文章编号:1007 - 4252(2024)03 - 0003 - 153　　DOI:10.20027/j.gncq.2024.0022

新型复合纳米压印膜结构的研究

杨志伟[1,*], Asim Abas[2], 张雪陶[3], 曹元勋[1,*], 张　杰[1]
(1. 吉林工业职业技术学院 智能制造学院, 吉林省 吉林市 132013;
2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽省 合肥市 230031;
3. 菏泽学院 机电工程学院, 山东省 菏泽市 274000)

摘要:本研究提出了一种新型复合纳米压印膜结构,以三明治结构为基础,采用弹性硅胶将柔性非扩张平面基底包裹。工艺包括在图形基板涂覆液态硅胶并固化,精准放置柔性非扩张平面基底,最后涂覆一层硅胶,形成硅胶压印区/柔性基底/硅胶保护区的三明治结构。该技术解决了单一柔性材料难以剥离和弹性材料压印过程中扩张现象导致的线宽波动问题。

关键词:复合纳米压印膜;三明治结构;非扩张平面基底;线宽波动
中图分类号:TN305.7　　**文献标志码**:A

Research on a Novel CompositeNanoimprint Film Structure

Yang Zhiwei[1*], Asim Abas[2], Zhang Xuetao[3], Cao Yuanxun[1*], Zhang Jie[1]
(1. School Of Intelligent Manufacturing, Jilin Vocational College of Industry and Technology, JiLin 132013, China;
2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Heze University, Heze, 274000, China)

Abstract: This study proposes a novel composite nanoimprint film structure, based on a sandwich structure, using elastic silicone to wrap a flexible non expanding planar substrate. The process includes coating liquid silicone on the graphic substrate and curing it, accurately placing a flexible non expanding flat substrate, and finally coating a layer of silicone to form a sandwich structure of silicone imprinting area/flexible substrate/silicone protection area. This technology solves the problem of difficulty in peeling off a single flexible material and the line width fluctuation caused by the expansion phenomenon during the embossing process of elastic materials.

Key words: Composite Nanoimprint film; Sandwich Structure; Non Expanding Planar Base; Line

收稿日期:2024 - 04 - 02;　　**修订日期**:2024 - 04 - 22
基金项目:2024 年度吉林省教育厅科学研究项目“新型自加热复合纳米压印膜的制备及应用”(JJKH20241130KJ);本文系吉林工业职业技术学院 2024 年度科学研究课题“基于薄膜剥离仿真法进行高质量半导体芯片离子掺杂的研究与开发”(课题编号:24KY12KJY)的研究成果之一
作者简介:杨志伟(1990—), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为半导体纳米材料(E - mail:yangzhw2014@lzu.edu.cn)
通信作者:曹元勋(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为机械工程材料(E - mail:nest465404953@163.com).

Width Fluctuation

0 引言

纳米压印光刻技术是在具备所需图形的基板上镀上一层液态压印胶,固化后将包含所需图案的反面的预制模具压在涂有抗蚀剂的基底上,以通过机械变形复制图案[1],使用这种方法可以从单个预制模具中生产许多复制品,该技术直接机械变形,其分辨率不受传统纳米光刻方法中观察到的光衍射或光束散射因子的限制[2]。在纳米加工领域,纳米压印光刻技术作为一种关键工艺手段,在微电子、纳米结构制备以及生物医学等多个领域中都有着广泛的应用前景[3-7]。然而,传统的纳米压印膜结构[8-9],主要依赖单一弹性[10]或柔性材料,在实际应用中暴露出一系列的局限性和挑战。主流的纳米压印膜材料大多选用弹性材料(如硅胶)或柔性材料(如PET)[11-13]。这些材料在应用过程中虽然具有一定的优势,但也面临着明显的缺陷。以弹性硅胶为例,其在受到外部力作用下的显著形变性质,导致在压印过程中不同位置的图形受到膜变形扩展的不均影响,引发尺寸和形状的不一致性[14]。柔性压印材料,虽表面硬度较高不会产生尺寸形状变化,但其存在脱膜困难以及造成图形基板损伤的风险,在进行压印工艺过程中可能导致目标衬底的损伤,显著制约了其广泛应用的可能性[15-17]。

本文基于上述研究基础,提出了一种全新的纳米压印膜结构方案,将结构设计重心放在了“三明治”结构上,即采用弹性硅胶将柔性非扩张平面基底进行精确包裹。具体的工艺流程包括在图形基板上先涂覆液态硅胶并固化,随后精确地放置柔性非扩张平面基底,最终再涂覆一层硅胶,从而形成硅胶压印区/柔性基底/硅胶保护区的三明治结构。这一结构设计不仅有机地解决了前述的技术难题,而且在保持高精度压印的同时,大大提升了膜材料与基板之间的剥离性能。本文的研究工作具有明显的创新性和实用性,通过对纳米压印膜结构的深入探索和优化,不仅有望推动纳米技术在微电子、传感器、生物医学等领域的广泛应用,还为纳米加工技术的进一步发展提供了有力的理论和实践支撑。

综上所述,随着纳米科技的不断发展和应用领域的扩展,对高效、稳定和可靠的压印光刻技术的需求日益增长。本文旨在通过对传统压印膜结构的创新性改进,为解决现有技术中存在的主要挑战和局限性提供新的思路和解决方案。

1 传统纳米压印膜结构

1.1 弹性纳米压印膜

基于硅胶的弹性纳米压印膜在微纳米加工领域具有低成本、易剥离特性及对模板衬底的低损伤性,使其成为制备图形化蓝宝石衬底等高精度纳米结构的理想选择。硅胶材料在纳米压印技术(NIL)中表现出色,NIL 作为一种高分辨率的微纳米制造技术,在半导体、光子学和生物医学领域有着广泛应用,具体压印工艺如图 1(a-b)所示。硅胶基纳米压印膜具备低粘附性和良好的化学稳定性,在多次循环使用中保持了优异的性能。这对于实现大面积、高通量的纳米加工具有重要意义,尤其是在高精度要求的半导体行业和先进显示技术中。

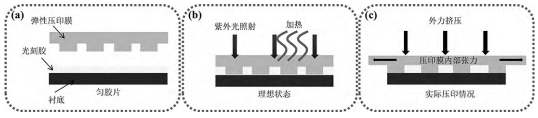

图 1 (a)纳米压印基本结构;(b)纳米压印理想无压力状态下的压印工艺;(c)外力挤压过程中的压印膜变形

Fig. 1 (a) Basic structure of nanoimprinting; (b) Nanoimprinting technology under ideal pressure free state; (c) Deformation of Imprint Film during External Squeeze Process

具备上述优势的同时,其本身也具有较大的局限性。如图 1(b)所示,无压力的理想状态下,纳米压印膜的图形区域能够以 1:1 的比例准确地将图形转移到目标衬底的光刻胶柱上。然而,如图 1(c)所示,在实际操作中,纳米压印工艺不仅包括加热和紫外照射,还需要在纳米压印膜上施加一定的外力,受硅胶材料弹性的影响,纳米压印膜在受力过程中会产生内部张力产生变形,这将导致纳米压印膜纵向变薄,横向变宽。这种变形会进一步导致转移图形的尺寸发生改变,从而影响图形的精准性,如果通过降低膜厚可以在一定程度上提升精准性,但由于膜过于单薄而难以从衬底剥离以及压印过程中造成膜损伤的问题。

1.2　柔性纳米压印膜

相比硅胶弹性纳米压印膜,以聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、聚乙烯醇(PVA)[18-19]以及聚乙烯吡咯烷酮(PVP)[20]等为主体的柔性纳米压印膜在一定程度上克服了变形的问题。他们硬质且稳定,能以理想的 1:1 比例将图形转移到目标衬底的光刻胶柱上,显著提高了图形精准性。

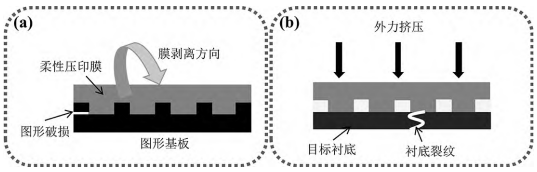

图 2　(a)柔性压印膜从图形基板剥离;(b)柔性压印膜进行压印工艺

Fig. 2 (a) Flexible embossing film peeled off from the graphic substrate; (b) Flexible embossing film for embossing process

三种柔性纳米压印膜材料中的 PVA、PVP 在固化后易产生褶皱,因此当前主要商业化研究还是以 PET 为主。然而,PET 基纳米压印膜也有新的问题,图 2(a)展示了液态 PET 在图形基板上固化后,由于表面硬质且粘附力较强,难以剥离,甚至可能对图形基板产生破坏。这种高粘附力的问题到目前为止仍是一大难题。另一严重问题在于,如图 2(b)所示,硬质的 PET 在压印过程中会将所有力都传导到模板衬底上,无法起到缓冲效果,极可能对目标衬底造成损伤。这一点在微纳制程中尤其要引起重视。尽管 PET 基的柔性纳米压印膜在解决硅胶弹性纳米压印膜的变形问题时展现出优势,但其自身的挑战也需要我们在实际应用中严格考虑和解决。这需要我们更深入地理解材料属性,构思紧密的实验方案和严谨的实施细节,只有这样,我们才能充分利用这一技术的潜力,推动其在纳米制程中的广泛应用。

1.3　小结

传统纳米压印技术中,硅胶弹性纳米压印膜以其低成本、易剥离优势在微纳米加工领域得到广泛应用,尤其适用于高精度的半导体和生物医学领域[21]。但硅胶材料的弹性可能导致变形,影响图形精度。另一方面,聚对苯二甲酸乙二酯(PET)基柔性纳米压印膜虽然提高了图形传递的准确性[22],却面临剥离困难和可能损伤目标衬底的问题。因此,在实际应用中需精细选择材料,结合特定需求进行优化,以充分利用纳米压印技术的潜力。

2　新型复合纳米压印膜结构设计

2.1　复合纳米压印膜制备流程

复合纳米压印膜的制备过程如图 3 所示:(1)图形基板上涂覆一层液态硅胶;(2)通过旋涂法调整膜厚,控制方法是调整旋涂机的转速;(3)通过真空加热对硅胶进行固化;(4)固化的硅胶上涂覆一层液态 PET,通过旋涂法调整膜厚,并进行固化;(5)固化后的 PET 上涂覆一层液态硅胶,再次进行固化。整个过程完成后,将复合纳米压印膜从图形基板上剥离。

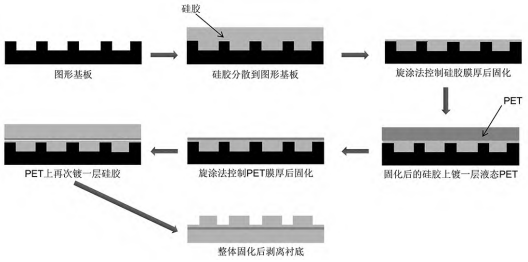

图 3　复合纳米压印膜制备流程

Fig. 3 Preparation process of composite nanoimprint film

该制备过程中,关键步骤包括旋涂机转速的调整、硅胶和 PET 的涂覆、以及各层膜的固化。这一工艺能够有效控制膜厚,并通过不同材料的层叠实现复合结构。这种复合纳米压印膜在微纳米加工领域具有潜在的应用前景,尤其在半导体和生物医学领域。该工艺提供了一种灵活且可控的制备方法,为纳米加工技术的进一步优化和应用奠定了基础。

2.2　新型复合纳米压印膜的工艺优势

复合纳米压印膜的结构如图 4(a)所示,包括三个关键部分:硅胶保护区、柔性基底和硅胶压印区。这种设计在微纳米制备领域具有重要的学术和应用价值。硅胶保护区的作用是包裹整个纳米压印膜,为其提供保护功能,该区域的主要任务是确保纳米压印膜结构的完整性和稳定性,防止外部环境对膜的影响,硅胶保护区在制备过程中经过固化,形成坚固的外层,为整个膜的结构提供了可靠的支撑。柔性基底的主要功能是抵抗外部力量引起的横向张力,防止最下层的硅胶压印区发生变形,其材料选择

和设计对整个纳米压印膜的稳定性至关重要,通过在柔性基底中引入合适的材料或结构设计如 PET,可以有效减缓外部应力的传播,维持硅胶压印区的形状和性能。硅胶压印区是整个结构的核心部分,其任务是将图形基板上的表面图形转移到目标衬底的光刻胶柱上,这一步骤是纳米制备的关键,硅胶压印区的设计需要考虑到对图形的精确传递和目标衬底的表面适应性。

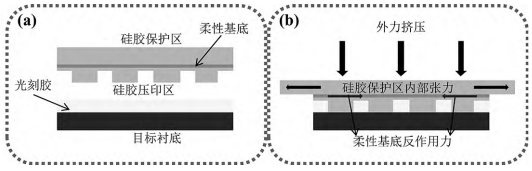

图 4 复合纳米压印膜结构及受力原理

Fig. 4 Structure and Force Principle of Composite Nanoimprint Film

在纳米压印工艺中,如图 4(b)所示,硅胶保护区、柔性 PET 基底和硅胶压印区共同构成了一个复杂的力学互动系统。当外部挤压力作用于硅胶保护区时,该区域产生内部张力,导致横向扩张。这一现象体现了硅胶材料在受力时的应变特性,即在外力作用下的形变能力。硅胶保护区与柔性 PET 基底之间的牢固接触,为系统提供了一种力学平衡机制。当硅胶保护区受力横向扩张时,与其紧密结合的 PET 基底产生相应的反作用力。这种反作用力有效地限制了横向扩张的传递,确保了挤压力不会影响到硅胶压印区。硅胶压印区的稳定性是纳米压印工艺成功的关键。由于横向扩张在柔性基底处被有效抑制,因此硅胶压印区得以保持其原有的形状和尺寸,确保了图形基板上的微纳图形能够准确无误地转移到目标衬底的光刻胶柱上。该设计不仅揭示了材料在纳米尺度下的受力和响应机制,而且为纳米压印工艺提供了一个有效的力学稳定策略,有助于提高图形传递的精度和质量。这在微纳加工领域具有重要的学术价值和实际应用潜力。

3 结论

本研究提出了一种新型复合纳米压印膜,解决了传统硅胶弹性膜在微纳米加工中的形变问题。这种膜采用硅胶保护区、柔性聚对苯二甲酸乙二酯(PET)基底和硅胶压印区的层叠结构,通过精确控制涂覆和固化步骤来形成。硅胶保护区提供稳定性,柔性基底抵抗横向张力,确保压印区的形状和性能。该复合膜在纳米压印过程中形成复杂的力学互动,外部力导致硅胶保护区横向扩张,但与 PET 基底的紧密结合限制了扩张,保持压印区的稳定性。这种设计不仅提高了图形传递的准确性,还减少了对目标衬底的损伤,对半导体和生物医学领域的微纳米制备具有重要意义,开拓了纳米加工技术的新方向。

参考文献:

[1] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. Reports on progress in physics, 2016, 79(7): 076401.

[2] Unno N, Mäkelä T. Thermal nanoimprint lithography—A review of the process, mold fabrication, and material[J]. Nanomaterials, 2023, 13(14): 2031.

[3] Sun, Hongwen, et al. "Research on the Filling Process of Ultraviolet Nanoimprint Lithography with High - Resolution Stamps." Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics 18.7 (2023): 813 - 822.

[4] Sun, Wanshi, et al. "CMOS - compatible electrochemical nanoimprint: High throughput fabrication of ordered microstructures on semiconductor wafer by using a glassy carbon mold." Electrochimica Acta 462 (2023): 142700.

[5] Choi, Hojung, et al. "Realization of high aspect ratio metalenses by facile nanoimprint lithography using water - soluble stamps." PhotoniX 4.1 (2023): 18.

[6] Shao J Y, Chen X L, Li X M, et al. Nanoimprint lithography for the manufacturing of flexible electronics[J]. Science China Technological Sciences, 2019, 62: 175 - 198.

[7] Martínez - García, Patricia, et al. "3D Printing - Assisted Nanoimprint Lithography of Polymers." Advanced Engineering Materials 25.17 (2023): 2300344.

[8] Fakharan Z, Dabirian A. Metal grid technologies for flexible transparent conductors in large - area optoelectronics[J]. Current Applied Physics, 2021, 31: 105 - 121.

[9] Liu, Duanzi * *g, et al. "Nanoimprinted Quasi - 2D Perovskites toward High - Performance Polarization - Sensitive Photodetectors." Advanced Optical Materials (2024): 2302411.

[10] 杨志伟,刘禹辰,叶金羽. 纳米压印技术在光电领域的应用[J]. 新技术新工艺,2023(10):17 - 25.

[11] Oh, Junho, et al. "Dissolvable template nanoimprint lithography: a facile and versatile nanoscale replication tech-

nique." Nano letters 20.10 (2020): 6989 – 6997.

[12] Agrawal, Harshal, and Erik C. Garnett. "Nanocube imprint lithography." ACS nano 14.9 (2020): 11009 – 11016.

[13] Jacobo – Martín, Alejandra, et al. "Roll – to – roll nanoimprint lithography of high efficiency Fresnel lenses for micro – concentrator photovoltaics." Optics Express 29.21 (2021): 34135 – 34149.

[14] McGrath, Fionnuala, et al. "Structural, optical, and electrical properties of silver gratings prepared by nanoimprint lithography of nanoparticle ink." Applied Surface Science 537 (2021): 147892.

[15] Ha, Yeonjoo, et al. "Fabrication of Nanostructures on a Large – Area Substrate with a Minimized Stitch Error Using the Step – and – Repeat Nanoimprint Process." Materials 15.17 (2022): 6036.

[16] Zhao, Zhi – Jun, et al. "Large – area nanogap – controlled 3D nanoarchitectures fabricated via layer – by – layer nanoimprint." Acs Nano 15.1 (2021): 503 – 514.

[17] Luo, Runqiu, et al. "Research on metasurface holographic imaging based on nanoimprint lithography." Second Optics Frontier Conference (OFS 2022). Vol. 12307. SPIE, 2022.

[18] Choi, Hojung, et al. "Realization of high aspect ratio metalenses by facile nanoimprint lithography using water – soluble stamps." PhotoniX 4.1 (2023): 18.

[19] Tsukamoto, Sou, et al. "Proposal of hybrid deep learning systems for process and material design in thermal nanoimprint lithography." Journal of photopolymer science and technology 34.2 (2021): 145 – 148.

[20] Modaresialam, Mehrnaz, et al. "Nanoimprint lithography processing of inorganic – based materials." Chemistry of Materials 33.14 (2021): 5464 – 5482.

[21] Chen, Hanxu, et al. "Bio - inspired imprinting materials for biomedical applications." Advanced Science 9.28 (2022): 2202038.

[22] Peng, Zhiting, et al. "Continuous roller nanoimprinting: next generation lithography." Nanoscale 15.27 (2023): 11403 – 11421.