

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.028

负性光敏聚酰亚胺研究与应用进展

韩兵, 李铭新

(波米科技有限公司, 山东聊城 252300)

摘要: 简述了负性光敏聚酰亚胺 (n-PSPI) 材料的发展史, 综述了近年来 n-PSPI 材料国内外的研究与应用进展。根据 n-PSPI 材料光致显影机理的不同主要分为酯型、离子型、光产酸型、光产碱型和自增感型, 分别阐述了各类型材料的优缺点。简述了目前市场规模商业化的 n-PSPI 产品及其性能参数, 最后对未来 n-PSPI 材料的发展与应用方向进行了展望。

关键词: 负性; 光敏型聚酰亚胺; 酯型; 离子型; 自增感型

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0158-05

Progress in Research and Application of Negative Photosensitive Polyimides

Han Bing, Li Mingxin

(Pome Technology Co., Ltd., Liaocheng 252300, China)

Abstract: The development history of negative photosensitive polyimide (n-PSPI) materials was briefly described and the progress in research and application of n-PSPI materials at home and abroad in recent years were summarized. According to the different photo-developing mechanism of photosensitive polyimide materials, it was mainly divided into ester type, ionic type, PAG type, PBG type and self-photosensitive type, the advantages and disadvantages of various types of materials were expounded. The n-PSPI products commercialized in the market at present were briefly introduced. Finally, the future development and application of n-PSPI materials were prospected.

Keywords: negative; photosensitive polyimide; ester type; ionic type; self-photosensitive type

聚酰亚胺 (PI) 由于其耐热性好、力学强度高、介电常数低、与基板的粘附性高等特点^[1], 适用于微电子器件的缓冲层、半导体元件的 α 粒子遮挡、表面保护、层间介电或绝缘、OLED 元件的绝缘层等^[2-6]。PI 层上需要刻蚀各种图案来实现所需的微细联接孔道或者串口来实现整个器件的联接。传统的工艺需要在 PI 层上涂覆一层光刻胶, 先在上层光刻胶上刻蚀所需的图案, 再通过光致图案化的涂层充当掩模板来使下层的 PI 涂层图案化, 这种方法步骤繁多, 工艺复杂, 成本高昂。因此具有直接光刻图案功能的光敏性 PI (PSPI) 应运而生。

PSPI 是指对紫外线 (UV)、X 射线、电子束或离子束等敏感的 PI 材料, 可以通过掩模板曝光, 直接通过曝光区和非曝光区 PI 的溶解度不同来使其图案化, 从而使复杂的工艺简化。根据 PSPI 涂层曝光后获得图案的机理不同可分为正性 PSPI 和负性 PSPI (n-PSPI)。正性 PSPI 是光致降解型, 曝

光区 PI 随曝光进行降解反应, 导致 PI 的溶解度升高, 溶于显影剂被冲洗掉, 所得图案与掩模板相同; 而 n-PSPI 是光致交联型 PI, 曝光区的 PI 随曝光发生交联, 导致聚合物溶解度降低, 未曝光区溶于显影剂被冲洗掉所得图案与掩模图案相反。笔者主要针对 n-PSPI 展开相关介绍。

1 n-PSPI 的发展史

1971 年, R. Kerwin 等^[7]首次报道了 PSPI 的制备, 通过向聚酰胺酸 (PAA) 溶液中加入少量重铬酸钾的方法制备出 PSPI, 然而所得到的 PSPI 非常不稳定, 只能维持 4~8 h, 没有应用价值。1974 年, 第一个完全有机光刻胶被开发出来, 它由 PI 前体组成, 结构上具有可以进行光聚合反应的甲基丙烯酸酯基团, 在光照条件下甲基丙烯酸酯的双键发生交联, 使曝光区和非曝光区在显影剂中的溶解度不同, 形成图案。基于这一化学原理的光刻胶已经在市场上销售, 并应用于生产线上。日本东京的旭化成化学株式会社、美国威尔

通信作者: 李铭新, 高级工程师, 主要研究方向为聚酰亚胺材料

收稿日期: 2021-08-19

引用格式: 韩兵, 李铭新. 负性光敏聚酰亚胺研究与应用进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11): 158-162.

Han Bing, Li Mingxin. Progress in research and application of negative photosensitive polyimides[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 158-162.

明顿市杜邦公司、瑞士巴塞尔的 OCG 已将酯型 PSPI 前体商业化,市场上的 PIML, Pyralin, PI 2700, Probimide 300 和 Probimide 7000 在光敏性、力学性能和粘附性能方面表现较佳。这些 PSPI 虽然在光敏度、主链结构和分子量方面有所不同,但对于生产线的 $200 \sim 400 \text{ mJ/cm}^2$ 都是足够敏感的。

随后,日本东丽公司在 1981 年首次研发出了离子型 PSPI 前驱体组合物并将其商业化^[8],即“Photoneece”系列产品。自增感型 PSPI 利用聚合物本身的光反应活性基团使聚合物链上的二苯甲酮结构发生交联, Probimide 400 即为此种类型的产品。此外,阿莫科化工公司还用 Amoco 化学法制备了可溶性高透明度的 PSPI 并命名为 Ultradel.7501,实现了商业化。

2 n-PSPI 的主要类型

n-PSPI 不仅在合成工艺上较一般 PI 繁琐,其配方也非常复杂。除聚合物外,还需要添加阻聚剂、光敏剂、交联剂、偶联剂等,使其整体性能达到最佳。根据 n-PSPI 的光致显影机理不同可分为自由基引发型(包括酯型和离子型)、光产酸(PAG)型、光产碱(PBG)型和自增感型。笔者针对这五种类型的 n-PSPI 展开探讨。

2.1 酯型 n-PSPI

酯型 n-PSPI 是基于前驱体 PAA,通过化学反应将光反应性甲基丙烯酸酯基团以共价键连接到羧酸基团形成酯基。Hou Haoqing 等^[9]通过光反应性单体甲基丙烯酸羟乙酯与主链上的羧基进行酯化反应得到第一种具有实际应用价值的光敏性聚酰胺酸酯聚合物,其最佳光敏度达到 $5 \sim 10 \text{ mJ/cm}^2$ 。在 UV 照射下,曝光区的甲基丙烯酸基团发生自由基共聚反应,在显影剂中的溶解度降低,得到负性图案。S. Hsu 等^[10]以苯膦酰二氯为活化剂合成了一种负性聚酰胺酸酯,与光敏剂、交联剂复配,所制得的树脂组合物可在碱溶液中显影,感光度为 452 mJ/cm^2 ,对比度为 1.11,分辨率为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 。H. Takahashi 等^[11]采用酰氯合成的方法制备了一种酯型的 n-PSPI 树脂前驱体,与光引发剂、交联剂等相关助剂复配,配制的 n-PSPI 可实现低于 300°C 固化,合成路线如图 1 所示。然而,采用酰氯合成的方法在合成过程中会引入氯离子,残留在树脂中的氯离子会影响 n-PSPI 的介电性能,同时还会腐蚀金属基材,对电子器件造成严重损害。

为避免引入氯离子,科学家们探索了各种合成工艺。M. Yoshida 等^[12]将光反应性单体连接到芳香酸酐上,得到二酸二酯后,在 N, N' -二环己基碳二亚胺(DCC)的作用下,与二胺进行缩合,得到 n-PSPI,合成路线如图 2 所示。科学家们也研究出了其它的制备方法,如采用酰亚胺化合物作为缩合剂可制备出酯型 n-PSPI。光反应性单体不止甲基丙烯酸酯类,还有其它单体如肉桂酸类等。目前市场上的 n-PSPI 大

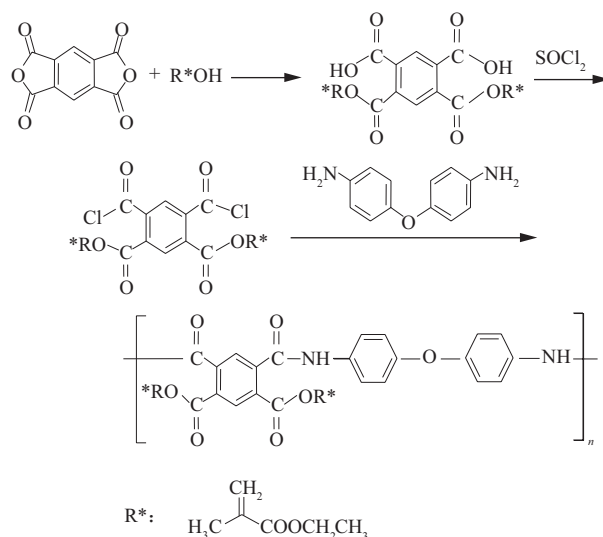


图 1 酯型 n-PSPI 的酰氯合成路线

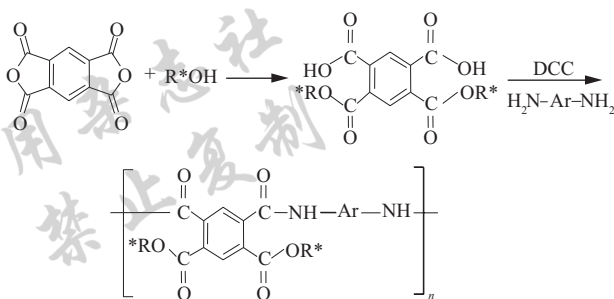


图 2 酯型 n-PSPI 的 DCC 合成路线

多为酯型,区别是各公司采用的感光基团有所不同。

酯型 n-PSPI 是基于 PAA,产品光敏性能优异,分辨率与灵敏度高,技术成熟并已实现商业化。然而其制备过程复杂,中间过程繁琐,高温固化热失重较大,留膜率低。L. J. Hwan^[13-14]报道了预亚胺化可溶性 PI,可在一定程度上减小产品的固化热失重问题,提高留膜率,但是制备过程复杂繁琐,仍有待改善。

2.2 离子型 n-PSPI

离子型 n-PSPI 与酯型 n-PSPI 一样,都是基于 PAA,并引入光反应性单体。不同的是离子型 n-PSPI 的光反应性基团是通过离子键与 PAA 连接,合成方法如图 3 所示。通过光敏性叔胺基与 PAA 主链中的羧基相互作用,胺基正离子与羧基负离子以离子键的形式连接在一起。在 UV 照射下,曝光区的光敏性基团相互发生交联反应,溶解度降低,不溶于显影剂,形成负性图案。

东丽公司在“Photoneece”系列产品中添加了高效的增感剂和交联剂,所采用的增感剂在 365 nm 处有强吸收,其灵敏度可达到 $8 \sim 10 \text{ mJ/cm}^2$,在目前报道的 n-PSPI 中光敏性较好。

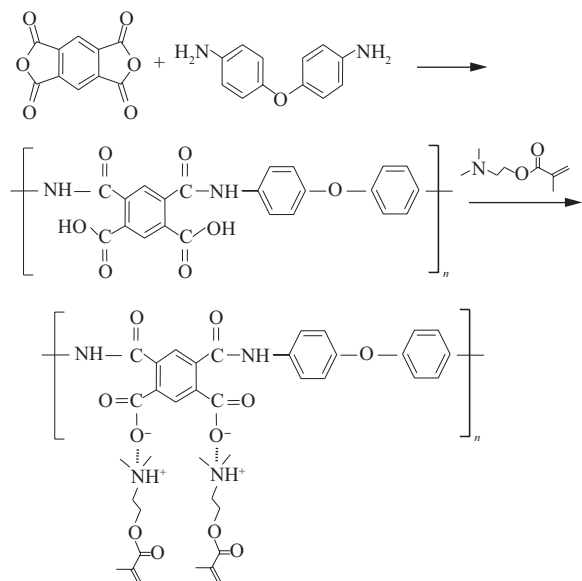


图3 离子型 n-PSPI 的合成路线

由于 PAA 的体积黏度、分子量、固有黏度和酸值在室温贮存后会下降,即使在冷藏条件下长时间储存后也相对不稳定,它们会发生各种各样的反应^[15],这些反应不仅影响了 PAA 和离子型 n-PSPI 的固有性质,而且也影响了生成 PI 的固有性质。在 PI 主链中掺入少量硅氧烷会给聚合物体系带来许多额外的好处,如降低吸水率、高透气性、低介电常数、良好的耐高温氧环境、表面附着力的改善以及阻燃性。为了开发较为稳定的离子型 n-PSPI, H. Rohitkumar 等^[16]以 3,3',4,4'-联苯四羧基二酐 (BPDA), 3,3',4,4'-二苯甲酮四羧基二酐 (BTDA) 和不同物质的量的邻甲苯胺 (o-TD), 1,3-双(3-氨基丙基)四甲基二硅氧烷 (SiDA) 为原料制备了一系列离子型 n-PSPI, 并对其储存过程中可能发生的反应进行研究, 为离子型 n-PSPI 的储存稳定性研究提供了理论基础。

由离子键结合光敏基团的 n-PSPI 光敏性优异, 分辨率和灵敏度高, 制备成本低, 容易合成, 已经实现商业化, 但是由于离子键的强度不够, 导致曝光区的交联部分也可能被显影液清洗掉, 造成显影性能不佳。并且, 离子型 n-PSPI 对涂膜的条件要求比较苛刻, 高温固化热失重大, 留膜率低, 因此还需继续改进。

2.3 PAG 型 n-PSPI

大多数的 n-PSPI 是由 PAA 制备, 需要进行高温热处理, 将 PAA 转化为相应的 PI。对于电子器件, 高温工艺并不适合, 因此需要开发一种低温热处理的 n-PSPI。

PAG 型 n-PSPI 在光照条件下引发 PAG 发生质子化与 PAA 进行交联反应, 同时 PAG 发生质子化产生的酸在加热条件下催化 PAA 转化为 PI, 从而降低热处理工艺温度。如图 4 所示^[17], 苯基醇型交联剂发生质子化与 PAA 中的芳香环和羟基上进行亲电取代, 从而引发交联反应。PAG 型属于

化学扩充的概念, 是设计高分辨率、高灵敏度、抗蚀剂体系的一种技术, 它是基于酸催化的交联、脱保护和解聚反应。

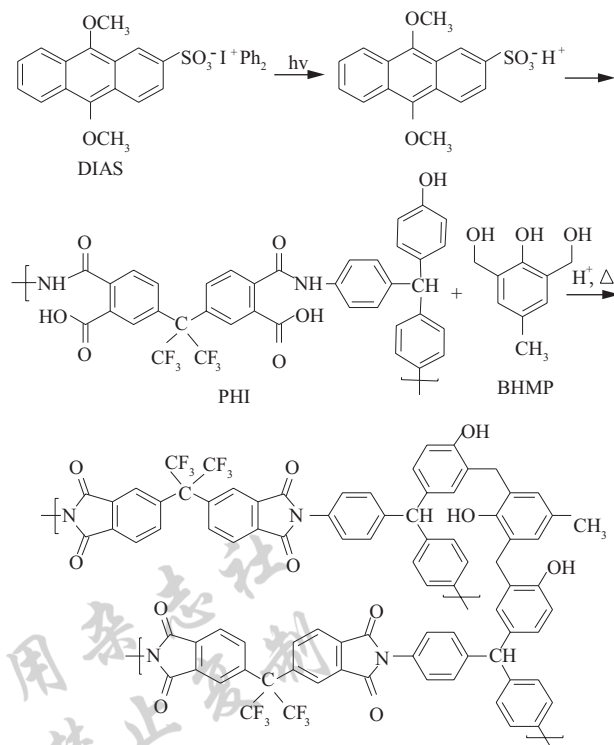


图4 PAG 型 n-PSPI 的合成路线

F. Kodaera 等^[18]发现对于相同的 PAA, 含有 10% 的 PAG 可使原来 170℃ 的亚胺化温度降低至 150℃。对于高度堆叠的微电子设备, 热固化温度要求低至 150℃。为进一步降低亚胺化温度, Y. Saito 等^[19]通过环丁烷四羧酸二酐与 2,2-双(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷 (6FAP) 反应, 加入 4,4-亚甲基-双[2,6-二羟基苯酚] (MBHP) 为交联剂, 以及 5-丙基磺酰氧基亚氨基-5H-噻吩-2-亚甲基-(2-甲基苯基)乙腈 (PTMA) 为光产酸剂, 制备了 PAG 型 n-PSPI, 光敏度达 5.9 mJ/cm², 对比度为 3.9, 固化温度降低至 140℃。

2.4 PBG 型 n-PSPI

PBG 型 n-PSPI 在光照条件下引发 PBG 发生光化学反应产生亚胺化合物, 在加热条件下催化 PAA 转化为 PI, 从而降低热处理工艺温度。

PI 先驱体聚异酰亚胺、聚酰胺烷基酯、PAA 均可用于制备 PBG 型 n-PSPI。PBG 在光照条件下发生光化学反应产生亚胺化合物, 可催化聚异酰亚胺热亚胺化为相应的 PI^[20], 使曝光区和非曝光区的溶解度不同。K. Fukukawa 等^[21]以对氨基二苯醚 (ODA) 和 BPDA 为原料制备 PAA, 光产碱剂二甲基哌啶 (DNCDP) 在光照条件下发生裂解反应 (如图 5 所示), 促进 PAA 在 200℃ 转化为 PI, 从而改变其在显影剂中的溶解度。当 DNCDP 质量分数为 15% 时, 其光感度达到 220 mJ/cm², 对比度为 11.7。

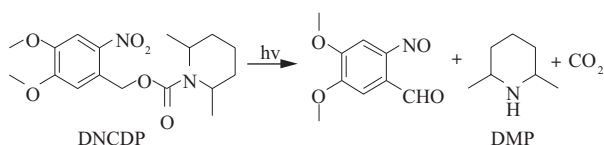


图5 DNCDP的光裂解反应

光产碱剂催化 PAA 热环化成 PI, 这种模式过程是通用的, 适用于大多数 PAA。此外, 利用光产碱剂可实现 PAA 的低温亚胺化。由于 DNCDP 的光敏性相对较差, 带有 DNCDP 的 PSPI 通常需要高能量的光曝光才能形成较厚的抗蚀膜。S. Fukuda 等^[22-23]报道了基于反式顺式光异构化和邻羟基反式肉桂酸衍生物内酯化的新型 PBG。基于该 PBG 的 PSPI 具有较高的光敏度, 达到 $180 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 分辨率为 $18 \text{ }\mu\text{m}$ 。L. Y. Tseng 等^[24]利用此类 PBG 将刚性二胺和柔性二酐结合, 开发出具有良好力学性能的高灵敏度 PSPI, 可在 160°C 下固化, 灵敏度为 $114 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 对比度为 1.29。Y. M. Yeh 等^[25]以 PHPP 为 PBG, 合成的 PSPI 具有分辨率高、力学性能好以及亚胺化温度低的优点, 感光度达到 $152 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 对比度高达 5.9。

胺是亚胺化反应良好的催化剂, PBG 型 n-PSPI 均表现出较好的对比度, 由于胺的催化作用, PAA 完全亚胺化的温度可降至 200°C ^[26], 该技术可用于制备低介电常数、光学低损耗波导和半脂环 PI, 但其感光度较 PAG 型 n-PSPI 差, 有待进一步提高。

PAG 型和 PBG 型都属于化学扩充型 n-PSPI, 都具有较高的感光性, 这是因为化学改性导致 PSPI 在最小剂量的 UV 照射下, 材料的结构和物理性能发生改变。其原理是通过 PAG 或 PBG 来改变聚合物的亚胺化反应温度, 利用光反应产生的酸或碱催化 PAA 转化成相应的 PI。但是酸的使用也会引起一些问题, 如金属基材的腐蚀等。

2.5 自增感型 n-PSPI

一般来说, PSPI 体系中, 需要低分子量的光引发剂。事实上, 只有一小部分光引发剂被引发, 大量光引发剂残留在聚合物中, 导致 PSPI 的热学、力学、电学性能下降, 自增感型 PI 便解决了上述问题。自增感型 PI 是通过二元胺与含有二苯甲酮结构的四羧酸二酐反应得到的 PSPI, 也称作结构型 PSPI。由于二苯甲酮具有光反应性, 无需引发剂即可发生交联反应。酮羰基在 UV 照射下成为激发态, 夺取邻位烷基上的氢产生自由基, 引发分子间交联反应^[27], 如图 6 所示, 从而导致曝光区和非曝光区在显影剂中的溶解度不同。

科学家们发现以可溶性 BTDA 为主要酸酐与邻烷基取代的二胺进行反应, 所得产物可在光照条件下直接成像。说明这种 PI 材料即使不添加光敏剂, 在 365 nm 下也具有光敏性, 但其光灵敏度不高, 且 BTDA 占总酸酐比例非常大。

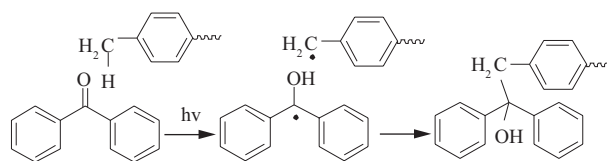


图6 自增感型 PI 光反应机理

为提高这类 PSPI 的光敏性, 科学家们做了大量研究。O. Rohde 等^[28]制备了一种新型光敏性酸酐 2,3,6,7- 噻吩酮四羧酸二酐 (TXDA), 与预亚胺化的非光反应性 PI 反应得到含有 10% TXDA 的 PSPI, 其曝光速度是 100% BTDA 的 PSPI 曝光速度的 5~6 倍。Jiang Xuesong 等^[29]通过将光敏性单体 4,4'- 双 [(4- 氨基) 噻吩] 二苯甲酮引入聚合物主链, 将甲基丙烯酸酯引入聚合物侧链得到 n-PSPI 材料, 其在 365 nm 下具有良好的光刻性能, 分辨率为 $5 \text{ }\mu\text{m}$, 灵敏度为 $150 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。虽然大多数 PI 介电常数较低, 但对于高速、高频电路领域, 其介电常数还需进一步降低。S. Choi 等^[30]通过引入 CF_3 降低自增感型 PI 的介电常数, 其将不同比例的 BTDA 和 4,4'-(六氟异亚丙基)二邻苯二甲酸酐在室温下与 2,2'- 双 (3- 氨基-4- 羟基苯基) 六氟丙二胺进行溶液缩聚反应后亚胺化, 再与丙烯酸酐酯化, 得到低介电常数的自增感型 PI。

大多数芳香族 PSPI 由于玻璃化转变温度 (T_g) 较高, 在有机溶剂中的溶解度较低, 以及分子间和分子内电荷转移络合物 (CTC) 的形成, 导致其加工性能较差。树枝状大分子和超支化聚合物由于其特有的低黏度、高溶解度和大量的末端官能团等性质而受到人们的广泛关注。超支化聚合物可通过一步聚合反应获得, 比树枝状大分子更适合大规模生产。为了使光敏超支化聚酰亚胺 (PHBPI) 具有良好的溶解性、热稳定性和光学性能, Liu Changwei 等^[31]合成了一种自增感型超支化 PI 材料, 该材料在 365 nm UV 条件下光敏度达到 $80 \sim 162 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 分辨率为 $8 \text{ }\mu\text{m}$ 。

由于自增感型 PI 已经形成酰亚胺结构, 因此在固化过程中不会有大量的交联侧基溢出, 从而使固化过程中的膜失重大幅度降低。自增感型 PI 解决了酯型和离子型 PSPI 的体积收缩问题, 但其对工业上常用的 365 nm 的紫外线灵敏度不高, 尚未实现工业化生产。

3 n-PSPI 的应用现状

目前大规模商业化的 n-PSPI 主要是酯型和离子型。酯型的代表产品有日立化成杜邦微系统 (HDMS) 公司的 HD-4100 系列和旭化成 (Asahi Kasei) 公司的 BL-301 系列, 离子型的代表产品有东丽公司的 PN 系列产品。

HD-4100 在先进封装领域使用多年, 占据了主要应用市场, 其为溶剂显影, 涂层固化后力学性能、耐热性与耐药性优良, 基材附着力强, 具有极高的应用可靠性。但 HD-4100 属

于高温固化型,部分封装器件不耐高温,不能采用 HD-4100,制约了封装技术的升级转换。例如,在多晶片扇出晶级封装的制作中,为保护高性能的晶片和耐热性低的密封材料以提高产品良率,需要使用固化温度较低的 n-PSPI 封装材料。BL-301 为低温固化型 n-PSPI,可实现 200℃低温固化,涂层固化后综合性能较好。两种产品的典型膜性能参数见表 1。

表 1 HD-4100 与 BL-301 典型膜性能参数

项目	HD-4100	BL-301
固化条件	375℃ / 60 min	200℃ / 60 min
拉伸强度 / MPa	200	130
拉伸弹性模量 / GPa	3.5	3.5
断裂伸长率 / %	45	45
$T_g / ^\circ\text{C}$	325	200
热膨胀系数 / ($\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$)	35	60
5% 失重温度 / $^\circ\text{C}$	480	335
介电常数	3.2	3.3

东丽的 PN 系列可实现 200℃低温固化,可在碱溶液中显影,薄膜具有较低的收缩率以及较好的力学与耐热性能,其主要膜性能参数见表 2。

表 2 东丽 PN 系列主要膜性能参数

项目	PN 系列
固化条件	200 ~ 350℃ / 60 min
拉伸强度 / MPa	≥ 110
拉伸弹性模量 / GPa	3.3~3.9
断裂伸长率 / %	≥ 20
$T_g / ^\circ\text{C}$	≥ 312
热膨胀系数 / ($\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$)	60~65
5% 失重温度 / $^\circ\text{C}$	≥ 382

国外发达国家对 PSPI 的研究起步较早,经过几十年的技术积累,其开发的产品性能优异,应用可靠性极高,占据了主要应用市场。目前国内对 PSPI 材料的开发尚处于起步阶段,尚无规模商业化的产品。由于 PSPI 属于半导体封装等应用领域的关键材料,材料制备与应用的技术门槛极高,属于关键性的“卡脖子”材料,可能会面临限购、禁止出口等紧急问题,因此国内急需开发出成熟可靠的 PSPI 材料,实现关键材料自主化,满足国内相关应用领域的使用需求。

4 结语

n-PSPI 促进了大规模集成半导体的发展,在微电子器件中作为缓冲涂层、钝化层和绝缘层得到了广泛的应用。n-PSPI 的种类繁多,制备过程复杂,对应用工艺要求严格,提高 n-PSPI 材料的多功能性和工艺宽容度,可简化应用过程,提高生产效率。经过科学家们的不断努力,n-PSPI 材料得到了飞速发展,但仍然面临着相对低分辨率、高介电常数和损耗因子的挑战。因此,未来对 n-PSPI 的研究需继续致力于改善其应用性能,以满足相关行业的需求。

参考文献

[1] Tseng L Y, et al. Reactive and Functional Polymers, 2020. doi:

10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104760.

- [2] Lee K M, et al. Organic Electronics, 2017, 51:471–476.
- [3] Liu L, et al. Journal of Semiconductors, 2018. doi:10.1088/1674-4926/39/2/026001.
- [4] Yeh Y M, et al. Journal of Polymer Science, 2020, 58(7):948–955.
- [5] An Yuancheng, et al. Journal of Polymer Research, 2021. doi:10.1007/s10965-021-02591-1.
- [6] Chen M H, et al. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 88:132–138.
- [7] Kerwin R, et al. Polymer Engineering and Science, 1971, 71(5):426–430.
- [8] Naoya Y. Polymers for Advanced Technologies, 1996, 8:215–226.
- [9] Hou Haoqing, et al. European Polymer Journal, 1999, 35:1 993–2 000.
- [10] Hsu S, et al. Polymer, 2004, 45:1 101–1 109.
- [11] Takahashi H, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28(2):215–218.
- [12] Yoshida M, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2014, 27(2):207–210.
- [13] Hwan L J. KR20140073277A[P]. 2014-06-16.
- [14] Hwan L J. KR20140073246AP]. 2014-06-16.
- [15] Krishnan P. Polymer, 2001, 42:5 165–5 174.
- [16] Rohitkumar H, et al. International Journal of Polymer Analysis Characterization, 2004, 9:177–196.
- [17] Ueda M, et al. Macromolecules, 1996, 29:6 427–6 431.
- [18] Kodera F, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2010, 23(2):235–240.
- [19] Saito Y, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113: 3 605–3 611.
- [20] Fu M C, et al. Polymer Journal, 2018, 50:57–76.
- [21] Fukukawa K, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2006, 17:131–136.
- [22] Fukuda S, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2009, 22(3):391–392.
- [23] Fukuda S, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2011, 24(3):267–268.
- [24] Tseng L Y, et al. Journal of Polymer Science, 2020, 58(17):2 366–2 375.
- [25] Yeh Y M, et al. Polymers Advanced Technologies, 2020, 32(2): 663–669.
- [26] Suyama K, et al. Progress in Polymer Science 2009, 34:194–209.
- [27] Wang Rui, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112: 3 057–3 062.
- [28] Rohde O, et al. Polymer Engineering and Science, 1992, 32(21): 1 623–1 629.
- [29] Jiang Xuesong, et al. Polymer, 2006, 47:2 942–2 945.
- [30] Choi S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117: 2 937–2 945.
- [31] Liu Changwei, et al. High Performance Polymers, 2012, 25(3): 301–311.