

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.005

一种PI感光干膜的制备与性能

张翠红, 韩兵, 唐衍超, 李铭新

(波米科技有限公司, 山东聊城 252300)

摘要: 为开发一种分辨率高、力学性能优异的聚酰亚胺(PI)感光干膜, 首先采用4,4'-联苯醚二酐(ODPA)与2,2-双(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷(BAHF)等合成了碱溶性PI树脂。再将该树脂与交联剂、引发剂、偶联剂等进行复配, 制备了光敏性PI胶液, 最后将该光敏性PI胶液涂布在载体聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜上, 经烘干、冷却, 覆上聚乙烯膜(PE膜), 获得PI感光干膜。利用凝胶渗透色谱、傅里叶变换红外光谱、光学显微镜等对碱溶性PI树脂和感光干膜的性能进行表征。结果表明, 成功制备碱溶性PI树脂, 亚胺化率为82%, 厚度为15 μm 的PI感光干膜经曝光显影后具有优异分辨率, 为10 μm 。通过动态热机械分析仪、热重分析等对200 $^{\circ}\text{C}$ 固化的PI感光干膜的力学性能、耐热性和耐药性进行了研究。结果表明, 200 $^{\circ}\text{C}$ 固化的感光干膜在30 $^{\circ}\text{C}$ 时的拉伸强度达到101 MPa, 断裂伸长率达到7.3%, 5%热失重温度为352 $^{\circ}\text{C}$, 10%热失重温度为385 $^{\circ}\text{C}$, 在590 $^{\circ}\text{C}$ 的质量保持率为44%, 并且在丙酮、N-甲基吡咯烷酮、30% HNO_3 、30% H_2SO_4 、1% HF 等试剂中的质量变化率均小于1%。综上, PI感光干膜具有优异分辨率、热稳定性和耐药性。

关键词: 感光干膜; 聚酰亚胺; 分辨率; 耐热性

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0029-06

Preparation and properties of PI photosensitive dry film

ZHANG Cuihong, HAN Bing, TANG Yanchao, LI Mingxin

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

Abstract : In order to develop a kind of polyimide (PI) photosensitive dry film with high resolution and excellent mechanical properties, alkali-soluble PI resin was synthesized by using 4, 4'-diphenyl ether dianhydride (ODPA) and 2, 2-bis (3-amino-4-hydroxyphenyl) hexafluoropropane (BAHF). The photosensitive polyimide adhesive was prepared by mixing the resin with cross-linking agent, initiator and coupling agent. Finally, the photosensitive polyimide was coated on the carrier polyethylene terephthalate (PET) film, after drying, cooling, coated with polyethylene (PE) film, polyimide photosensitive dry film was obtained. The properties of alkali-soluble polyimide resin and photosensitive dry film were characterized by gel permeation chromatography, Fourier transform infrared spectroscopy and microscope. The results show that alkali-soluble polyimide resin is successfully prepared, and the imidization rate is 82%. The PI photosensitive dry film with a thickness of 15 μm shows excellent resolution after exposure and development. The mechanical properties, heat resistance and drug resistance of photosensitive dry film cured at 200 $^{\circ}\text{C}$ are studied by dynamic thermomechanical analysis and thermogravimetric analysis. The results show that the tensile strength of the film cured at 200 $^{\circ}\text{C}$ reaches 101 MPa at 30 $^{\circ}\text{C}$, the elongation at break reaches 7.3%, the thermal weight loss temperature of 5% is 352 $^{\circ}\text{C}$, the thermal weight loss temperature of 10% is 385 $^{\circ}\text{C}$, and the quality retention rate of the film at 590 $^{\circ}\text{C}$ is 44%. The mass change rates in acetone, N-methylpyrrolidone, 30% HNO_3 , 30% H_2SO_4 or 1% HF are all less than 1%. In summary, the photosensitive dry film has excellent resolution, thermal stability and drug resistance.

Keywords : photosensitive dry film ; polyimide ; resolution ; heat 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(2021CXGC010305)

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: 2024-01-29

引用格式: 张翠红, 韩兵, 唐衍超, 等. 一种PI感光干膜的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 29-34.

ZHANG Cuihong, HAN Bing, TANG Yanchao, et al. Preparation and properties of PI photosensitive dry film[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 29-34.

随着全球电子信息产业的不断发展,感光干膜作为印刷电路板(PCB)制造的专用品,其应用领域不断拓宽,向高密度、高精细化和多层化方向发展^[1-2]。感光干膜通常由聚乙烯(PE)膜、感光树脂组合物膜和聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜三部分组成^[3-4],如图1所示。其中,感光树脂组合物膜又被称为感光层,是感光干膜最重要的组成部分;PET薄膜是感光层的载体,使之涂布成膜;PE膜是感光层的保护层,具有保护感光层、防止空气中氧气进入而阻碍光聚合等重要作用。感光干膜因其膜厚均一性好、无溶剂挥发、操作简单、节省材料等优势而备受关注。

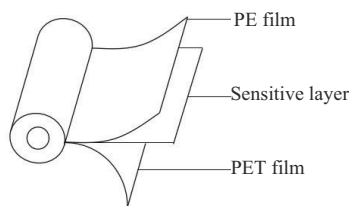


图1 感光干膜的构成

Fig. 1 Composition of photosensitive dry film

感光干膜在曝光显影后,可获得高分辨率图案^[5],根据感光干膜曝光后获得图案的机理不同,可将感光干膜分为正性感光干膜和负性感光干膜。由于正性感光干膜的成本较高^[6],因此负性感光干膜的研究较为广泛。根据感光干膜成膜树脂种类的不同,可分为环氧树脂类、丙烯酸树脂类和PI树脂类。环氧树脂类感光干膜最初由IBM开发, Microchem公司^[7]采用默克环氧树脂制备了商业化的SU8负型感光干膜产品。环氧树脂类感光干膜存在黏附性能差、固化后内应力高以及难以去除等缺陷。丙烯酸树脂类感光干膜具有原料易得、价格便宜、制备方便、性能易调节等优点,引起科学界的广泛关注。李伟杰等^[8]制备了水溶性丙烯酸酯类感光干膜,研究发现随着丙烯酸树脂含量的升高,干膜的玻璃化转变温度(T_g)呈上升状态,储存稳定性提高,干膜的解析度和光敏性呈下降趋势,该干膜的最佳解析度达到30 μm ,但 T_g 仍处于较低水平。Ding等^[9]制备了一种丙烯酸树脂类感光干膜,所制感光干膜分辨率高、光敏性高、附着力好,具有潜在的应用价值。但丙烯酸树脂类感光干膜仍存在耐热性不足的问题。

聚酰亚胺(PI)材料具有良好的介电性及绝缘性、耐辐射性和耐高温性^[10-11],使得PI材料非常适用

于印刷电路板和高集成半导体器件的基膜或高集成多层线路板的覆膜,科学家已对其进行了大量研究。Tomikawa等^[12]和Kato等^[13]利用一种较高光反应活性的负型PI感光干膜,制备了厚度为90 μm 、宽度为8 μm 的高纵横比图案,性能明显优于传统材料,其作为层间介质,可有效地提高电子器件的布线密度。PI类感光干膜制备简单、稳定性好、分辨率高、黏附性及力学性能佳,兼具环氧树脂类感光干膜与丙烯酸树脂类感光干膜的优势,有效避免了其缺点,具有非常好的市场前景。

感光干膜不仅广泛应用在PCB、微电子机械系统(MEMS)器件和微流控装置等领域^[14-16],而且在纳米Ag图案化、生物分析、电化学微加工、3D微加工等领域有着广泛应用研究^[17-20]。目前我国对感光干膜的需求量较大^[21],由于我国感光干膜技术研究起步较晚,国内使用的感光干膜较大程度地依赖进口。为开发一种分辨率高、力学性能优异的PI感光干膜,笔者以4,4'-联苯醚二酐(ODPA)与2,2-双(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷(BAHF)等为原材料,首先合成了碱溶性PI树脂。将此树脂与光敏剂、交联剂、偶联剂等相关助剂进行复配,制备了光敏性PI胶液。再将该光敏性PI胶液涂布在载体PET膜上,经烘干、冷却,覆上PE膜,获得PI感光干膜,并对感光干膜的相关性能进行了分析研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

ODPA:纯度97%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;
BAHF:纯度98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;
1,3-双(3-氨基丙基)四甲基二硅氧烷(SiDA):纯度99%,阿达玛斯试剂有限公司;

γ -丁内酯(GBL):电子级,迈奇化学股份有限公司;

3-氨基苯酚(MAP):纯度99%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

交联剂1:乙氧化双酚A二甲基丙烯酸酯,BP-6EM,试剂级,阿达玛斯试剂有限公司;

交联剂2:高柔韧性脂环族环氧树脂,纯度98%,自制;

交联剂3:三缩水甘油基对氨基苯酚,AFG90,纯度98%,广州太吉新材料有限公司;

光引发剂 OXE-1:纯度99%,常州蔡德化工有限公司;

光引发剂 819:阿达玛斯试剂有限公司;

偶联剂 KBE-1003:纯度 98%,阿达玛斯(上海)试剂有限公司;

氢氟酸(HF):分析纯,≥40%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

PET膜、PE膜:东莞市顺波包装材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

匀胶机:KW-4A,中国科学院微电子研究所;

涂布机:ZY-TB-A4,山东中仪仪器有限公司;

全自动覆膜机:DS-FMJ-013,东莞市德尚精密机械设备有限公司;

贴膜机:STK-6020,芯钛科半导体设备(上海)有限公司;

热台:ND-3LA,日本ASONE公司;

台阶仪:P-7,美国KLA-Tencor公司;

曝光机:BG-401A,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;

真空无氧烤箱:MOLZK-32D1,合肥真萍电子科技有限公司;

凝胶渗透色谱(GPC)仪:LC-20AD,日本岛津公司;

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

热重(TG)分析仪:TGA55,美国TA仪器公司;

动态热机械分析(DMA)仪:DMA850,美国TA仪器公司。

1.3 试样制备

1.3.1 碱溶性PI树脂的制备

在装有机机械搅拌、温度计和氮气保护装置的三口烧瓶中,将BAHF(311.32 g, 0.85 mol), SiDA(12.43 g, 0.05 mol)和MAP(21.83 g, 0.20 mol)溶解于984 g GBL中,再加入ODPA(310.21 g, 1.0 mol),在60℃下搅拌1 h,然后升温至180℃,搅拌2 h,冷却至室温,得到碱溶性PI树脂溶液,如图2所示。

1.3.2 光敏性PI胶液的制备

在配有黄光灯的超净间内,取70 g碱溶性PI树脂溶液向其中加入15 g BP-6EM, 8 g高柔韧性脂环氧树脂、2 g AFG90, 1 g光引发剂 OXE-01, 1 g光引发剂 819, 0.5 g偶联剂 KBE-1003,混合均匀,将所得溶液使用孔径为0.2 μm的过滤器进行加压过滤,获得光敏性PI胶液。

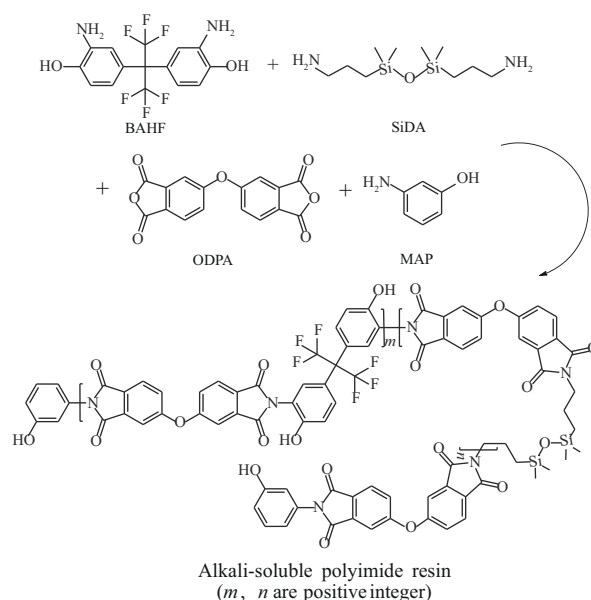


图2 碱溶性PI树脂合成路线

Fig. 2 Synthetic route of alkali-soluble PI resin

1.3.3 感光干膜的制备

通过涂布机将上述感光性树脂组合物涂布在PET基膜上,采用80 μm线棒涂布,经80℃烘烤10 min,将覆有感光性树脂组合物的50 μm PET膜平放在覆膜机工作台上,覆上50 μm PE保护膜,感光干膜制备完成。

1.4 性能测试与表征

GPC测试:通过将碱溶性PI树脂和感光干膜中感光层在N-甲基吡咯烷酮(NMP)中稀释得到固含量为0.1%的溶液,流动相为NMP,标准聚苯乙烯换算来测定PI的重均分子量(M_w)和数均分子量(M_n)。

FTIR测试:将碱溶性PI溶液在4寸硅晶片上旋涂成膜,100℃烘烤15 min,测定PI膜的FTIR光谱,确认PI结构的吸收峰(1 375 cm^{-1} 附近)强度。再将该涂有PI膜的硅晶片在300℃下热处理1.5 h,再次测定FTIR光谱,比较热处理前后1 375 cm^{-1} 附近的吸收峰强度。将热处理后的聚合物的亚胺化率设定为100%,根据峰强度比值计算出热处理前的聚合物的亚胺化率。扫描范围为500~4 000 cm^{-1} ,分辨率为4 cm^{-1} 。

分辨率测试:剥离保护膜,使用贴膜机,在处理台温度80℃、辊温度80℃、压力150 Pa、粘贴速度5 mm/s、粘贴压力0.2 MPa的条件下,将该剥离面层压在硅晶片上,撕下支撑膜后,利用台阶仪进行膜厚测试,感光干膜的膜厚为15 μm。采用紫外灯i线、曝光量400 MJ/cm^2 、通过掩模版进行曝光。曝光

后,采用质量分数为2.38%的四甲基氢氧化铵水基显影液进行喷雾显影,显影时间为180 s,除去未曝光部分,用水进行漂洗处理。使用光学显微镜对图案进行观察,将分辨通孔图案的最小尺寸作为分辨率。

TG测试:剥离保护膜,使用贴膜机,在处理台温度80℃、辊温度80℃、压力150 Pa、粘贴速度5 mm/s、粘贴压力0.2 MPa的条件下将该剥离面层压在硅晶片上,撕下支撑膜后,在其表面上没有放置掩模板的情况下,采用紫外灯i线曝光;采用质量分数为2.38%的四甲基氢氧化铵水基显影液进行喷雾显影,然后将该膜放置在真空无氧烤箱中,氮气气氛保护下,在150℃下热处理30 min后,再经过1 h升温至200℃,并在200℃下处理1 h,随后直接在烘箱中自然冷却至50℃以下,最终得到固化膜。将带膜的硅晶片浸泡在47%的HF中5~10分钟,然后用水冲洗,得到厚度为15 μm的感光干膜固化膜,升温速率为10℃/min,温度范围为50~590℃,氮气气氛。

力学性能测试:将感光干膜固化膜切割成长15 mm、宽3 mm的样条,拉伸速率为3 N/min,采用DMA测试薄膜的拉伸强度和断裂伸长率。

耐药性测试:将感光干膜固化膜分别在25℃的丙酮、NMP,30% HNO₃,30% H₂SO₄,1% HF中浸泡15 min,在25℃的10% H₂O₂,5% KOH中浸泡30 min,在80℃的NMP中浸泡5 min,然后用去离子水冲洗5 min,风干后采用称重法计算感光干膜固化膜的质量损失比例。

2 结果与讨论

2.1 FTIR表征

碱溶性PI树脂的FTIR谱图如图3所示,其中,1为碱溶性PI树脂FTIR谱图,2为碱溶性PI树脂300℃固化1.5 h的FTIR谱图。曲线1中1 780 cm⁻¹处对应酰亚胺C=O不对称伸缩振动特征峰,1 722 cm⁻¹处对应酰亚胺C=O对称伸缩振动特征峰,1 500 cm⁻¹是苯环骨架特征峰,1 375 cm⁻¹处对应酰亚胺C—N伸缩振动特征峰,751 cm⁻¹处是酰亚胺C=O变形振动特征峰。说明碱溶性PI树脂制备成功。通过对比1和2在1 375 cm⁻¹处的吸收峰强度,得出碱溶性PI树脂的亚胺化率为82%。

2.2 GPC表征

采用GPC分别对碱溶性PI树脂和感光干膜进

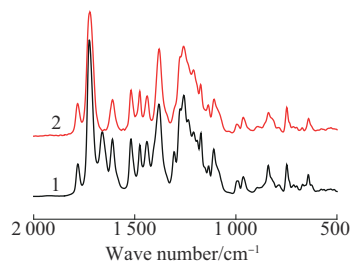


图3 碱溶性PI树脂FTIR谱图

Fig. 3 FTIR spectra of alkali-soluble PI resin

行表征,结果列于表1。由表1可知,根据实验设计的原料配比,合成的碱溶性PI的 M_w 和 M_n 分别为19 828和13 842,分子量分布系数(PDI)为1.43;感光性树脂组合物的 M_w 和 M_n 分别为19 524和13 550, PDI为1.44。由GPC数据进一步说明碱溶性PI树脂制备成功,感光干膜制备成功。

表1 GPC测试分子量结果

Tab. 1 Molecular weight results of GPC

Sample	M_w	M_n	PDI
Alkali soluble polyimide	19 828	13 842	1.43
Photosensitive dry film	19 524	13 550	1.44

Note: M_w is weight-average molecular weight; M_n is number-average molecular weight; PDI is molecular weight distribution coefficient.

2.3 分辨率测试

感光干膜曝光显影后在显微镜下观察的图案如图4所示,分辨率见表2。由图4和表2可知,当膜厚为15 μm时,所得图案分辨率为10 μm,开口清晰,具有较高的分辨率。

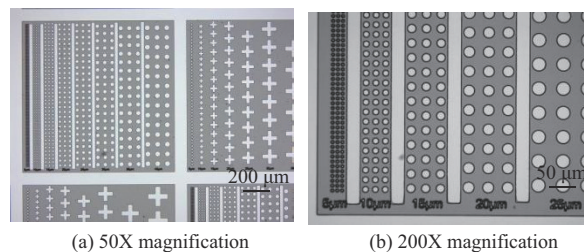


图4 感光干膜曝光显影后显微镜图案

Fig. 4 Microscope pattern of photosensitive dry film after exposure and development

表2 不同膜厚感光干膜的分辨率

Tab. 2 Resolution of photosensitive dry film with different film thickness

Film thickness/μm	Resolution/μm
7	5
15	10
30	25

2.4 TG分析

分别对碱溶性PI固化膜和感光干膜固化膜进

行TG测试,TG曲线如图5所示,相应的TG参数见表3。由图5和表3可知,200℃固化的碱溶性PI树脂的5%热失重温度为($T_{5\%}$)为256℃,10%热失重温度($T_{10\%}$)为287℃,在590℃的质量保持率为54%;而200℃固化的感光干膜的 $T_{5\%}$ 为352℃, $T_{10\%}$ 为385℃,在590℃的质量保持率为44%。虽然200℃固化的感光干膜在590℃时的质量保持率低于200℃固化的碱溶性PI树脂,但200℃固化的感光干膜的 $T_{5\%}$ 和 $T_{10\%}$ 均比200℃固化的碱溶性PI树脂高约100℃,说明BP-6EM和高柔韧性脂环族环氧树脂等组分的组合搭配,使感光干膜的热分解温度显著提高,大大提升了感光干膜的热稳定性,同时也使产品更加适用于高耐热要求的极端环境。

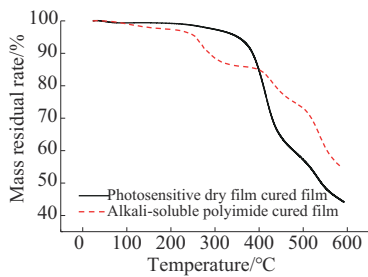


图5 碱溶性PI固化膜和感光干膜固化膜的TG曲线
Fig. 5 TG curves of alkali-soluble PI cured film and photosensitive dry film cured film

表3 200℃固化膜的TG参数

Tab. 3 TG parameters of 200℃ cured film

Sample	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	Quality retention at 590℃/%
Alkali-soluble polyimide cured film	256	287	54
Photosensitive dry film curing film	352	385	44

Note: $T_{5\%}$ is 5% thermal weight loss temperature; $T_{10\%}$ is 10% thermal weight loss temperature.

2.5 力学性能分析

将感光干膜固化膜切割成长15 mm、宽3 mm的样条,拉伸速率为3 N/min,采用DMA分别测试30,150℃和245℃下的感光干膜固化膜的拉伸强度和断裂伸长率,测试结果见图6。由图6可知200℃固化的感光干膜在30℃时的拉伸强度达到101 MPa,断裂伸长率达到7.3%;在150℃时的拉伸强度达到55 MPa,断裂伸长率达到12.1%;在245℃时的拉伸强度达到17 MPa,断裂伸长率达到15%。充分说明感光干膜固化膜具有较优的力学性能。

2.6 耐药性分析

对感光干膜固化膜进行耐药性测试,结果见表

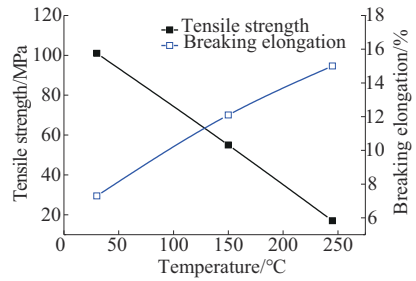


图6 200℃固化感光干膜的力学性能
Fig. 6 Mechanical properties of photosensitive dry film cured at 200℃

4。由表4可知,将200℃固化的感光干膜分别在25℃的丙酮、NMP,30% HNO_3 ,30% H_2SO_4 ,1% HF中浸泡15 min,薄膜的质量变化率小于1%。同时将200℃固化的感光干膜分别在25℃的10% H_2O_2 和质量分数5%的KOH浸泡30 min以及80℃的NMP中浸泡5 min,薄膜的质量变化率小于1%,说明200℃固化的感光干膜具有较好的耐药性。

表4 200℃固化的感光干膜耐药性

Tab. 4 Drug resistance of photosensitive dry film cured at 200℃

Chemical agent	Testing condition	Mass change rate of photosensitive dry film
Acetone	25℃/15 min	<1%
NMP	25℃/15 min	<1%
30% HNO_3	25℃/15 min	<1%
30% H_2SO_4	25℃/15 min	<1%
1% HF	25℃/15 min	<1%
10% H_2O_2	25℃/30 min	<1%
80℃ NMP	80℃/5 min	<1%
5wt% KOH	25℃/30 min	<1%

3 结论

通过单体ODPA和BAHF等合成了碱溶性PI树脂,以此树脂为成膜基体与助剂复配,制备了光敏性PI胶液,经涂膜、干燥、覆膜最终制备成了PI感光干膜,并对碱溶性PI树脂和感光干膜进行测试研究。

(1) GPC和FTIR测试结果表明,成功合成了碱溶性PI树脂,亚胺化率为82%。

(2)光学显微镜观测表明,PI感光干膜经曝光显影后的图案分辨率为10 μm ,开口清晰,具有较高的分辨率。

(3) TG测试结果表明,200℃固化的感光干膜的 $T_{5\%}$ 为352℃, $T_{10\%}$ 为385℃,在590℃的质量保持率为44%,具有良好的热稳定性。

(4)通过力学性能分析,200℃固化的感光干膜在30℃时的拉伸强度达到101 MPa,断裂伸长率达到7.3%,具有较优的力学性能。

(5)耐药性实验结果表明,200 °C固化的感光干膜具有较好的耐药性。

以上实验结果表明,成功制备了分辨率高、耐热性好、力学性能优异的PI感光干膜,可用作半导体电子材料,如PCB,MEMS,5G射频芯片等领域,并有望用于太阳能电池领域,具有较大的商业价值。

参考文献

- [1] 丁艳花,辛阳阳,邹应全.感光干膜及其应用研究[C]//中国感光学会辐射固化专业委员会2020第二十一届辐射固化年会论文报告集.北京师范大学,2020:115-122.
DING Yanhua, XIN Yangyang, ZOU Yingquan. Photosensitive dry film and its application[C]//Reports of the 21st Annual Conference of Radiation Curing of RadTech China 2020. Beijing Normal University, 2020:115-122.
- [2] 丁艳花,邹应全.PCB用LDI感光干膜的研究进展[C]//第十五届亚洲辐射固化国际会议暨展览会 & 中国感光学会辐射固化专业委员会2019第二十届辐射固化年会论文报告集.北京师范大学, 2019:2 032-2 041.
DING Yanhua, ZOU Yingquan. Research progress of LDI Photosensitive dry film for PCB[C]//Reports of Annual Conference of Radiation Curing of RadTech Asia 2019 & RadTech China 2019, Beijing Normal University, 2019:2 032-2 041.
- [3] 梁权.感光性干膜特性及感度的研究[J].山东化工,2022,51(13):80-82.
LIANG Quan. Performance and sensitivity of photosensitive dry film[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(13):80-82.
- [4] 王海霞.国内外感光干膜市场初探[J].精细与专用化学品,2018,26(9):1-2.
WANG Haixia. Study on the dry-film market at home and abroad [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2018, 26(9):1-2.
- [5] 韩兵,李铭新,楚存鲁,等.低温固化负性光敏PI的制备与性能[J].工程塑料应用,2022,50(6):31-35.
HAN Bing, LI Mingxin, CHU Cunlu, et al. Preparation and properties of low-temperature curable negative photosensitive polyimide [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):31-35.
- [6] 江叔福,吴雅,郑伟.感光干膜相关技术研究进展[J].应用技术学报,2023,23(1):38-42.
JIANG Shufu, WU Ya, ZHENG Wei. Research progress of photosensitive dry film related technologies[J]. Journal of Technology, 2023, 23(1):38-42.
- [7] LORENZ H, DESPONT M, FAHRNI N, et al. SU-8: A low-cost negative resist for MEMS[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1997, 7:121-124.
- [8] 李伟杰,周光大,李伯耿.水溶性丙烯酸酯类感光干膜的制备及其性能研究[J].影像科学与光化学,2016,34(2):172-180.
LI Weijie, ZHOU Guangda, LI Bogeng. Preparation and performance of UV-curing waterborne dry film photoresist based on acrylic resins[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2016, 34(2):172-180.
- [9] DING Yanhua, XIN Yangyang, ZHANG Qiang, et al. Acrylic resins with oxetane pendant groups for free radical and cationic dual-curing photoresists[J]. Materials & Design, 2022, 213:110370.
- [10] AN Yuancheng, JIA Yanjiang, ZHI Xinxin, et al. Preimidized auto-photosensitive polyimides containing methyl-substituted benzamide units with increased high-temperature dimensional stability for advanced optical applications: preparation and properties[J]. Journal of Polymer Research, 2021, 28(228):1-6.
- [11] SONG G, HEO Y, BAEK 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, 59:340-352.
- [12] TOMIKAWA M, OKUDA R, OHNISHI H. Photosensitive polyimide for packaging applications[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28(1):73-77.
- [13] KATO K, TATSUTA Y, MATSUMURA K, et al. Negative photo-definable polyimide dry films for fine and high aspect ratio patterning[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2022, 35(2):161-164.
- [14] SUWANDI D, AZIZ R, SIFA A, et al. Dry film photoresist application to a printed circuit board (PCB) using a maskless photolithography method[J]. International Journal of Technology, 2019, 10(5):1 033-1 041.
- [15] DONG Z, HE Q, SHEN D, et al. Microfabrication of functional polyimide films and microstructures for flexible MEMS applications[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9(31):1-22.
- [16] CAO Y, FLOEHR J, INGEBRANT S, et al. Dry film resist laminated microfluidic system for electrical impedance measurements [J]. Micromachines, 2021, 12(632):1-13.
- [17] HWANG B, MATTEINI P. Review on dry film photoresist-based patterning of Ag nanowire flexible electrodes for wearable electronics[J]. Fashion and Textiles, 2022, 9(27):1-12.
- [18] HORAK J, DINCER C, BAKIRCI H, et al. A disposable dry film photoresist-based microcapillary immunosensor chip for rapid detection of Epstein-Barr virus infection[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2014, 191:813-820.
- [19] QU N, CHEN X, LI H, et al. Electrochemical micromachining of micro-dimple arrays on cylindrical inner surfaces using a dry-film photoresist[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4):1 030-1 036.
- [20] ROOS M M, WINKLER A, NILSEN M, et al. Towards green 3D-microfabrication of bio-MEMS devices using ADEX dry film photoresists[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, 2022, 9:43-57.
- [21] 林然. 福斯特:光伏胶膜全球寡头感光干膜有望崛起[J].股市动态分析,2020,13:42-43.
LIN Ran. Foster:Photovoltaic film global oligopoly photosensitive dry film is expected to rise[J]. Stock Market Trend Analysis Weekly, 2020, 13:42-43.