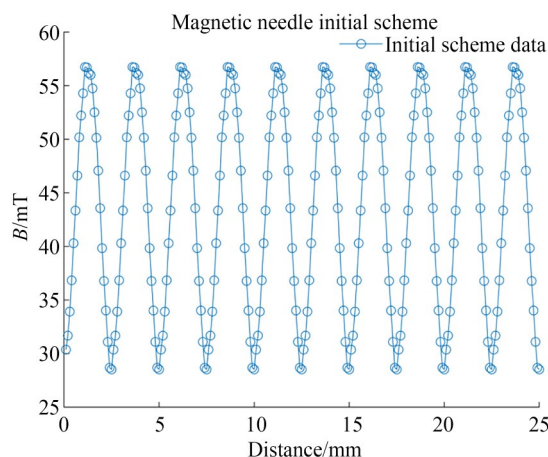


图 6 磁针上表面位置气隙磁密数

Fig. 6 Magnetic density of air gap on upper surface of magnetic needle

在对定位磁针结构进行优化的过程中, 永磁体的高度 p_1 直接影响磁针波峰位置处的磁密值 $B_{\max}$, 随着永磁体高度 p_1 的增加, $B_{\max}$ 随之不断增加, 磁针波峰位置处的磁密值显著提升。将永磁体高度从原方案的 4 mm 增加至 5 mm, 间隔设置为 0.2 mm, 其他参数维持初始方案不变, 并选用单颗磁针去分析磁针上表面磁密的变化, 仿真结果如图 7 所示。根据目标函数要求, 选取导磁体的高度 p_1 的值为 5 mm。

导磁体的高度 p_2 影响相邻磁针之间的磁场干涉作用, 选取 3 颗磁针为分析对象, 对导磁体高度 p_2 进行优化, 将导磁体高度从 0.3 mm 增加至

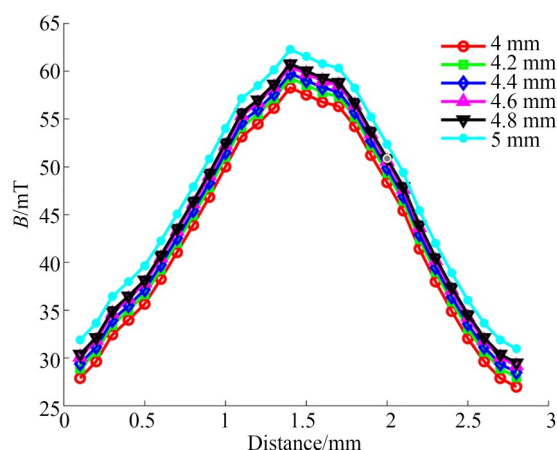


图 7 永磁体高度优化

Fig. 7 Optimized permanent magnets height

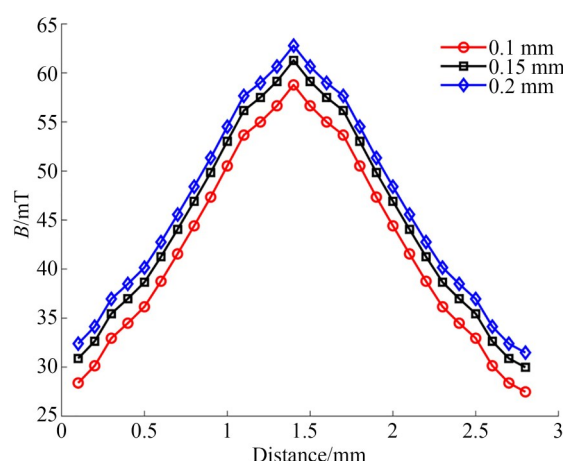


图 9 磁针直径优化

Fig. 9 Optimized magnetic needle diameter

0.5 mm, 间隔设置为 0.05 mm, 其他参数维持初始方案不变, 仿真结果如图 8 所示。随着导磁体高度 p_2 的增加, 磁针针尖处磁密 $B_{\max}$ 逐渐减小, 且峰谷变化率 δ 也随之变小。根据目标函数要求, 选取导磁体的高度 p_2 为 0.3 mm。

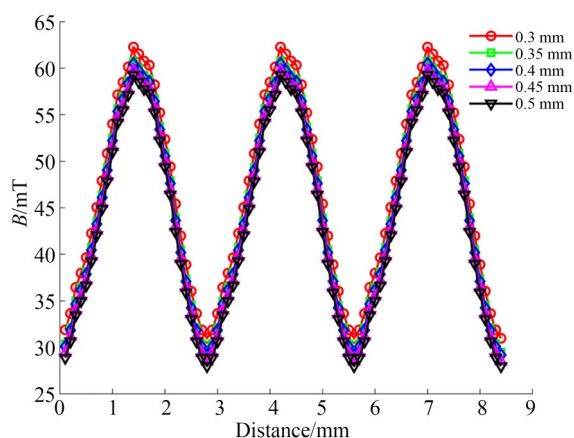


图 8 导磁体高度优化

Fig. 8 Optimized magnet conductor height

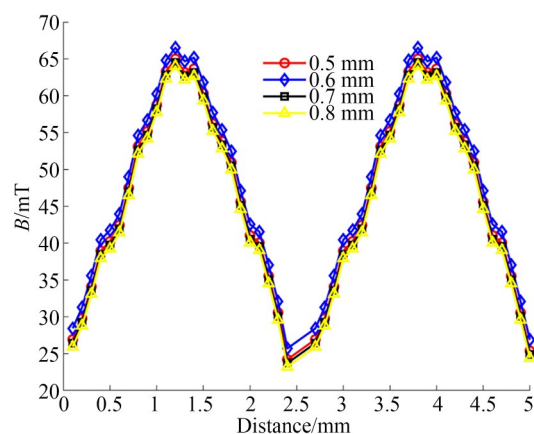


图 10 磁针高度优化

Fig. 10 Optimized magnetic needle height

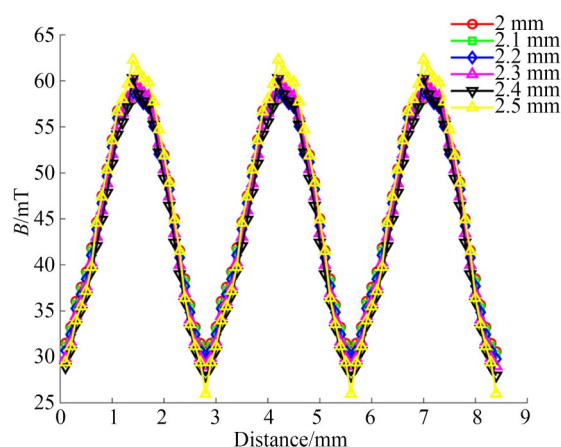


图 11 磁针间距优化

Fig. 11 Magnetic needle spacing optimization

对磁针的结构参数 q_1, q_2, q_3 分别进行优化设计, 磁针直径 q_1 从 0.1 mm 增加至 0.2 mm, 间隔设置为 0.05 mm; 磁针高度 q_2 从 0.5 mm 增加至 0.8 mm, 间隔设置为 0.1 mm; 两磁针间距 q_3 从 2 mm 增加至 2.5 mm, 间隔设置为 0.1 mm; 其他参数维持初始方案不变, 仿真结果如图 9~图 11 所示。

基于上文分析, 绕组线圈参数保持不变, 以磁针上表面磁密值的目标函数作为设计依据, 优

化初始方案定位磁针的结构,定位磁针的最终设计尺寸如表 2 所示。

表 2 定位磁针的优化尺寸

Fig. 2 Optimized dimensions of positioning magnetic needle

参 数	数 值	参 数	数 值
磁钢长度/mm	50	磁针直径/mm	0.2
磁钢宽度/mm	30	磁针高度/mm	0.6
磁钢高度/mm	5	两磁针间距/mm	2.5
导磁体长度/mm	50	线圈线径/mm	0.5
导磁体宽度/mm	30	线圈匝数/匝	1 000
导磁体高度/mm	0.3	直流电/A	0.5~1

改进方案磁针上表面磁密的仿真结果如图 12 所示,磁针上表面的 $B_{\max}$ 由最初的 57 mT 提高至 68 mT,相较初始方案增加了 19.2%;峰谷变化率 δ 由 50.8% 提升至 70.5%,优于原方案。

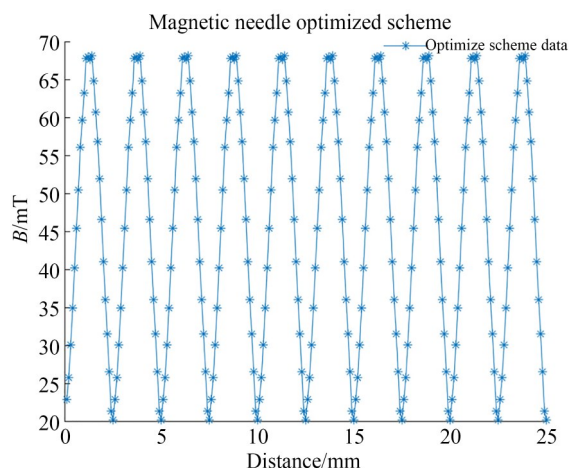


图 12 磁针的优化方案

Fig. 12 Optimized scheme of magnetic needle

4 测量实验与结果

基于优化结果研制了一种新型流磁巨量转移用磁针,并进行了磁密测试实验,测试装置如图 13 所示。实验中,将定位磁针固定在无磁样品台上,控制霍尔探头运动使它位于磁针上表面 1 mm 位置处,从数千颗磁针中选取 30 颗作为测试对象,选择平台扫描运动模式,设置 X 方向运动距离为 30 mm,单步运动间隔为 0.2 mm;设置 Y 方向运动距离为 8 mm,单步运动间隔为 0.2 mm,采集磁针上表面磁密数据。磁针磁密

测试实验结果如图 14 所示,磁针上表面磁密值 $B_{\max}$ 为 60 mT,峰谷变化率 δ 为 66.6%,实验测试结果均小于设计值,满足目标函数中磁针精准抓取芯片的设计要求。磁针加工方式为铣床加工,存在数十微米及以上加工误差,且磁针针尖加工完成后需对其进行涂胶保护与表面打磨处理,这会造成个别磁针的不可逆损伤,导致实验测试结果略小于仿真值。

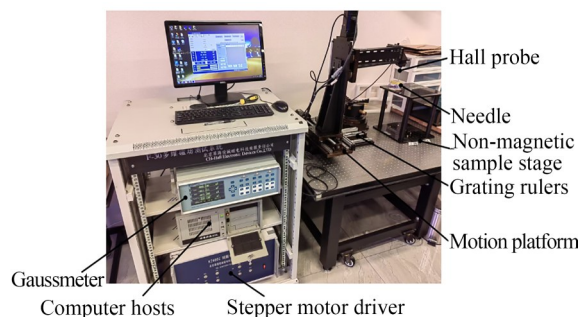


图 13 磁密测量设备

Fig. 13 Magnetically dense measuring equipment

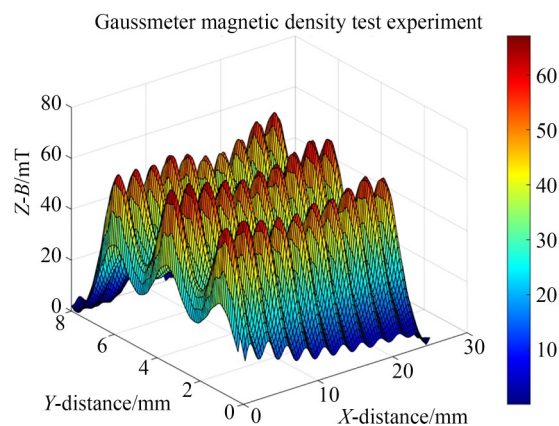


图 14 磁针上表面磁密

Fig. 14 Magnetic density on upper surface of magnetic needle

利用定位磁针搭取实验工装并进行 Mini LED 芯片抓取实验,如图 15 所示。芯片在激光照射后进入流体内部,并下落至目标基板上。对线圈通电,精准控制磁针上表面的磁力,实现定位磁针对芯片的精准抓取。随后,芯片在流体的冲刷作用下摆正姿态,转移前后的实验结果如图 16 所示。该原理样机装置可在 1 min 内完成上千颗芯片的精准吸引固定,转移良率较高,满

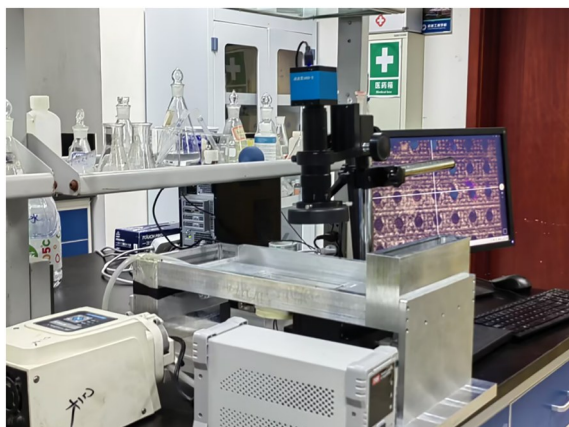


图 15 磁针抓取芯片工装

Fig. 15 Magnetic needle gripping chip tooling

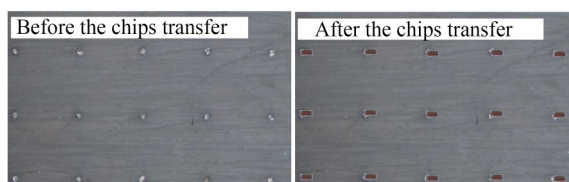


图 16 芯片吸引固定实验结果

Fig. 16 Chip suction fixation experiment result

足芯片巨量转移的技术要求。

5 结 论

本文针对现有的巨量转移技术转移速率慢的问题,提出了一种新型流磁交易量转移用永磁偏置定位磁针,利用“永磁+电磁”耦合的方式精准控制磁针磁力,实现对 Mini LED 芯片的精准抓取。采用等效磁路法与等效强度磁化法分别建立磁针整体结构与针尖结构的磁路数学模型,利用有限元软件对磁针各个结构参数进行优化,并基于此研制了永磁偏置定位磁针原理样机,通过磁密测试与芯片吸引固定实验验证了理论分析和优化结果的可行性。实验测试结果表明,磁针上表面磁密值 $B_{\max}$ 为 60 mT,峰谷变化率 δ 为 66.6%,满足磁针精准抓取芯片的要求,可在 1 min 内实现上千颗 LED 芯片的精准转移,具备较高的转移良率,且定位磁针可通过拼接的方式进一步提高巨量转移的效率,具备良好的商业化应用前景。

参考文献:

- [1] DESJARDINS D, HOPPER D G. Military display market segment: aircraft cockpits[C]. *Proceedings of the SPIE-Defense, Security, and Cockpit Displays*, Bellingham USA, 2004, 5443: 88-106.
- [2] LIANG Q, SUN Y X, WANG L J, *et al.* A novel inertial-aided visible light positioning system using modulated LEDs and unmodulated lights as landmarks[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(4): 3049-3067.
- [3] 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)
- [4] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.* Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
- [5] 严子雯, 严群, 李典伦, 等. 高度集成的 MLED 显示技术研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1309-1317.
- [6] YAN Z W, YAN Q, LI D L, *et al.* Research progress of high integration density μ LED display technology [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1309-1317. (In Chinese)
- [7] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [8] WU Y F, MA J S, SU P, *et al.* Full-color realization of micro-LED displays [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(12): 2482.
- [9] NIE J Y, UNIVERSITY X J, ZHANG Z, *et al.* Systematic study on size and temporal dependence of micro-LED arrays for display applications [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(4): 549-557.
- [10] ZHOU X J, TIAN P F, SHER C W, *et al.* Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 71: 100263.
- [10] Rohinni 与京东方开始量产 Mini LED 显示. [EB/OL]. [2022-05-07]. <https://new.qq.com/rain/>

- a/20210811A006B700.
Rohinni and BOE start mass production of Mini LE-D displays. [EB/OL]. [2022-05-07]. <https://new.qq.com/rain/a/20210811A006B700>. (in Chinese)
- [11] 孙宁宁, 杨彪, 陈福荣, 等. 激光辅助 MicroLED 巨量转移技术进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(4): 513-528.
SUN N N, YANG B, CHEN F R, *et al.* Advances in laser-assisted mass transfer of MicroLED[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(4): 513-528. (in Chinese)
- [12] SHARMA B K, JANG B, LEE J E, *et al.* Load-controlled roll transfer of oxide transistors for stretchable electronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(16): 2024-2032.
- [13] CHOI M, JANG B, LEE W, *et al.* Stretchable active matrix inorganic light-emitting diode display enabled by overlay-aligned roll-transfer printing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(11): 1606005.
- [14] VERMA A K, HADLEY M A, YEH H J J, *et al.* Fluidic self-assembly of silicon microstructures [C]. 1995 *Proceedings. 45th Electronic Components and Technology Conference. Las Vegas, NV, USA*. IEEE, 1995: 1263-1268.
- [15] SASAKI K, SCHUELE P J, ULMER K, *et al.* System and method for the fluidic assembly of emissive displays: US10418527[P]. 2019-09-17.
- [16] RAMADAN Q, UK Y S, VAIDYANATHAN K. Large scale microcomponents assembly using an external magnetic array [J]. 2007, 90(17): 172502.
- [17] YANDO S. Method and apparatus for fabricating an array of discrete elements: US3439416 [P]. 1969-04-22.
- [18] CLIFTON G, FONSTAD J. Magnetically-assisted statistical assembly-a new heterogeneous integration technique [R]. MIT Technical Report, 2002.
- [19] SHET S, MEHTA V R, FIORY A T, *et al.* The magnetic field-assisted assembly of nanoscale semiconductor devices: a new technique [J]. *JOM*, 2004, 56(10): 32-34.
- [20] 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.
- [21] KURAN E E, TICHEM M. Magnetic self-assembly with unique rotational alignment for thin chips [J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 141: 228-233.
- [22] CHANG W, KIM J, KIM M, *et al.* Concurrent self-assembly of RGB microLEDs for next-generation displays[J]. *Nature*, 2023, 617: 287-291.
- [23] 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: CN117334797A[P]. 2024-01-02.
ZHANG L H, NIU D SH, ZHANG Y H. A kind of flow magnetic self-assembling mass transfer device and transfer method: CN117334797A [P]. 2024-01-02. (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的研究。E-mail: liuqiangbuaa@163.com