文章编号:1674-2869(2025)01-0028-09

光敏聚酰亚胺的改性及应用研究进展

郑 毅[1],凡纪鹏[1],邓一坤[2],项 坤[1],王海涛[1],邹 菁*[1]
1. 武汉工程大学化学与环境工程学院,新型催化材料湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430205;
2. 曼彻斯特城市大学工程学院化学系,曼彻斯特 M15 6BH

摘 要:光敏聚酰亚胺(PSPI)具有优异的感光性、机械性以及良好的化学和热稳定性,近年来被广泛应用于先进封装、微电子系统、有机发光二极管显示等新兴领域。首先根据曝光区溶解性的差异详细阐述了目前正性PSPI和负性PSPI的种类、结构与性能;随后从PSPI的结构设计、PSPI制备过程中添加剂的加入、PSPI原料配方的改进3个方面系统分析了PSPI光敏性能的提升策略;紧接着对PSPI在集成电路、微电子、3D打印以及生物医学器件等领域的应用和未来发展趋势进行了全面介绍;最后对PSPI的光敏性、化学稳定性、耐热性、机械性、环保性的进一步优化提出了调整PSPI聚合条件、开发新型光敏剂、增强PSPI抗溶剂性、引入交联剂、优化PSPI制备方法等建设性意见。

关键词:光敏聚酰亚胺;曝光溶解度;光敏性;提升策略;应用领域
中图分类号:U446 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202408011

Research progress on the modification and applications of photosensitive polyimide

ZHENG Yi[1], *FAN Jipeng*[1], *DENG Yikun*[2], *XIANG Kun*[1], *WANG Haitao*[1], *ZOU Jing*[*1]
1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Novel Catalytic Materials of Hubei Engineering Research Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Department of Chemistry, School of Engineering, Manchester Metropolitan University, Manchester M15 6BH, United Kingdom

Abstract: In recent years, photosensitive polyimide (PSPI) has been widely employed in emerging fields such as advanced packaging, microelectronics systems, and organic light-emitting diode displays due to its excellent photosensitivity, mechanical properties, and outstanding chemical and thermal stability. In this review, the types, structures and properties of positive PSPIs and negative PSPIs are described in detail according to the differences in solubility in the exposure area. Subsequently, the strategies for improving the photosensitive performance of PSPIs are systematically analyzed from three aspects: the structural design of PSPIs, the addition of additives in the preparation process of PSPIs, and the improvement of PSPI raw material formulations. Then, the applications and future development trends of PSPI in the fields of integrated circuits, microelectronics, 3D printing and biomedical devices are comprehensively introduced. Finally, some constructive suggestions for further optimization of photosensitivity, chemical stability, heat resistance, mechanical properties, and environmental friendliness of PSPIs are put forward, including adjusting the polymerization conditions of PSPIs, developing new photosensitizers, enhancing the solvent resistance of PSPIs, introducing crosslinkers, and optimizing the preparation methods of PSPIs.

Keywords: photosensitive polyimide; exposure solubility; photosensitivity; enhancement strategy; application field

收稿日期:2024-08-09
基金项目:2023年工信部高质量发展专项(TC230A076-18)
作者简介:郑 毅,硕士研究生。Email:2908134272@qq.com
***通信作者**:邹 菁,博士,教授。Email:jingzou@wit.edu.cn
引文格式:郑毅,凡纪鹏,邓一坤,等.光敏聚酰亚胺的改性及应用研究进展[J].武汉工程大学学报,2025,47(1):28-36.

光敏聚酰亚胺(photosensitive polyimide,PSPI)是一种在光照条件下发生化学反应或物理变化的聚酰亚胺材料。PSPI具有独特的光敏性能和优异的物理化学性质,广泛应用于微电子器件、光学器件和生物医学器件等领域。首先,PSPI具有良好的光敏性,这一特性源于其分子结构中特别设计的光敏基团[1-4],这些基团能够通过紫外光照射引发化学反应,调控材料性质。在光刻工艺中,将PSPI涂覆在基底上,然后通过掩模暴露于紫外光源下[5],可以实现微米级甚至纳米级的图案化处理,为微电子器件的制备提供了重要的技术支持[6-7]。其次,PSPI具有优异的机械性能,如高强度、高模量和良好的耐磨性,这些特性源自其分子链结构的固有刚性和强度,这种结构为其提供了能够有效抵御外部力量的能力,对于保持器件的结构完整性、稳定性和可靠性至关重要[8]。故使其在微电子器件中具有稳定的性能,可用于制备集成电路、传感器和执行器等微型器件[9]。PSPI还因其出色的热稳定性在工业中应用广泛,其特有的高分子链结构能抵御高温热应力,保持性能稳定。PSPI拥有的强键能与交联网络结构共同赋予了其卓越的耐热性,确保在极端温度下物理化学性质不变[10]。作为光刻胶,它可以精准图案化且耐高温处理,保障电路制造的质量。同时,PSPI的热稳定性也适用于微机电、高性能电子等高温环境领域,提供长期可靠性与稳定性[11]。此外,PSPI因其分子链内强固化学键赋予的极高化学稳定性,能长期抵御酸、碱及有机溶剂腐蚀,保持物理化学性质不变。这一特性在微电子器件制备中发挥着重要作用,同时在生物医学领域,如体内传感器与医疗设备制造中,也能确保长期化学稳定与生物相容性[12]。对于微流控芯片、化学传感器等分析设备,PSPI的化学惰性保障反应纯度和检测精度,可提升实验结果的可靠性和可重复性。因此,PSPI作为一种重要的光电功能材料,在微电子器件、光学器件和生物医学器件等领域具有重要的应用价值和发展前景。

1　PSPI的类型

PSPI由于曝光区溶解性的差异,可分为两类:正性PSPI,曝光后聚合物溶解性增加而可溶于显影液中;负性PSPI,曝光后聚合物溶解性减弱而不溶于显影液中。

1.1　正性PSPI

1.1.1　聚酰胺酸型PSPI　聚酰胺酸型PSPI是一种重要的PSPI,它的分子结构中特有酰胺基团,这些基团的存在不仅为材料提供了良好的光敏性,还赋予了它出色的热稳定性。在紫外光的照射下,聚酰胺酸型PSPI能够通过光化学反应快速地发生交联或降解,这种光诱导的变化使得材料在曝光区域与非曝光区域的溶解速率产生显著差异,从而实现高分辨率的图案化处理。如图1(a)所示,Seino等[13]为了合成具有良好热稳定性、低介电常数和低吸湿性的正性PSPI,用均苯四甲酸二酐、3,3',4,4'-联苯四甲酸二酐和2,2'-双(三氟甲基)联苯胺通过聚合反应制备得到含氟聚酰胺酸(polyamidic acid,PAA)前体,然后将其与重氮萘醌(diazonaphthoquinone,DNQ)类化合物混合热处理制得正性PSPI。并发现含有30%质量分数DNQ的PSPI在使用质量浓度为0.3%的四甲基氢氧化铵(tetramethylammonium hydroxide,TMAH)水溶液显影时,在365 nm光照下具有80 mJ/cm^{2}的灵敏度和7.8的对比度。

在集成电路的制造过程中,尤其是光刻步骤,聚酰胺酸型PSPI作为光刻胶使用,能够精确地将掩模图案转移到硅片或其他基底材料上。由于PSPI在高温下具有热稳定性,能够耐受后续工艺步骤中的烘烤过程,保持图案的完整性和精确度,这对于生产高性能、小尺寸的电子器件至关重要。此外,聚酰胺酸型PSPI的光敏性和热稳定性的结合,也使得它在其他微纳米加工技术(微接触印刷、纳米压印等)中有着广泛的应用。

1.1.2　聚酰胺酯型PSPI　聚酰胺酯型PSPI是一种具有独特化学结构的PSPI,其分子链中不仅含有能提供良好光敏性的酰胺基团,还包含赋予材料高耐热性和耐溶剂性的酯键[14]。这种结构的特殊性使得聚酰胺酯型PSPI在受到高温或化学试剂作用时能够保持卓越的稳定性和可靠性,从而在一系列要求严苛的应用中表现出连续优化的性能。聚酰胺酯型PSPI能在高达数百摄氏度的温度下长时间工作而不发生分解或性能退化,这种高耐热性使其成为高温工艺中的理想原材料。同时,其耐溶剂性确保了在与各种有机溶剂接触时,材料不会发生溶胀、溶解或性能损失,这对于涉及化学处理的应用场景至关重要。如图1(b)所示,Hsu等[15]开发了一种新型正性工作、可在水性碱性溶液中显影的PSPI前驱体,该前驱体是基于部分DNQ封端的聚酰胺酯,当DNQ摩尔分数为25%时,利用质量分数为1.25%的TMAH水溶液显影,PSPI可获得良好的光敏性(176 mJ/cm^2)和对

比度(1.68)。

此外,聚酰胺酯型PSPI的连续优化性能还体现在其加工过程中。由于其分子设计中的光敏性,它可以通过光刻技术实现精确的图案化,这是一种在集成电路制造和其他微纳米技术领域中广泛使用的关键工艺。在这些工艺中,聚酰胺酯型PSPI的光敏特性允许它在紫外光照射下迅速发生交联,形成稳定且耐久的图案,而其在后续高温处理中保持的热稳定性则确保了图案的精度和完整性。

1.1.3 聚异酰亚胺型PSPI 聚异酰亚胺型PSPI是一种高性能的聚酰亚胺衍生物,其分子结构中引入了异酰亚胺基团,这些基团为材料带来了显著的机械性能提升和化学稳定性的优化。这种类型的PSPI在连续优化的过程中,不仅保持了聚酰亚胺固有的优良特性,还通过分子设计的创新,增强了其在极端环境下的应用能力。聚异酰亚胺型PSPI优异的抗拉强度、韧性和耐磨损性,使其拥有出色的机械性能,在机械应力大的应用环境中能够保持良好的稳定性和耐用性。同时,其化学稳定性的优化体现在对各种化学物质、溶剂和腐蚀性环境的出色抵抗力,这使得聚异酰亚胺型PSPI在化学腐蚀风险高的应用中具有更长的使用寿命和更可靠的性能。如图1(c)所示,Mochizuki等[16]通过加成聚合反应合成了含有六氟异丙基和砜基的聚异酰亚胺,六氟异丙基基团和砜基基团的存在赋予了聚异酰亚胺良好的有机溶剂溶解性和透光性,含有20%质量分数DNQ的PSPI在150 ℃处理后,曝光区的溶解速率比未曝光区快约80倍,表现出良好的溶解对比度。并且在365和436 nm光照下,分别具有300和250 mJ/cm^{2}的灵敏度,以及4.5和2.4的对比度。

在高温工艺的应用领域,聚异酰亚胺型PSPI展现出了其连续优化的性能优势。它不仅能够在高达数百摄氏度的温度下保持物理和化学性质的稳定性,还能够在这些条件下维持其优异的机械性能。这种在高温下的出色表现,使得聚异酰亚胺型PSPI成为航空航天、汽车工业、半导体制造以及电子封装等领域的理想材料。

此外,聚异酰亚胺型PSPI在加工过程中也显示出连续优化的特点。它可以通过标准的微细加工工艺(光刻、蚀刻等)进行精确图案化,而且由于其在高温下的稳定表现,这些图案在进行后续高温处理时能够保持良好的精确度和清晰度[17]。聚异酰亚胺型PSPI可连续优化的特性对于制造高精度微型电子元件及复杂集成电路具有关键作用。

1.1.4 含酚羟基或羧基的聚酰亚胺型PSPI 含有酚羟基或羧基的聚酰亚胺型PSPI因其丰富的官能团而具有显著的可改性和加工性。这些官能团不仅增强了分子间的相互作用,还提供了更多的化学修饰可能性,从而使得这种PSPI能够根据特定的应用需求进行定制和优化。例如,通过化学修饰可以改善其在各种溶剂中的溶解度,或者增强与其它材料的相容性,从而拓展其在不同领域的应用。这种类型的PSPI在有机光电器件的制备中尤其受到欢迎,因为它可以作为有机发光二极管(organic light emission diode,OLED)的理想封装材料。PSPI的卓越封装性能为OLED设备提供了强有力的保护,有效防止水分、氧气等有害物质渗透进入器件内部,从而大幅延长了OLED设备的使用寿命和稳定性。此外,由于PSPI具备良好的透明性和光学特性,它还能够保证OLED显示器件的亮度和色彩的真实性。如图1(d)所示,Jin等[18]合成了一种具有低介电常数的新型正型PSPI,其由可溶性的含羟基的聚酰亚胺和光反应性的DNQ组成。并发现含有20%质量分数DNQ的正性PSPI,具有350 mJ/cm^{2}的光敏度和1.20的对比度,在紫外光照射和5%质量浓度TMAH水溶液中显影后可获得良好的图案。

此外,含酚羟基或羧基的聚酰亚胺型PSPI还可通过表面修饰改善界面特性,增强载流子注入和传输效率,用于制作有机光伏器件、有机场效应晶体管、有机传感器等其他有机电子器件[19]。而且,由于含有酚羟基或羧基的聚酰亚胺型PSPI的可加工性,它亦可制成薄膜、涂层、纳米粒子等多种形态,为构建具有特定形状和结构的有机光电器件提供了极大的灵活性。例如,在柔性电子领域中,PSPI可以被制作成可弯曲的薄膜,用于开发新型的柔性显示器或可穿戴设备。

1.2 负性PSPI

1.2.1 酯型PSPI 酯型PSPI是一种负性PSPI,其分子链中不仅含有提供良好光敏性的酰胺基团,还包含酯键,这使得材料在特定溶剂中具有良好的溶解性。它的光敏性表现在能够通过紫外光照射发生化学变化,形成图案[20]。由于这种类型的PSPI在曝光区域会变得不溶,因此它常用于制备微米级图案的光刻胶,特别是在集成电路制造等领域中,能够实现高分辨率的图案化处理,满足精细加工的需求。如图2(a)所示,Rubner等[21]通过酯键将光敏性基团与聚合物主链连接在一起,在1979年成功合成了一种酯型PSPI。

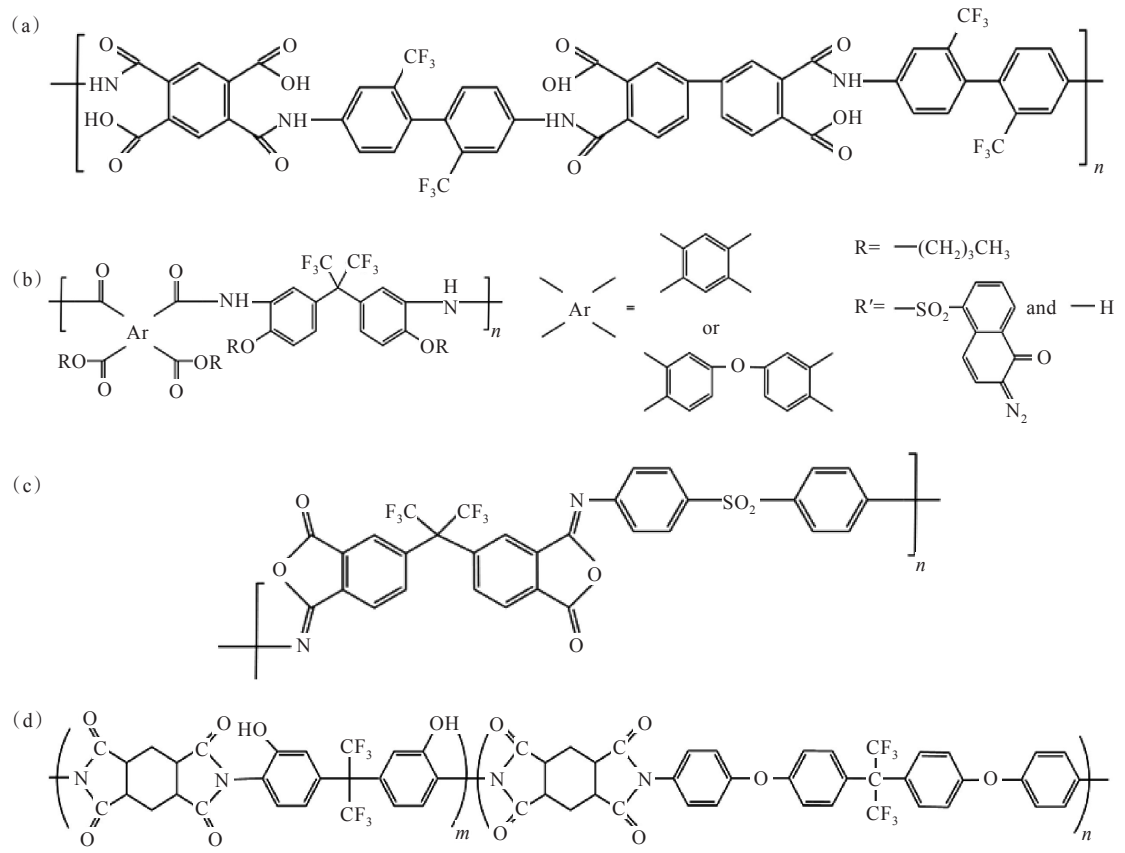

图1　正性PSPI分子式：(a)聚酰胺酸型PSPI[13]，(b)聚酰胺酯型PSPI[15]，(c)聚异酰亚胺型PSPI[16]，(d)可溶性含羟基型PSPI[18]

Fig. 1　Molecular formulas of positive PSPI: (a) poly(amic acid) PSPI[13], (b)poly(amic ester) PSPI[15], (c)isoimide PSPI[16], (d)soluble block PI with a hydroxy group[18]

1.2.2　离子型PSPI　离子型PSPI在其分子结构中含有离子基团，这些基团的存在提高了材料的感光性，使其能够在光刻过程中更敏感地响应光照[22]。这种增强的感光性使得离子型PSPI在微纳加工领域尤为重要，尤其是在需要极高分辨率和精确图案传递的应用中，如半导体芯片的制造，它能够提供清晰的图案定义和优异的尺寸控制。如图2(b)所示，Yoda等[23]在1997年报道了一种新型PSPI前驱体，这种新型PSPI前驱体采用离子键结合的结构，其光反应机理与传统的酯型PSPI不同。通过紫外可见吸收光谱、核磁共振谱、电子自旋共振谱等表征手段，发现其光反应过程涉及光诱导电荷转移复合物的形成和离子自由基对的产生，而不需要进一步的光聚合反应。这种新的光诱导电荷分离现象是离子型PSPI表现出高灵敏度的原因。

1.2.3　自增感型PSPI　自增感型PSPI具有内置增感剂，可自发产生感光效应，从而在光刻过程中实现图案的自增强，适用于制备高分辨率的微结构和光学元件[24]。自增感型PSPI的使用简化了光刻工艺，提高了图案的精度和质量，因此在高精度要求的微机电系统(micro electro mechanical system，MEMS)和光子晶体等领域有着广泛的应用。如图2(c)所示，Jiang等[25]首先通过4,6-二氨基间苯二酚盐酸盐、4,4-二[(4-氨基)噻吩基]二苯甲酮和4,4'-氧双邻苯二甲酸酐的缩聚反应合成了含羟基的聚酰亚胺，然后将其与甲基丙烯酰氯反应，引入光敏的甲基丙烯酯基团，最后得到光刻性能优异的自增感型PSPI，在365 nm紫外光照射下分辨率约为5 μm，灵敏度为150 mJ/cm^2。

1.2.4　化学增幅型PSPI　化学增幅型PSPI在光刻过程中可通过引入特殊的化学反应机制显著增强其感光性能[26]，从而实现高精度的图案化。而且，化学增幅型PSPI能够在较低的光照剂量下形成高分辨率的图案，使其在制备高精度微米级结构和光电子器件时表现出色。例如，在平板显示、光纤耦合和生物芯片等领域，化学增幅型PSPI能够满足对微小尺寸和高精度图案的需求。

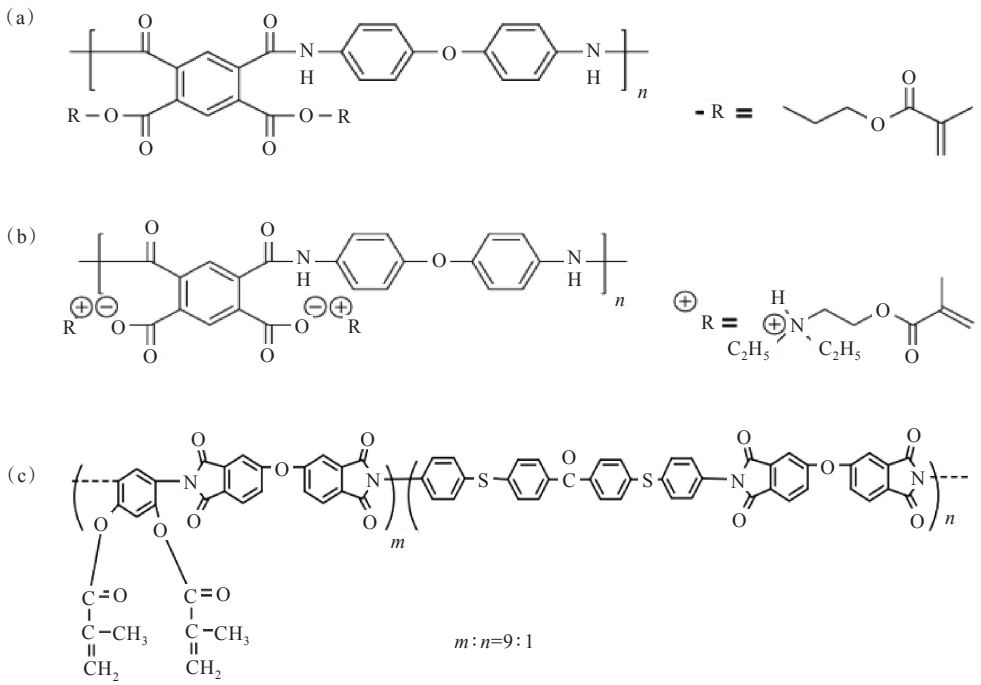

图2 负性PSPI分子式:(a)酯型PSPI[21],(b)离子型PSPI[23],(c)自增感型PSPI[25]

Fig. 2 Molecular formulas of negative PSPI:(a)ester PSPI[21],(b)ionic PSPI[23],(c)self-increasing PSPI[25]

2 PSPI光敏性能改性方法

改进PSPI的光敏性能是实现高分辨率光刻和微电子器件制造中的关键任务之一。PSPI光敏性能的改进方法主要包括结构设计与优化、加入添加剂以及改进材料配方。

2.1 结构设计与优化

为了设计一种无需额外添加光敏剂即可进行光化学反应的PSPI,可以构建一种特殊结构的PSPI。这种PSPI的特征在于其分子结构中嵌入了光反应性的二苯甲酮(benzophenone,BP)单元,并且与之相邻的芳香二胺单体含有邻位取代的烷基。这样的结构设计使得PSPI本身具备光敏性,能够在光照下直接引发化学反应。Wang等[24]将BP部分引入到聚酰亚胺的主链中,并将丙烯酸酯基引入到聚酰亚胺的侧链中,合成了一种新型PSPI,且与之前的含BP的聚酰亚胺相比,引入丙烯酸酯基团提高了光敏性,可以更有效地促进自由基的链式传播,形成交联网络。Zhu等[27]在2019年报道了一种含有BP的新型PSPI,这种新型的PSPI由3,3′,4,4′-二苯甲酮四羧酸二酐、2,2-双(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷和肉桂酰氯通过缩合反应合成,合成过程如图3(a)所示。这是将BP基团引入PSPI主链提高光敏性而无需额外光敏剂的新方法。

2.2 添加剂的加入

在PSPI配方中加入适量的添加剂,如光引发剂,可以显著降低其曝光能量阈值,提高感光速度,但光引发剂的选择应根据具体的曝光光源和所需图案的精度来确定[28]。还可以加入增感剂、交联剂、流平剂等,这些添加剂的合理使用可以进一步改善PSPI的光刻性能、力学性能和光学性能[29]。例如,增感剂可以增强光敏基团对光的吸收能力,交联剂可以提高固化后膜层的力学和电学性能,流平剂则有助于改善涂层的平整度。如图3(b)所示,Song等[30]合成了一种含有邻硝基苄基醚基团的PSPI,随后添加光致产酸剂引发酸催化解效应,加速邻硝基苄基醚基团的裂解,从而显著提高PSPI光敏性。

2.3 材料配方的改进

光敏基团数量的增加可使材料在光照下产生更多的活性中间体或自由基,不仅可以提高材料光敏性,而且还有助于降低光刻曝光能量需求,提高光刻图案分辨率和对比度[31]。除光敏基团外,PSPI的其他成分也会影响其光敏性能。因此,人们可以尝试改进聚酰亚胺树脂的配方,以提高其与光敏剂的相容性和反应活性,从而实现更好的光刻效果。例如,Ma等[32]通过添加光引发剂、交联剂等助剂,优化聚酰亚胺树脂合成配方,成功制得一种在可见光波段(400~700 nm)具有高透明度且光刻性能优异的负性PSPI。

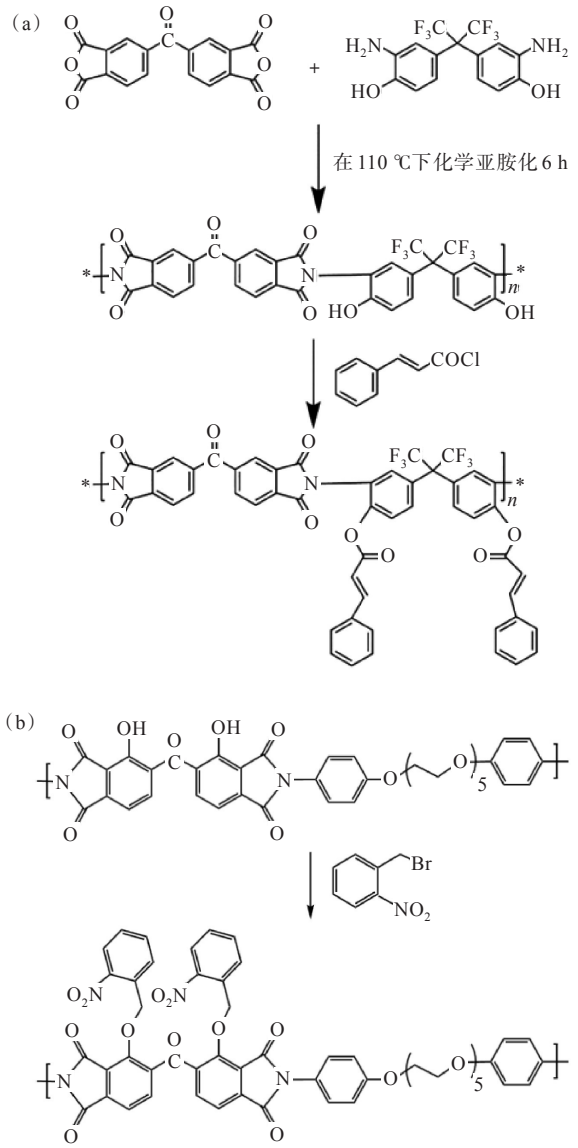

图3　含BP基团的PSPI[27](a)和含邻硝基苄基醚基团的PSPI[30](b)的合成过程

Fig. 3　Synthesis process of PSPI with BP (a)[27] and PSPI with o-nitrobenzylether (b)[30]

3　PSPI的应用

3.1　PSPI在集成电路中的应用

PSPI作为一种性能卓越的光刻胶材料，在集成电路制造中扮演着至关重要的角色。它不仅提供高分辨率、高精度和高耐受性，还能够用于制备微米级别甚至纳米级别的精细图案和结构[33]。在集成电路的生产过程中，PSPI作为光刻胶，通过先进的光刻工艺，能够将设计好的电路图案精确地转移到硅片或其他半导体基板上，实现电路的精确制备和结构的清晰定义。这一过程对于提高电路密度和芯片性能具有至关重要的作用。

随着光子集成电路技术的不断发展，PSPI因其优异的光电特性，在实现高精度和高集成度方面显示出了独特的优势。PSPI能够通过先进的光刻技术实现复杂的光电路图案，进而制造出更小尺寸、更高密度的光电集成器件。这些高度集成的光电器件在处理速度、能耗效率以及对小型化要求极高的便携式设备中都表现出色[29]。Kikuchi等[34]报道了一种利用PSPI绝缘层制造超导集成电路的高效制造工艺，使用PSPI绝缘层可以通过常规光刻工艺进行图形化，无需进行刻蚀过程，并成功制造了使用PSPI绝缘层的钯薄膜电阻。

3.2　PSPI在MEMS中的应用

PSPI因分辨率高、化学稳定性和耐热性强，而成为构建各种微型传感器、微型执行器等复杂MEMS器件的理想选择[35]。MEMS技术的发展为各类智能设备和系统的实现提供了可能，而PSPI则是实现这些微纳电子元件的关键材料。Sato等[36]将PSPI用作传感器表面的密封层，填充了接地壁之间的空间，且在制造T形凸起结构时，PSPI被旋涂并进行图案化，形成10 μm厚的凸起结构，并使得MEMS指纹传感器的制造工艺与CMOS工艺兼容。

3.3　PSPI在OLED显示中的应用

在OLED显示技术的制造中，PSPI的应用尤为重要。PSPI不仅可以作为OLED显示器的封装材料，保护器件免受外界环境的影响，提高其稳定性和寿命，还可以作为亮度增强层，提升显示器的亮度和对比度。此外，由于PSPI的优异光学性能和良好的机械柔性，它在柔性OLED显示器的制造中也显示出巨大的潜力，有望用于开发新型的柔性显示屏和柔性照明设备[37]。随着可穿戴电子和柔性电子的兴起，PSPI在OLED领域的应用前景被进一步扩展。Shi等[38]报道了PSPI作为热稳定剂开发用于OLED像素定义层(pixel define layer，PDL)图案化的黑色光刻胶的研究，PSPI的加入可以让黑色光刻胶承受光刻工艺和后烘烤处理，并且使用黑色PDL可以在不需要额外的黑色基质图案和偏振膜的情况下提高可见性。图4是OLED横截面图。

3.4　PSPI在3D打印领域中的应用

3D打印也称增材制造技术，是一种将数字模型转化为实体对象的技术，可将材料高效灵活地转变为所需零部件结构[39]。传统3D打印聚合物树脂(聚氨酯、环氧树脂、丙烯酸树脂等)虽可用于构建手术支架等复杂结构，但这些树脂热力学性质较差，严重限制了3D打印在航空航天等高端领

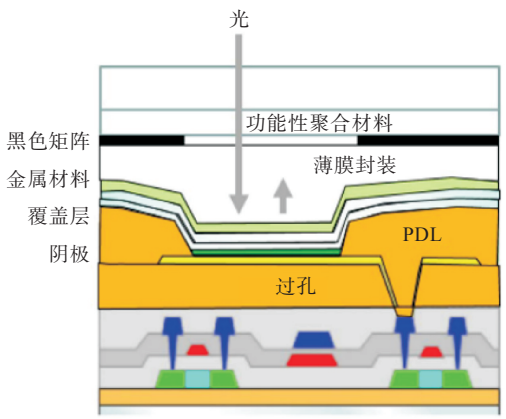

图4 OLED横截面结构图[38]

Fig. 4 Cross-sectional view of OLED panel[38]

域中的应用。PSPI不仅具有优异的热力学性质，而且拥有独特的光响应性，在3D打印领域表现出良好的应用前景。现阶段应用于3D打印领域的多为负性PSPI。比较常见的一种聚酰亚胺3D打印构件形成方法是从PSPI前体溶液中进行光交联获得3D凝胶，再将凝胶进行固化得到固态构件[40]。如图5所示，Pagliano等[41]利用商用PSPI前驱体和双光子聚合技术，实现了微米和亚微米尺度的聚酰亚胺物体3D打印。

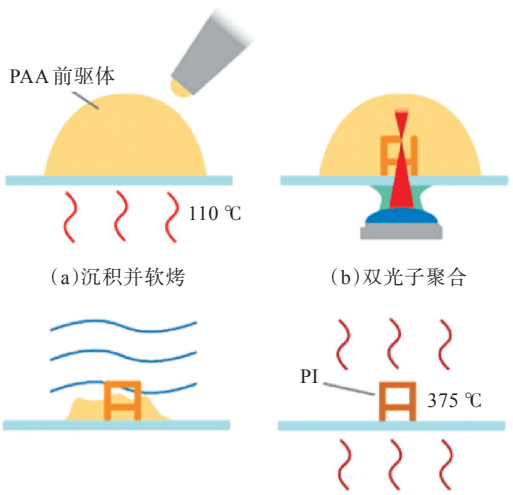

图5 微型3D打印聚酰亚胺物体的制造工艺[41]

Fig. 5 Fabrication process of micro 3D-printed polyimide objects[41]

3.5 PSPI在生物医学器件中的应用

在生物医学领域，PSPI的应用同样不容忽视。它的生物相容性和化学稳定性使其成为制造生物传感器、微流控芯片和医用成像器件等的理想材料[42]。PSPI可以用于制备高灵敏度的生物传感器，用于检测蛋白质、DNA和细胞等生物标志物，从而在疾病诊断和生物研究中发挥作用。此外，PSPI在微流控芯片制造中的应用，可以实现对微量液体的精确操控和分析，这对于实验室芯片技术的发展至关重要。同时，PSPI也被用于制造医用成像器件，如光学相干断层扫描探头和生物医学光学成像系统，这些器件为临床诊断和治疗提供了重要的技术支持[43]。随着医疗技术的进步，对于高性能生物兼容材料的需求日益增长，PSPI因其独特的性质在这一领域中占据着越来越重要的地位。Sun等[44]报道了对PSPI生物相容性的评估，并通过测试机械性能、细胞培养稳定性以及对成纤维细胞Schwan细胞的影响，评估了这些材料的生物相容性。PSPI材料无细胞毒性，能够良好支持成纤维细胞的黏附和生长，以及保持Schwann细胞的形态，表明PSPI可能适用于植入性生物医学设备。

4 结论与展望

本文综述了PSPI的改性及应用研究进展，介绍了不同种类PSPI的结构特点及合成工艺，总结了PSPI光敏性能的改进方法。虽然PSPI已在微电子、显示面板、芯片封装等尖端科技领域展现出了其不可替代的价值，然而PSPI性能还需进一步优化，以满足不同应用领域的需求，尤其是PSPI的光学、机械和化学性能的改善。

(1)光学性能优化：可通过改变材料的化学配方、调整聚合条件或添加光学增强剂来改善其透明度、折射率、吸收特性等。

(2)光敏性能改进：通过研究新的光敏剂、改进光敏机理、优化光刻工艺参数等方法，以提高材料的光敏度和分辨率，并减少光刻过程中的误差和残留物。

(3)耐热性和机械性能增强：通过改变聚合反应的条件、引入交联剂、优化后续热处理步骤等有效提高聚合物的耐热性和机械性能。

(4)化学稳定性改善：探索添加抗氧化剂、增强材料的化学惰性、改善其抗溶剂性等方法，以提高其在恶劣化学环境下的稳定性。

(5)环境友好性改进：随着对环境友好材料需求的增加，研究人员也可能会探索开发更环保的PSPI制备方法，例如替代有毒成分、采用可再生资源等方法。

参考文献

[1] 潘丽，刘甜甜，武海涛，等.电子级聚酰亚胺薄膜的市场现状和研究进展[J].橡塑技术与装备，2023，49

(7)：1-5.

[2] FU M C, HIGASHIHARA T, UEDA M. Recent progress in thermally stable and photosensitive polymers [J]. Polymer Journal, 2018, 50(1): 57-76.

[3] MO W J, ZHANG Z P, RONG M Z, et al. Photosensitive polyimide enabled simple, reversible and environmentally friendly selective metallization on diverse substrates [J]. Applied Materials Today, 2024, 38: 102159.

[4] YU G N, MA Q W, CHANG H Y, et al. Advancements in synthesis strategies and optoelectronic applications of bio-based photosensitive polyimides [J]. International Journal of Optics, 2024, 2024 (1): 5541865.

[5] FUKUKAWA K I, UEDA M. Recent progress of photosensitive polyimides [J]. Polymer Journal, 2008, 40(4): 281-296.

[6] SASAKI T. Low temperature curable polyimide for advanced package [J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2016, 29(3): 379-282.

[7] SEZER HICYILMAZ A, CELIK BEDELOGLU A. Applications of polyimide coatings: a review [J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(3): 363.

[8] KUOROSAWA T, CHUEH C C, LIU C L, et al. High performance volatile polymeric memory devices based on novel triphenylamine-based polyimides containing mono- or dual-mediated phenoxy linkages [J]. Macromolecules, 2010, 43(3): 1236-1244.

[9] 李铭新，公聪聪，何钧. 聚酰亚胺在微电子领域的应用及研究进展[J]. 新材料产业，2018(2)：46-51.

[10] OYAMA T. Photosensitive engineering plastics based on reaction development patterning [J]. Polymer Journal, 2018, 50(6): 419-429.

[11] TOMIKAWA M, OKUDA R, OHNISHI H. Photosensitive polyimide for packaging applications [J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28(1): 73-77.

[12] 孙自淑，马家举，江棂. 光敏聚酰亚胺的发展现状[J]. 化工新型材料，2005，33(10)：17-20.

[13] SEINO H, MOCHIZUKI A, HABA O, et al. A positive-working photosensitive alkaline-developable polyimide with a highly dimensional stability and low dielectric constant based on poly(amic acid) as a polyimide precursor and diazonaphthoquinone as a photosensitive compound [J]. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, 1998, 36(13): 2261-2267.

[14] LAI X W, ZHANG J L, YANG Z X, et al. Synthesis of poly(amic ester) with controlled molecular weight for photosensitive polyimide in advanced package [J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107316.

[15] HSU S L C, LEE P I, KING J S, et al. Novel positive-working aqueous-base developable photosensitive polyimide precursors based on diazonaphthoquinone-capped polyamic esters [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90(8): 2293-2300.

[16] MOCHIZUKI A, TERANISHI T, UEDA M, et al. Positive-working alkaline-developable photosensitive polyimide precursor based on polyisoimide using diazonaphthoquinone as a dissolution inhibitor [J]. Polymer, 1995, 36(11): 2153-2158.

[17] XU Q, SHI X C, LI Y H, et al. Novel acetylene-terminated thermosetting polyisoimides with excellent solubility and performed as efficient heat shields composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(4): 51559.

[18] JIN X Z, ISHII H. Novel positive-type photosensitive polyimide with low dielectric constant [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98(1): 15-21.

[19] YOON J Y, WEE D, KIM Y H, et al. Facile photo-patterning of source and drain electrodes with photo-sensitive polyimide for organic thin-film transistors [J]. Synthetic Metals, 2013, 163: 47-50.

[20] WINDRICH F, KAPPERT E J, MALANIN M, et al. In-situ imidization analysis in microscale thin films of an ester-type photosensitive polyimide for microelectronic packaging applications [J]. European Polymer Journal, 2016, 84: 279-291.

[21] RUBNER R, AHNE H, KUEHN E, et al. Photopolymer: the direct way to polyimide patterns [J]. Photographic Science and Engineering, 1979, 23(5): 303-309.

[22] ASANO M, EGUCHI M, KUSANO K, et al. Development and commercialization of ionic-type photosensitive polyimides [J]. Polymers for Advanced Technologies, 1993, 4(4): 261-267.

[23] YODA N. Recent development of advanced functional polymers for semiconductor encapsulants of integrated circuit chips and high-temperature photoresist for electronic applications [J]. Polymers for Advanced Technologies, 1997, 8(4): 215-226.

[24] WANG R, JIANG X S, YIN J. Autophotosensitive negative polyimide [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(5): 3057-3062.

[25] JIANG X S, LI H, WANG H Y, et al. A novel negative photoinitiator-free photosensitive polyimide [J]. Polymer, 2006, 47(9): 2942-2945.

[26] 郑祥飞，孙小侠，刘敬成，等. 化学增幅型光刻胶材料研究进展 [J]. 影像科学与光化学，2020，38(3)：

392-408.

[27] ZHU G, WANG F, GONG X J, et al. Preparation and alignment properties of photosensitive polyimide containing benzophenone in main chain [J]. Liquid Crystals, 2020, 47(5): 750-760.

[28] YUAN C Y, WANG F, ZHU G, et al. Study on the effect of small molecule photosensitizer and photoinitiator on alignment behavior of photosensitive polyimide [J]. Liquid Crystals, 2021, 48(7): 1034-1042.

[29] 郭海泉,杨正华,高连勋. 光敏聚酰亚胺光刻胶研究进展[J]. 应用化学,2021,38(9):1119-1137.

[30] SONG G S, HEO Y J, BAEK J J, et al. The improved photosensitivity of photosensitive polyimides containing o-nitrobenzyl ether groups induced by the addition of photoacid generator [J]. Journal of Polymer Science, 2021, 59(4): 340-352.

[31] HAJIBEYGI M, SHABANIAN M. Preparation and characterization of new organosoluble polyamides with good thermal properties containing photosensitive group in the main chain [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126(1): 280-288.

[32] MA J X, YUAN L L, FAN S N, et al. Negative-tone photosensitive polyimide with high transparency [J]. European Polymer Journal, 2023, 192: 112071.

[33] SASAKI T. Low temperature curable polyimide for advanced package [J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2016, 29(3): 379-382.

[34] KIKUCHI K, GOTO M, NAKAGAWA H, et al. Efficient fabrication process for superconducting integrated circuits using photosensitive polyimide insulation layers [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 94-97.

[35] DONG Z H, HE Q P, SHEN D W, et al. Microfabrication of functional polyimide films and microstructures for flexible MEMS applications [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9: 31.

[36] SATO N, SHIGEMATSU S, MORIMURA H, et al. Novel surface structure and its fabrication process for MEMS fingerprint sensor [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(5): 1026-1032.

[37] 周钰卜,潘钰宇,何国晖,等. 柔性白光有机发光二极管的研究进展[J]. 半导体技术,2024,49(5):397-416.

[38] SHI G, PARK J W, PARK L S. Black photoresist for patterning pixel define layer of organic light emitting diode with polyimide as thermal stabilizer [J]. Materials Sciences and Applications, 2018, 9(6): 554-564.

[39] LIGON S C, LISKA R, STAMPFL J, et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing [J]. Chemical Reviews, 2017, 117(15): 10212-10290.

[40] HEGDE M, MEENAKSHISUNDARAM V, CHARTRAIN N, et al. 3D printing all-aromatic polyimides using mask-projection stereolithography: processing the nonprocessable [J]. Advanced Materials, 2017, 29(31): 1701240.

[41] PAGLIANO S, SCHRÖDER S, STEMME G, et al. 3D printing by two-photon polymerization of polyimide objects and demonstration of a 3D-printed micro-hotplate [J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(19): 2300229.

[42] SHU J J, ZHOU Z F, LIANG H P, et al. Polyimide as a biomedical material: advantages and applications [J]. Nanoscale Advances, 2024, 6(17): 4309-4324.

[43] 梁建东,杨炎,董帅,等. 自修复电子器件的研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2022,44(1):9-19.

[44] SUN Y, LACOUR S P, BROOKS R A, et al. Assessment of the biocompatibility of photosensitive polyimide for implantable medical device use [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2009, 90(3): 648-655.

本文编辑:苗 变