

高折射率树脂晶圆的材料配方设计与光学性能优化

来恒杰

嘉兴致瑞新材料科技有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8795

[摘要] 高折射率树脂晶圆属于光电信息行业关键的光学元件,性能好坏直接影响终端产品的微型化、集成化程度。本文以实际应用需求为出发点,主要从材料配方设计和光学性能优化两个方面展开研究,对树脂基体选择、功能助剂配比、复合改性策略对晶圆折射率、透光率等关键光学参数的影响进行系统的研究。整理配方设计的基本原则和优化途径,分析各种改性方法的技术要点和应用局限,提出兼顾光学性能和加工可行性的配方设计方案,为高折射率树脂晶圆的规模化制备和性能提高提供理论依据和技术支持。

[关键词] 高折射率树脂晶圆; 配方设计; 光学性能; 复合改性; 树脂基体

Material Formulation Design and Optical Performance Optimization for High Refractive Index Resin Wafers

Lai Hengjie

Jiaying Xirui New Material Technology Co., Ltd.

[Abstract] High refractive index resin wafers serve as critical optical components in the optoelectronic information industry, where their performance directly impacts the miniaturization and integration capabilities of end products. This study addresses practical application requirements by focusing on two key aspects: material formulation design and optical performance optimization. We systematically investigate the effects of resin matrix selection, functional additive ratios, and composite modification strategies on critical optical parameters such as wafer refractive index and light transmittance. The research establishes fundamental principles and optimization pathways for formulation design, analyzes technical challenges and application limitations of various modification methods, and proposes formulation solutions that balance optical performance with manufacturing feasibility. These findings provide theoretical foundations and technical support for large-scale production and performance enhancement of high refractive index resin wafers.

[Key words] high refractive index resin wafer; formulation design; optical properties; composite modification; resin matrix

随着光电信息技术的不断进步,光学元件向着轻量化、高精度、微型化的方向迅速发展,传统的玻璃晶圆由于脆性大、质量大、加工难度高等原因,已经不能满足AR/VR光波导、高端显示等对光波导材料的要求了^[1]。高折射率树脂晶圆由于具有容易成型、成本低、力学性能好等特点,逐渐成为取代传统的玻璃晶圆的主要材料。目前树脂晶圆的折射率提高和光学性能稳定存在瓶颈,现有的配方体系普遍存在着折射率和透光率不能协同、耐候性差等问题,限制了它在高端领域的应用。因此,对高折射率树脂晶圆的材料配方设计及光学性能进行优化

研究,整理出配方组分和光学性能之间的内在联系,建立科学合理的优化体系,对于促进相关产业的升级发展有着十分重要的现实意义。

1 高折射率树脂晶圆的材料配方设计基础

1.1 配方设计的核心原则

高折射率树脂晶圆的配方设计要以光学性能为根本目标,兼顾加工可行性、使用稳定性,形成多维协同的设计原则体系。折射率提高是配方设计的主要目的,需要通过组分调控来达到目标折射率阈值,保证透光率、色散系数等关键光学参数满足

应用要求。加工适配性原则要求配方体系具有合适的粘度、固化速率,符合晶圆成型工艺技术规范,防止由于配方不合理造成成型缺陷。稳定性原则重视配方组分间的相容性,减少组分分离、降解等现象,保证晶圆长期使用过程中光学性能没有明显的衰减。另外,成本可控性和环保性要融入配方设计的全过程,在保证性能的基础上优化组分配比,降低制备成本,选用低污染、易降解的功能助剂,符合绿色生产的趋势。

1.2 树脂基体的选型依据与类型

树脂基体是高折射率树脂晶圆的主要组成,树脂基体的分子结构和性能直接影响晶圆的基础光学性能和力学性能,选型时需要考虑折射率需求、加工工艺和应用场景等各方面因素。基体树脂的折射率主要是由分子极化率和分子堆积密度决定的,分子结构中引入高极化率的官能团可以明显提高折射率,这是基体选型的主要依据。目前适配高折射率树脂晶圆的基体主要有环烯烃共聚物、环氧丙烯酸酯、聚氨酯丙烯酸酯、聚硫树脂等^[2]。环烯烃共聚物具有较好的透光性、低色散性,分子结构中不含极性基团,耐候性好,是中高折射率晶圆的优选基体;环氧丙烯酸酯树脂交联密度高,力学强度高,通过引入芳香环、硫醚键等官能团可以提高折射率,适合对力学性能要求较高的场合。

2 高折射率树脂晶圆的材料配方设计与调控

2.1 单一组分树脂基体的配方设计与调控

单一组分树脂基体的配方设计以提高折射率为主,同时改善加工性能和光学稳定性,需要根据基体树脂的分子结构特点,通过官能团改性和助剂配比调节来达到性能优化的目的。对于环烯烃共聚物基体,可以引入芳香环、硫醚键等高极化率官能团来改性基体,提高基体本身的折射率,再配合合适的增塑剂和固化剂,调节配方粘度和固化速率,保证成型过程的顺利进行。环氧丙烯酸酯基体配方调节主要是提高交联密度,通过改变固化剂的配比、固化工艺参数来提高树脂的交联程度,同时加入溴代、碘代等取代基团来提高折射率,兼顾透光率和力学性能。

2.2 复合树脂基体的配方设计与调控

复合树脂基体的配方设计是根据不同的树脂性能互相补充的特点,通过合理的配比来达到光学性能和力学性能的协同提高,核心就是优化树脂之间的相容性以及配比比例。采用环烯烃共聚物和聚氨酯丙烯酸酯复合时,需要通过添加相容剂来改善两组分的界面结合能力,防止出现相分离现象,同时调节两者的配比,利用聚氨酯丙烯酸酯的高折射率和环烯烃共聚物的高透光性,达到综合性能的优化。环氧丙烯酸酯与聚硫树脂复合时,可以利用聚硫树脂的高折射率优势来提高体系整体的折射率,利用环氧丙烯酸酯的高交联密度来改善聚硫树脂耐候

性不足的缺点,配比比例要根据目标折射率和透光率要求精确调节。复合树脂基体的配方调控要重视界面作用机制,依靠组分间的协同作用,冲破单一组分树脂的性能束缚,达成晶圆光学性能的全方位改善。

2.3 功能助剂的精准配比与调控策略

功能助剂的精确配比是改善配方体系、保证晶圆性能稳定的环节,要依照基体种类和性能要求来制订相应的调控手段。增塑剂的配比要根据基体树脂的粘度特性来调整,粘度较高的环氧丙烯酸酯树脂可以适当提高增塑剂的配比来改善流动性,环烯烃共聚物基体则需要控制增塑剂的用量,防止影响透光性和力学性能。固化剂的配比要和固化工艺相配合,根据固化温度和时间来调节固化剂的添加量,保证固化反应充分进行,防止固化剂过量造成树脂脆化。抗氧化剂与紫外线吸收剂的配比要根据应用环境的光照和温度条件来确定,在高温、强光照的环境下,可以适当提高添加量来提高耐候性,但是要严格控制用量,防止对透光率产生不利影响。功能助剂的调控要遵循精准适配、协同增效的原则,使各个助剂的作用得到最大的发挥。

3 高折射率树脂晶圆的的光学性能优化机制

3.1 折射率的优化机制与调控路径

折射率作为高折射率树脂晶圆的核心光学参数,其优化机制主要围绕分子极化率与分子堆积密度的调控展开,通过配方组分调整实现折射率的精准提升。分子极化率的提升可通过在树脂分子结构中引入高极化率官能团实现,不同官能团的折射贡献存在差异,按折射贡献排序依次为芳香环、杂环、卤素原子、硫醚键,合理引入此类官能团可显著提高分子极化程度,进而提升体系折射率。分子堆积密度的优化可通过调控树脂分子链的排列方式实现,减少分子间空隙,提高单位体积内分子数量,从而提升折射率。折射率的调控路径需结合配方设计,通过树脂基体改性、复合组分添加、助剂配比优化等多种方式协同作用,在提升折射率的同时,避免对透光率、色散系数等其他光学参数产生负面影响,实现折射率的精准可控。

3.2 透光率的优化机制与调控方法

透光率的优化主要在于减少配方体系中光散射、光吸收现象,依靠组分调控和工艺匹配来保证光线可以顺利透过晶圆。光散射主要是由于组分之间折射率的不同以及分散缺陷造成的,优化措施主要是提高组分相容性、改善复合改性组分的分散均匀性,减少相分离和粒子团聚现象,降低光线在界面处的散射损耗。光吸收主要是由树脂分子结构中的发色基团和杂质引起的,调节方法有选择无发色基团的树脂基体和功能助剂、严格控制原料纯度、减少杂质的引入、对树脂分子进行改性处理、消除树脂分子中的发色基团、降低光吸收损耗等。配方体系固化程度也会影响透光率,需要优化固化工艺及固化剂配

比，保证固化反应完全，减少未固化组分造成的光散射、光吸收，提高透光率。

3.3 色散系数的优化机制与调控策略

色散系数的优化是提升高折射率树脂晶圆成像质量的关键，其核心在于调控树脂分子结构与组分配比，减少不同波长光线的折射率差异，降低色散现象。色散系数与树脂分子的极化率、分子结构对称性密切相关，分子结构对称性越高，极化率随波长的变化越小，色散系数越优。优化机制主要包括选用低色散特性的树脂基体，如环烯烃共聚物，其分子结构对称性高，色散系数较低，可作为低色散配方的优选基体。通过复合改性也可实现色散系数的优化，将低色散树脂与高折射率树脂复合，利用两者的性能互补性，在提升折射率的同时，调控色散系数至合理范围。此外，功能助剂的选型也会影响色散系数，需选用色散系数较低的助剂，避免因助剂添加导致色散现象加剧，通过多组分协同调控，实现色散系数的优化。

3.4 耐候性的优化机制与调控措施

耐候性改良意在改善高折射率树脂晶圆长久运行期间的性能稳定性，削减由于光照，温度，湿度这些环境要素引发的影响，其改良途径主要是抑制树脂氧化以及光降解这两项。树脂的氧化和光降解主要是由于分子链断裂和交联造成的，造成折射率、透光率等光学参数下降。调控措施主要是加入抗氧化剂、紫外线吸收剂，抗氧化剂可以抑制树脂分子的氧化反应，减少分子链的断裂，紫外线吸收剂可以吸收紫外线的能量，防止紫外线引起的光降解反应。另外，树脂分子改性可以提高分子链的稳定性，从而提高它的抗氧化、抗光降解性能，达到耐候性的目的。

4 配方设计与光学性能优化的协同路径

4.1 性能平衡机制与协同优化原则

高折射率树脂晶圆的配方设计和光学性能改善要遵循性能均衡准则，达成折射率，透光率，色散系数，耐候性等主要性能的综合改善，防止单方面性能改良致使其它性能下降。协同优化原则的关键是确定各个性能指标的优先级，根据应用场景的要求来制订不同的优化策略，对AR/VR光波导用晶圆来说，要首先保证其高折射率、低色散，再顾及到它的透光率和耐候性；对高端显示用晶圆来说，则应以透光率和光学均匀性为主要的优化目标，保证成像质量。性能平衡机制的实现要依靠组分配比的精确控制，用各个组分之间的相互作用来弥补单个组分的不足，使配方体系和光学性能得到协同改善，符合各种应用场合的要求。

4.2 配方设计与加工工艺的协同适配

配方设计与加工工艺相匹配，才能保证高折射率树脂晶圆

的性能和成型质量，配方体系要符合加工工艺的技术要求，加工工艺要根据配方特性进行改进。配方设计时要考虑成型工艺对于配方粘度、固化速率的要求，改善树脂基体和功能助剂的配比，保证配方有较好的加工性，防止因为粘度过大而造成成型难。加工工艺的改进要依附于配方特性来改变固化温度，固化时间，固化压力等参数，保证固化反应完全达成，削减成型过程中出现的气泡，裂缝这类问题，从而改善晶圆的均匀性以及表面品质。配方设计同加工工艺的协同适配，可以使成型质量与光学性能得到同步提升，从而保证晶圆的规模化生产。

4.3 优化过程中的关键影响因素与控制方法

高折射率树脂晶圆的配方设计及光学性能优化过程中，存在着诸多关键影响因素，必须弄清各因素的作用规律，采取相应的控制手段。原料纯度属于影响因素之一，杂质会增大光吸收、光散射，透光率、光学均匀性变差，必须要严格控制原料纯度，对原料进行预处理，去除杂质。组分相容性直接影响配方体系的稳定性以及光学性能，需要选用相容剂、优化组分配比等方式来提高组分相容性，防止相分离现象的发生。加工过程中温度、湿度等环境因素也会对配方固化和成型质量产生影响，需要控制加工环境的温湿度，防止由于环境因素造成的性能缺陷。

5 结论

高折射率树脂晶圆的材料配方设计及光学性能优化，是高折射率树脂晶圆在光电信息领域广泛应用的基础，本文从配方设计的基本原则、组分选择及调控方法入手，分析光学性能的优化机制和协同路径，明确了树脂基体、功能助剂、复合改性组分的配比与光学性能的内在联系，提出了性能、加工、成本兼顾的配方设计与优化策略。配方设计要以光学性能为中心，结合加工工艺和应用场景，使各个组分相互配合；光学性能优化要从折射率、透光率、色散系数等主要参数入手，利用分子结构调控、组分优化和工艺适配来达到多性能协同提升的目的。

[参考文献]

[1]汪曦松,王松.光学树脂镜片在高折射率方向的研究概述[J].中国眼镜科技杂志,2020,(07):132-134.

[2]张景然.高折射率UV树脂的制备与应用研究[D].江汉大学,2019.

作者简介：来恒杰，出生年月：1985-11-26，男，汉族，籍贯：浙江省杭州市，学历：博士，职称：中级工程师，研究方向：功能型树脂显示材料的研发。