

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.002

可低温固化正性光敏聚酰亚胺的制备与性能

唐衍超, 张翠红, 李铭新

(波米科技有限公司, 山东聊城 252300)

摘要: 随着重新布线层半导体封装技术的发展, 对可低温固化的正性光敏材料的光刻性能、力学性能、热力学性能和耐化学性能的要求越来越高。为此, 笔者研制了一种可低温固化的正性光敏聚酰亚胺(p-PSPI)材料。在溶剂 *N*-甲基吡咯烷酮(NMP)中, 将 4, 4'-氧双邻苯二甲酸酐与 2, 2'-双[3-(3-氨基苯甲酰胺)-4-羟基苯基]六氟丙烷、硅二胺(SiDA)和 3-氨基苯酚通过聚合反应得到聚酰胺酸, 再进行羧基的酯化得到聚酰胺酸酯(PAE), 将 PAE 与感光剂重氮萘醌化合物、酚酯型热交联剂、偶联剂 KBM-1403 和亚胺化催化剂 2, 6-二甲基哌啶溶解于 γ -丁内酯中进行复配, 得到可低温固化的 p-PSPI 胶液。对 p-PSPI 进行水性碱性显影性能测试, 在膜厚 15 μm 条件下, 光刻分辨率能够达到 10 μm ; 经 200 $^{\circ}\text{C}$ 低温固化后, 利用傅里叶变换红外光谱仪、动态热机械分析仪、热重分析仪等分析测试, 结果表明, p-PSPI 的亚胺化率达到 98% 以上, 拉伸强度为 108.4 MPa, 断裂伸长率为 10.35%, 储能模量(150 $^{\circ}\text{C}$)为 2.18 GPa, 5% 热失重温度达到 367.69 $^{\circ}\text{C}$; 经耐化学性能测试, p-PSPI 对有机溶剂(NMP, 二甲基亚砷和丙酮)、酸碱(30% HNO_3 , 30% H_2SO_4 , 1% HF 和 5% KOH)以及氧化剂(10% H_2O_2)具有优良的耐化学稳定性, 可满足低温固化条件下半导体封装所需的工艺条件。

关键词: 低温固化; 正性; 光敏聚酰亚胺; 光刻性能; 力学性能; 耐化学性能

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0007-06

Preparation and properties of low-temperature curable positive-tone photosensitive polyimide

TANG Yanchao, ZHANG Cuihong, LI Mingxin

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

Abstract : Along with the development of rewiring layer semiconductor packaging technology, the requirements for lithography performance, mechanical properties, thermodynamic properties and chemical resistance of positive photosensitive materials that can be cured at low temperature are getting higher and higher. Therefore, a positive photosensitive polyimide material that can be cured at low temperature was developed. In the *N*-methylpyrrolidone (NMP) solvent, 4, 4'-oxydipthalic anhydride was polymerized with 2, 2'-bis [3-(3-aminobenzamide)-4-hydroxyphenyl] hexafluoropropane, silicon diamine (SiDA) and 3-aminophenol to obtain polyamic acid, and then the carboxyl group was esterified to obtain polyamic acid ester (PAE). PAE was dissolved in γ -butyrolactone with photosensitive agent naphthoquinone diazide compounds, phenolic ester type thermal crosslinking agent, coupling agent KBM-1403 and imidization catalyst 2, 6-dimethylpiperidine to obtain a low temperature curable p-PSPI glue. The water-based alkaline development performance of p-PSPI was tested. Under the condition of film thickness of 15 μm , the lithography resolution can reach 10 μm ; after curing at 200 $^{\circ}\text{C}$, the p-PSPI was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, dynamic thermo-mechanical analyzer and thermogravimetric analyzer. The results showed that the imidization rate of p-PSPI was more than 98 %, the tensile strength was 108.4 MPa, the elongation at break was 10.35%, the storage modulus (150 $^{\circ}\text{C}$) was 2.18 GPa, and the 5% weight loss temperature was 367.69 $^{\circ}\text{C}$. After chemical resistance test, p-PSPI has excellent chemical resistance to organic solvents (NMP, Dimethyl sulfoxide and acetone), to acid-base (30% HNO_3 , 30% H_2SO_4 , 1% HF and 5% KOH), and oxidant (10% H_2O_2). It can meet the process conditions of semiconductor packaging under low-temperature curing conditions.

Keywords : low-temperature curable ; positive-tone ; photosensitive polyimide ; lithographic ; mechanical property ; chemical resistance

基金项目: 山东省竞争性创新平台项目(2022CXPT036), 山东省重大科技创新工程项目(2023CXGC010315)

通信作者: 李铭新, 硕士, 高级工程师, 主要从事聚酰亚胺材料的研究

收稿日期: 2024-07-18

引用格式: 唐衍超, 张翠红, 李铭新. 可低温固化正性光敏聚酰亚胺的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10): 7-12.

TANG Yanchao, ZHANG Cuihong, LI Mingxin. Preparation and properties of low-temperature curable positive-tone photosensitive polyimide[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10): 7-12.

随着半导体和电子元件的体积越来越小,电路板尺寸也随之减小。为了最大程度地减少半导体元件的占用空间,表面组装技术(SMT)应运而生。在SMT中,半导体和电子元件安装的基板在焊料熔化时被提高到一定温度,然后进行表面贴装和焊接安装^[1]。因此,在没有那么多电极的半导体中,出现了芯片规模封装(CSPs),电极形成于底部的凸起,而不是在半导体的周围。此外,有许多引出电极,凸起的形成不充分,与半导体单独封装,称为扇出型晶圆级封装(FO-WLP)^[2]。对于CSPs和FO-WLP,使用光敏性聚酰亚胺(PSPI)或聚苯并噁唑(PBO)形成重新布线层,可以使被半导体封装的整个表面形成凸起^[3-4]。FO-WLP可使芯片更加紧密地横向集成和3D堆叠,提高组件之间的通信速度。将多个芯片连接到同一电路,需要在封装层面上进行精细地重新布线,由此产生的器件需要在更窄的间隔上容纳更多的金属线。一般来说,FO-WLP工艺流程是将Si芯片放在模具树脂中,然后在Si芯片和模具树脂上形成重新布线层。通过重新布线层的形成进而实现CSPs和FO-WLP,推动了表面组装技术发展。

在重新布线的应用中,需要能够在200℃或更低的温度下烧铸的材料,且具有足够的力学性能^[5-6]。PSPI具有优异的力学性能和耐高温高湿性,可保证设备使用中的高可靠性^[7]。此外,在FO-WLP中,PSPI和PBO直接黏接在模具树脂上,由于热膨胀系数和断裂伸长率等力学性能的差异,光敏聚酰亚胺、PBO和焊点极易因热冲击而造成破坏,因此具有低热膨胀系数、耐高温冲击和优异力学性能的PSPI和PBO成为近年来的研究热点^[8-13]。目前的低温固化产品主要通过主链中引入柔性片段、通过高沸点溶剂合成树脂、添加亚胺化催化剂或者使用聚异酰亚胺树脂等方法合成,但随之带来了产品力学性能差、制造工艺流程复杂、添加剂有残留和可靠性差等问题^[14]。

PSPI不仅具有出色的热稳定性、力学性能、介电性能和良好的光敏性,还兼有介电绝缘层和光刻胶的功能^[15],因此在芯片封装、集成电路、微电子机械系统和有机发光二极管显示等领域得到广泛应用,除了用于低应力缓冲涂层^[16],PSPI在半导体封装中也开始出现新的应用。PSPI一般需要进行曝光显影实现其光刻性能,根据PSPI紫外曝光后的溶

解性,分为正性光敏聚酰亚胺(p-PSPI)和负性光敏聚酰亚胺(n-PSPI)两种。曝光区溶解于显影液的为p-PSPI,反之为n-PSPI。p-PSPI在光刻过程中具有更高的分辨率,是当下应用最广泛的一类光敏材料^[17-18]。目前实现商业化的低温固化p-PSPI有日本东丽公司的Photoneece LT和日本东芝的CT4112,国内制备的p-PSPI还存在力学性能差、光敏性不够等缺陷。

为了获得光刻性能、力学性能、热力学性能和耐化学性能优异的p-PSPI,在溶剂*N*-甲基吡咯烷酮(NMP)中,将4,4'-氧双邻苯二甲酸酐(ODPA)与2,2'-双[3-(3-氨基苯甲酰胺)-4-羟基苯基]六氟丙烷(HFHA)、硅二胺(SiDA)和3-氨基苯酚通过聚合反应得到聚酰胺酸(PAA),再进行羧基的酯化得到聚酰胺酸酯(PAE),将PAE与感光剂重氮萘醌化合物(DNQ)、酚酯型热交联剂、偶联剂KBM-1403和亚胺化催化剂2,6-二甲基哌啶进行复配溶于 γ -丁内酯(GBL)中,得到可低温固化的p-PSPI胶液。通过添加热交联剂和亚胺化催化剂2,6-二甲基哌啶,不仅实现了低温200℃的固化,而且该可低温固化的p-PSPI材料具有碱性水性显影的高分辨率、更高的力学性能和耐化学稳定性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

ODPA:纯度98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;
HFHA:纯度98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;
SiDA:纯度99%,上海阿达玛斯试剂有限公司;
3-氨基苯酚:纯度98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

NMP:电子级,濮阳迈奇化学股份有限公司;
N,N-二甲基甲酰胺二甲缩醛(DMFDMA):百灵威试剂(北京)有限公司

GBL:电子级,濮阳迈奇化学股份有限公司;
感光剂DNQ:日本东洋合成工业株式会社;
酚酯型热交联剂:自制;
2,6-二甲基哌啶:纯度99%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

硅烷偶联剂KBM-1403:纯度98%,上海阿达玛斯试剂有限公司;

碱性水基显影液:2.38%四甲基氢氧化铵(TMAH)溶液,北京科华微电子材料有限公司;

氢氟酸溶液:分析纯,≥40%,阿拉丁试剂(上海)

有限公司。

1.2 主要仪器及设备

凝胶渗透色谱仪:LC-20AD,日本岛津公司;

匀胶机:KW-4A,北京中国科学院微电子研究所;

加热板:ND-3LA,日本ASONE公司;

曝光机:BG-401A,北京中国电子科技集团公司第四十五研究所;

光学显微镜:MX63-F,日本奥林巴斯公司;

扫描电子显微镜(SEM):S4800,日本日立公司;

真空无氧烤箱:MOLZK-32D1,合肥真萍电子科技有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IRAffinity-1S,日本岛津公司;

动态热机械分析(DMA)仪:DMA850,美国TA仪器公司;

热重(TG)分析仪:TGA55,美国TA仪器公司;

台阶仪:P-7,美国KLA-Tencor公司;

电子天平:ME204,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

真空烘箱:DZG-6050D,上海森信实验仪器有限公司。

1.3 聚酰胺酯聚合物的合成

在氮气氛围下,将51.35 g (0.085 mol) HFHA 和 1.24 g (0.005 mol) SiDA 加入带有机械搅拌、温度计的四口烧瓶中,然后在烧瓶中加入 92.6 g NMP 溶剂,在干燥氮气流下将烧瓶加热到 60 °C,逐渐溶解至溶液澄清。在上述溶液中加入 31.02 g (0.10 mol) ODP,在 60 °C 下搅拌 1 h,然后加入 2.19 g (0.02 mol) 封端剂 3-氨基苯酚,继续搅拌 1 h。称量 23.832 g (0.2 mol) 酯化试剂 DMFDMA 与适量 NMP 混合,逐滴滴入反应液中,滴加结束后搅拌反应 2 h。冷却至室温后,将混合胶液倒入纯水中沉淀析出,用纯水进行 3 次洗涤,过滤得到 PAE 固体,然后在 80 °C 真空烘箱中干燥 72 h [PAE 的重均分子量 M_w = 15 863 及数均分子量 M_n = 10 880,可以采用凝胶渗透色谱法(GPC)测定],得到干燥的 PAE 固体。

1.4 低温固化 p-PSPI 胶液的制备

p-PSPI 胶液的制备如下:将 10 g 干燥的 PAE 固体,2 g DNQ,0.5 g 热交联剂,0.05 g 2,6-二甲基嘧啶,0.01 g 硅烷偶联剂 KBM-1403,混合到 40 g GBL 中。待胶液混合均匀后,用 0.2 μm 孔径的聚四氟乙

烯过滤器过滤以除去杂质颗粒,得到 p-PSPI 胶液。

1.5 测试与表征

1.5.1 光刻性能测试

将 p-PSPI 胶液旋涂在 4 寸硅片上,用 120 °C 的温度预烘 4 min,通过台阶仪测定其膜厚,采用紫外曝光机(i 线、曝光量 60, 120, 180 和 240 mJ/cm²),通过掩模版进行曝光。曝光后采用质量分数 2.38% 的四甲基氢氧化铵水基显影液进行显影,显影时间为 120 s,除去未曝光部分,用水进行漂洗处理。使用光学显微镜以 50 倍的倍率进行图案观察,记录其开口的最小图形尺寸。

1.5.2 200 °C 固化的亚胺化率测试

将 PSPI 胶液旋涂在硅片上,用 120 °C 的温度预烘 4 min,用将其分成两半,编号膜(A)和膜(B)。将膜(A)放入真空无氧烤箱按照 200 °C/h 的程序处理,然后将膜(B)投入烘箱,按照 300 °C/h 的程序处理,得到固化膜(A)和固化膜(B)。通过 FTIR 仪对固化膜(A)和固化膜(B)进行 FTIR 测定。得到固化膜(A)的 1 377 cm⁻¹处峰值为 X,固化膜(B)的 1 377 cm⁻¹处峰值为 Y,将 X/Y 的比值作为亚胺化率。

1.5.3 拉伸强度和断裂伸长率测试

按照 1.5.2 中制备固化膜(A)的工艺进行制膜,将其置于装有 50 mL 氢氟酸溶液和 10 mL 浓硝酸的培养皿中,脱去硅片后放入清水中清洗 3 min,得到树脂膜。按照长 40 mm、宽 5 mm 的尺寸,对树脂膜进行切割处理得到样品条。通过 DMA 测试得到拉伸强度和断裂伸长率。

1.5.4 储能模量测试

按照 1.5.3 中脱膜方法得到树脂膜。按照长 40 mm、宽 5 mm 的尺寸,对树脂膜进行切割处理得到样品条。通过 DMA 测试得到储能模量数值。

1.5.5 TG 测定

按照 1.5.3 中脱膜方法得到的膜厚为 15 μm 的薄膜,通过 TG 分析仪进行测定得到 TG 曲线,进而得到该树脂膜热失重 5% 温度。

1.5.6 耐化学药品性测试

按照 1.5.3 中脱膜方法得到的膜厚为 15 μm 且质量为 0.8~1.2 g 的薄膜,在 25 °C 条件下分别置于 100 mL 的丙酮、NMP,二甲基亚砜以及 30% HNO₃ 水溶液、30% H₂SO₄ 水溶液、1% HF 水溶液、5% KOH 水溶液、10% H₂O₂ 水溶液中,没于液面以下,时间为 20 min,然后记录其浸泡前后的外观和质量变化。

将表面没有裂纹、前后的质量的变化为0.01 g以下的情况记录为A;将表面没有裂纹、前后的质量的变化大于0.01 g且小于0.05 g的情况记录为B;将表面没有裂纹、前后的质量的变化大于0.05 g的情况记录为C;将表面产生裂纹的情况记录为D。

2 结果与讨论

2.1 光刻性能分析

含酚羟基聚酰胺酯可通过与光活性溶解抑制剂DNQ的磺酸基生成磺酸酯键,获得p-PSPI。在曝光区,DNQ受到UV辐照后发生光解转化为亲水性的茚酸化合物,促进含羟基聚酰胺酯在碱性显影液中的溶解,而在未曝光区,疏水性的DNQ化合物抑制了聚酰胺酯的溶解。低温固化p-PSPI在25℃的水基碱性显影液(2.38% TMAH)显影后,15 μm的预焙膜在不同曝光能量下(60, 120, 180 mJ/cm²和240 mJ/cm²)的分辨率均达到10 μm,如图1所示。通过对200℃固化后p-PSPI显影的图形进行SEM观测发现显影开口非常稳定,没有出现变形和坍塌的问题,如图2所示。

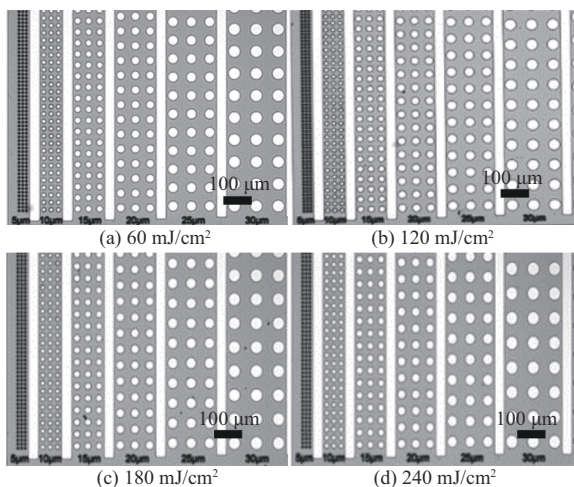


图1 不同曝光能量下低温固化p-PSPI的显影情况

Fig. 1 Development of low-temperature cured p-PSPI at different exposure energies

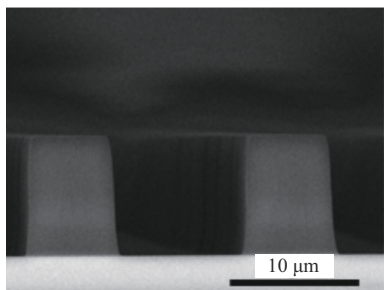


图2 p-PSPI在200℃固化后的SEM显影图形

Fig. 2 SEM image of p-PSPI after curing at 200 °C

2.2 FTIR 分析

图3中A,B,C分别为p-PSPI在120,200℃和300℃条件下固化后的FTIR谱图。由图3可见,A,B和C中均出现了酰亚胺特征峰:748,1 725,1 778 cm⁻¹处对应亚胺化的C=O,1 377 cm⁻¹对应亚胺化的C—N,说明p-PSPI制备成功。通过对比B和C,发现在固化温度200℃和300℃,固化时间60 min条件下,1377 cm⁻¹对应的C—N,峰强度分别为1.500和1.519 7,200℃固化膜的亚胺化率能够达到98.7%。这是由于p-PSPI胶液中的2,6-二甲基哌啶对聚合物中酰胺键的亚胺化的催化作用,促使p-PSPI在低温状态下实现了接近100%的亚胺化率。

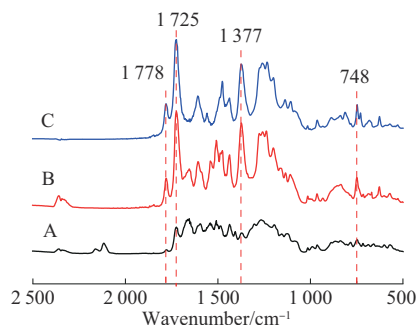


图3 p-PSPI在120,200℃和300℃亚胺化后的FTIR谱图

Fig. 3 FTIR of p-PSPI film after imidization at 120,200 °C and 300 °C

2.3 力学性能和TG分析

酚羟基型热交联剂在固化时,能够与聚合物分子链中的酚羟基进行交联反应,提高p-PSPI在低温固化后膜的力学性能和热力学性能。图4和图5分别为p-PSPI在200℃,60 min固化条件下的固化膜的应力-应变曲线和DMA谱图,图6为p-PSPI在200℃,60 min固化条件下的固化膜的TG测试曲线。由图4~图6可知,在低温200℃,1 h的固化条件下,该p-PSPI的拉伸强度为108.4 MPa,断裂伸长率为10.35%,150℃下的储能模量为2.18 GPa,热

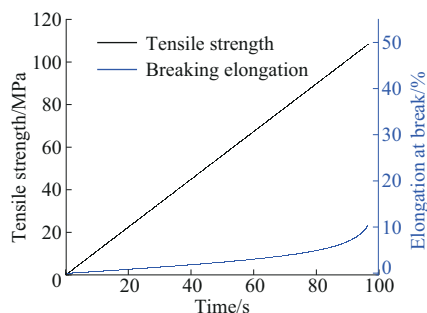


图4 低温固化p-PSPI膜的拉伸强度和断裂伸长率曲线

Fig. 4 Tensile strength and breaking elongation curve of low temperature cured p-PSPI film

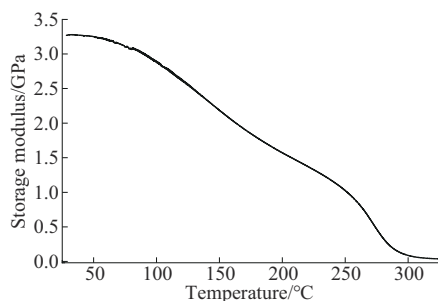


图5 低温固化p-PSPI膜的DMA曲线

Fig. 5 DMA curve of low temperature cured p-PSPI film

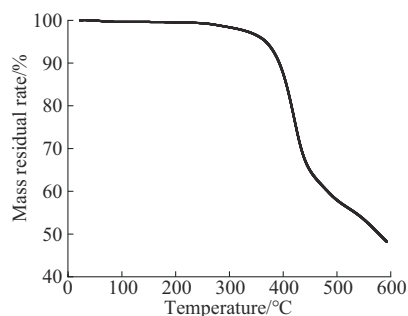


图6 低温固化p-PSPI膜的TG曲线

Fig. 6 TG curve of low temperature cured p-PSPI film

失重5%的温度为367.69 °C,说明此p-PSPI胶液低温固化后力学性能优异、耐热性好,可满足半导体封装应用的力学性能和热力学性能要求。

2.4 耐化学性分析

对该低温固化p-PSPI膜进行了有机溶剂、强酸、强碱和氧化剂的耐化学稳定性进行了测试。将浸泡前后的p-PSPI薄膜在光学显微镜下放大100倍后观察,如图7所示,低温固化p-PSPI膜分别经NMP, DMSO, 丙酮、30% HNO₃水溶液、30% H₂SO₄

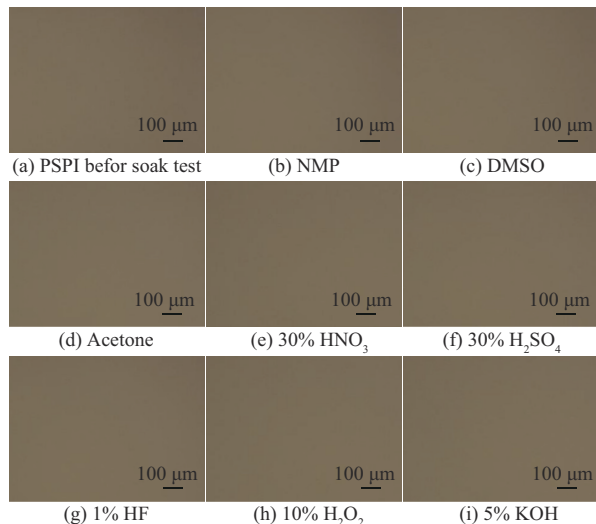


图7 低温固化p-PSPI膜耐化性实验前后的显微镜照片

Fig. 7 Microscopical photos before and after test of chemical resistance of low temperature cured p-PSPI film

水溶液、1% HF 水溶液、5% KOH 水溶液、10% H₂O₂ 水溶液中室温浸泡20 min后表面均没有裂纹,与p-PSPI膜浸泡前相比没有明显差异;通过对浸泡前后薄膜进行质量测试,发现薄膜的质量变化均小于0.01 g (见表1),综上说明低温固化p-PSPI膜具有优异的化学稳定性。

表1 低温固化p-PSPI膜的耐化学性能

Tab. 1 Chemical resistance of low temperature curable p-PSPI film

Chemical agent	Condition	Test result
NMP	25 °C/20 min	A
DMSO	25 °C/20 min	A
Acetone	25 °C/20 min	A
30% HNO ₃	25 °C/20 min	A
30% H ₂ SO ₄	25 °C/20 min	A
1% HF	25 °C/20 min	A
10% H ₂ O ₂	25 °C/20 min	A
5% KOH	25 °C/20 min	A

Note: A indicates that there is no crack on the surface, and the weight change before and after is less than 0.01 g.

3 结论

合成了PAE,加入感光性化合物DNQ、热交联剂、催化剂2,6-二甲基哌啶和硅烷偶联剂后溶于有机溶剂GBL中,经预固化获得膜厚为15 μm的p-PSPI预烘薄膜,经碱性水基显影液显影,分辨率达到10 μm;在低温200 °C固化条件下能够达到98%以上的亚胺化率;具有优良的力学性能、热稳定性,以及耐化学稳定性。这些性能能够满足低温固化重新布线层的工艺条件要求,在半导体封装中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] MASAO T. Polyimide[M]. London: Intech Open, 2022: 1–16.
- [2] YUTARO K, YU S, KEIKA H, et al. Development of novel low-temperature curable positive-tone photosensitive dielectric materials with high reliability[C]//2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference. Las Vegas, NV, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019: 346–351.
- [3] 王涛, 李金辉, 赵雅绪, 等. 光敏聚苯并噁唑的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报(A), 2020, 34(10): 19 183–19 189.
WANG Tao, LI Jinhui, ZHAO Yaxu, et al. Research status and development trend of photosensitive polybenzoxazole[J]. Material Reports(A), 2020, 34(10): 19 183–19 189.
- [4] YU S, KEIKA H, YUTARO K, et al. Low stress and low temperature curable photosensitive polyimide[J]. Journal of Photopolymer Science and technology, 2021, 34(2): 195–199.
- [5] REINA O, TAKANOBU T, KAZUVUKI I. Thermally and mechanically reliable photoresist for redistribution layer for advanced packaging[J]. Journal of Micro/Nanolithography,

- MEMS, and MOEMS, 2018, 17(4). DOI: 10.1117/1.JMM.17.4.043503.
- [6] TOMIKAWA M, OKUDA R, OHNISHI H. Photosensitive polyimide for packaging applications[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2015, 28(1):73–77.
- [7] TAKAHASHI H, SUZUKI E, SUZUKI K, et al. Low stress, high modulus, photosensitive polyimide[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2015, 28(2):215–218.
- [8] FUKUKAWA K, OGURA T, SHIBASAKI Y, et al. Thermo-base generator for low temperature solidphase imidation of poly(amic acid)[J]. *Chem. Let.* 2005, 34(10):1 372–1 373.
- [9] IWASHITA K, HATTORI T, MINEGISHI T, et al. Study of polybenzoxazole precursors for low temperature curing[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2007, 19(2):281–282.
- [10] HIROKO Y, TADAMITSU N, DAISAKU M, et al. Dissolution contrast improvement of low temperature curable positive tone photo-definable material[J]. *MES*, 2017, 27:135–138.
- [11] YEH Y M, KARAPALA V K, UEDA M, et al. Low-temperature-curable and positive-type photosensitive polyimide with high mechanical strength, high resolution and good pot-life based on chain extendable poly(amic acid), thermal degradable crosslinker, chain extender, thermal base generator and photoacid generator[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2012, 33(6): 623–630.
- [12] HASHIMOTO K, MASUDA Y, ARAKI H, et al. Novel low-temperature curable positive-tone photosensitive polyimide materials with high elongation[J]. *MES2*, 2017, 27:131–134.
- [13] TANIMOTO A, AOKI Y, KIMURA M, et al. Development of positive-tone photodefinable material for redistribution layer[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2017, 30(2): 281–288.
- [14] 王思恩, 张嘉豪, 傅智楠, 等. 正性光敏型聚酰亚胺的研究和应用进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(10):173–181.
- WANG Sien, ZHANG Jiahao, FU Zhinan, et al. Recent progress of positive photosensitive polyimide[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2023, 39(10):173–181.
- [15] 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, 9(38):1 119–1 137.
- GUO Haiquan, YANG Zhenghua, GAO Lianxun. Research progress of photosensitive polyimide photoresist[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 9 (38):1 119–1 137.
- [16] SCHUCKERT C, MURRAY D, ROBERTS C, et al. Polyimide stress buffers in IC technology[C]./Advanced Semiconductor Manufacturing Conference & Workshop. IEEE, 1990. DOI: 10.1109/ASMC.1990.111222.
- [17] 刘金刚, 袁向文, 尹志华, 等. 正性光敏聚酰亚胺研究与应用进展(一)[J]. *电子与封装*, 2008, 8(12):1–6.
- LIU Jingang, YUAN Xiangwen, YIN Zhihua, et al. Research and development of positive-working photosensitive polyimides(1)[J]. *Electronics & Packaging*, 2008, 8(12):1–6.
- [18] 刘金刚, 袁向文, 尹志华, 等. 正性光敏聚酰亚胺研究与应用进展(二)[J]. *电子与封装*, 2009, 9(1):7–11.
- LIU Jingang, YUAN Xiangwen, YIN Zhihua, et al. Research and development of positive-working photosensitive polyimides(2)[J]. *Electronics & Packaging*, 2009, 9(1):7–11.