

# 基于钛酸钡纳米粒子掺杂的液晶功能薄膜的电学性能研究

刘俊俊 雷倩萍 回雨喆 李钰 蒋盈盈 毛润宇 王桃桃 杨亚玲 李鹏 张翠红\*

西京学院 陕西西安 710123

DOI: 10.12238/ems.v7i2.11690

**[摘要]** 本文主要研究钛酸钡纳米粒子掺杂对液晶功能薄膜电学性能的影响。详细阐述了钛酸钡纳米粒子的特性,如高介电常数、铁电和压电性能等。通过分析制备钛酸钡纳米粒子掺杂型液晶功能薄膜的方法及过程,深入探讨了影响该薄膜电学性能的因素,包括粒子含量、粒径、形貌等。同时,对薄膜电学性能的测试方法进行了论述,并总结了钛酸钡纳米粒子掺杂改善薄膜电学性能的机制。

**[关键词]** 钛酸钡纳米粒子; 液晶功能薄膜; 电学性能; 掺杂

## 引言

随着科技的发展和人们对生活品质要求的提高,各种新型功能材料不断涌现。液晶功能薄膜作为一种具有独特电光特性的材料,在众多领域展现出了广阔的应用前景。然而,传统液晶功能薄膜存在驱动电压高、能耗大等问题,限制了其进一步的推广和应用。钛酸钡纳米粒子因其优异的介电、铁电和压电性能,为改善液晶功能薄膜的电学性能提供了新的思路。研究基于钛酸钡纳米粒子掺杂的液晶功能薄膜的电学性能,对于开发高性能、低功耗的液晶功能材料具有重要的理论和实际意义。

### 一、钛酸钡纳米粒子的特性

#### (一) 晶体结构与相态

钛酸钡具有立方相和四方相两种晶型。在不同的温度和条件下,会发生晶型转变。其中,四方相钛酸钡具有自发极化现象,这是其呈现出优异铁电、压电等性能的重要基础。

#### (二) 高介电常数

钛酸钡纳米粒子具有很高的介电常数,这使得它在电场作用下能够产生较大的极化强度。其高介电常数特性是“电子陶瓷工业的支柱”美誉的由来之一,在改善液晶功能薄膜的电学性能方面具有关键作用,能够增强薄膜对电场的响应能力。

#### (三) 铁电与压电性能

钛酸钡属于铁电材料,具有强的偶极子。在没有外电场时,其内部的电偶极子也会呈现出一定的有序排列,产生自发极化。当施加外电场时,电偶极子的取向会发生改变,表现出明显的铁电特性。同时,其压电性能也使得在机械应力作用下能产生电荷,或在电场作用下发生机械变形,这种机电耦合特性为其在多种功能器件中的应用提供了可能。

### 二、钛酸钡纳米粒子掺杂液晶功能薄膜的制备

#### (一) 纳米粒子的制备方法

水热法作为制备高端纳米钛酸钡粉体极为常用且首选的方法,有着特定的制备原理与优势。具体而言,在高温高压的特定水溶液环境下,选取合适的钛源与钡源,让二者在这样严苛的条件下发生化学反应。在水分子的参与以及高温高压的驱动下,钛原子与钡原子按照一定的化学计量比相互结合、重构,最终生成纳米级别的钛酸钡粒子。经由此法得到的粒子,纯度相当高,基本能避免较多杂质的混入,这为后续制备高品质的掺杂液晶功能薄膜奠定了坚实基础。同时,所制备粒子的粒径呈现出均匀的特性,粒径分布范围较窄,使得粒子在后续掺杂应用时能更稳定、高效地发挥作用。溶胶-凝胶法同样是制备钛酸钡纳米粒子的有效途径。先是把钛醇盐以及钡盐等作为起始原料,将其溶解于适宜的有机溶剂当中,促使原料以分子或离子状态均匀分散。接着,在溶液体系中,水解反应率先启动,钛醇盐和钡盐的化学键在水

分子攻击下断裂,生成相应的水解产物;随后缩聚反应接连发生,这些水解产物之间相互连接、聚合,逐步形成溶胶形态。溶胶进一步经历凝胶化过程,体系的黏度持续增大,流动性减弱,最终成为具有一定形状的凝胶。后续经过干燥处理,去除凝胶中的溶剂成分,再通过煅烧,让凝胶中的有机成分充分分解、挥发,剩余的便是钛酸钡纳米粒子。整个过程中,由于原料是以溶液状态混合,能够精准地调控各成分比例,进而精确控制所生成粒子的组成,而且对于粒径大小也能依据反应条件进行细致调整,制备流程相对简洁,易于操作与控制。

#### (二) 掺杂液晶功能薄膜的制备工艺

溶液混合法制备掺杂液晶功能薄膜,操作流程较为明晰。首先要确保制备好的钛酸钡纳米粒子具备良好的分散状态,将其小心地加入到液晶与聚合单体的混合溶液之中,运用机械搅拌、超声分散等手段,尽可能使纳米粒子均匀分布于混合溶液的各处,避免团聚现象出现。随后,利用紫外光照射这一引发方式,促使聚合单体发生聚合反应。在紫外光光子的能量激发下,聚合单体分子的化学键被打开,彼此之间相互连接、交联,逐渐构建起聚合物网络结构,而液晶分子则均匀地分散于这一网络之中,最终成功形成掺杂型液晶功能薄膜。在此过程中,纳米粒子的分散性优劣直接关乎薄膜的性能稳定性与均匀性,若分散不佳,易造成局部性能差异;

### 三、影响薄膜电学性能的因素

#### (一) 钛酸钡纳米粒子含量

随着钛酸钡纳米粒子含量的增加,薄膜的介电常数通常会呈现上升趋势。这是因为钛酸钡本身具有高介电常数,其加入增加了薄膜整体的极化能力。但当粒子含量过高时,可能会出现粒子团聚现象,导致介电常数的增长趋势变缓甚至下降。适量的钛酸钡纳米粒子掺杂可以降低薄膜的驱动电压。这是由于其铁电特性产生的局部电场有助于液晶分子的取向转变,使得在较低的外加电场下就能实现薄膜的电光切换。然而,若粒子含量过多,可能会破坏液晶分子的有序排列,反而使驱动电压升高。

#### (二) 纳米粒子粒径

较小粒径的钛酸钡纳米粒子具有更大的比表面积和表面能,能够更充分地与液晶和聚合物相互作用,在电场作用下的极化响应更快,有利于提高薄膜的电学性能。但粒径过小可能会导致粒子的稳定性下降,且制备和分散难度增加。粒径大小还会影响薄膜的光散射特性,进而间接影响其电学性能。当粒径与光的波长相近时,可能会引起较强的光散射,影响薄膜的透明态和散射态之间的切换效果,从而对其在不同电场下的光学和电学表现产生影响。

#### (三) 粒子形貌

具有较大长径比的钛酸钡纳米粒子,如纳米纤维状或棒

状粒子,在薄膜中能够形成更有效的导电通道或电场诱导取向结构。这有助于增强薄膜的电学性能,例如提高介电常数和降低电阻,同时也可能对液晶分子的取向产生更显著的影响,有利于实现低电压驱动。球形钛酸钡纳米粒子在分散性方面具有优势,能够在液晶和聚合物基体中更均匀地分布。但其对电学性能的影响可能相对较为温和,主要通过其介电和铁电特性来改善薄膜的整体性能。

#### (四) 聚合条件

紫外光照射强度和剂量直接影响聚合反应的速率和程度。适当的照射强度和剂量可以使聚合物网络均匀形成,与钛酸钡纳米粒子和液晶分子良好结合,从而优化薄膜的电学性能。若照射强度过高或剂量过大,可能导致聚合物过度交联,使薄膜变得脆硬,影响其电学和力学性能;反之,则可能聚合不完全,薄膜的性能不稳定。固化温度对薄膜的微观结构和性能也有重要影响。在合适的温度下,钛酸钡纳米粒子与液晶和聚合物之间的相互作用能够达到最佳状态,有利于形成稳定的复合结构,提高薄膜的电学性能。温度过高可能会引起液晶分子的热降解或纳米粒子的团聚,温度过低则可能使聚合反应进行不充分。

### 四、薄膜电学性能的测试方法

#### (一) 介电常数测试

在测定薄膜的介电常数时,通常选用阻抗分析仪或者电容测试仪作为核心测量工具。首先,需要将制备好的薄膜精心制作成平行板电容器的样式,这要求薄膜具有一定的平整度与均匀性,以保证电容结构的规整。制作过程中,要精准控制薄膜的面积、厚度以及电极的贴合程度,确保后续测量的准确性。随后,将其置于特定的测试环境中,施加一定频率的交流电场。在交流电场的周期性作用下,薄膜内部的电荷会发生周期性的位移与极化现象。

#### (二) 驱动电压测试

驱动电压测试依托专业的电光性能测试系统展开。测试时,将薄膜样品妥善安置于测试系统的特定位置,确保光照均匀且电场施加稳定。开启测试程序,对薄膜逐步施加强度不断增大的交流电压,电压的增幅要控制在合适的精度范围内,以精确捕捉薄膜状态转变的关键节点。与此同时,利用高精度的透光率检测装置,实时、连续地观察薄膜的透光率变化情况。随着外加交流电压的升高,薄膜内部液晶分子的取向逐渐发生改变,进而导致透光率也随之变动。当透光率达到某一特定阈值,即标志着薄膜从初始的散射态成功转变为透明态,此刻迅速记录下对应的电压值,此即为薄膜的驱动电压。为确保数据的可靠性与代表性,需要对同批次薄膜进行多次重复测量,每次测量都严格遵循相同的测试流程与条件控制。

#### (三) 电流 - 电压特性测试

电流 - 电压特性测试借助半导体参数分析仪等专业设备执行。将薄膜样品连接至分析仪的测试回路中,确保连接牢固且接触良好,避免引入额外的电阻或接触不良导致的测量误差。在测试过程中,按照预设的电压序列,从低电压逐步递增至高电压,对薄膜施加不同等级的电压。每施加一个电压值,分析仪都会精准测量薄膜在该电压下的电流响应,记录下对应的电流数值。待完成整个电压范围内的测量后,对所获得的一系列电流与电压数据进行深入分析,绘制出电流 - 电压曲线。通过剖析这条曲线,可以清晰地了解薄膜的导电性能,判断其属于何种导电类型,是欧姆导电还是非欧姆导电。同时,曲线的斜率反映了薄膜的电阻特性,斜率越大,电阻越小;斜率越小,电阻越大。

### 五、钛酸钡纳米粒子掺杂的作用机制

#### (一) 局部电场的形成

钛酸钡纳米粒子自身独特的铁电特性是其在薄膜中产生局部电场的根源。由于钛酸钡晶体结构的特殊性,其内部存在自发极化现象,即便在没有外加电场时,粒子内部的电偶

极子也呈现出一定的有序排列。当这些纳米粒子均匀分散于液晶功能薄膜之中后,它们凭借自身的铁电性质,在薄膜内部构建起一个个微小的局部电场区域。在外加电场施加于薄膜时,这些局部电场并非孤立存在,而是与外加电场紧密相互作用。对于液晶分子而言,其初始状态往往是较为无序的散射态,分子取向杂乱无章。在局部电场与外加电场的协同作用下,液晶分子受到双重电场力的牵引,更容易调整自身的取向。尤其在较低的外加电场强度下,局部电场发挥着关键的辅助作用,如同“助推器”一般,助力液晶分子逐渐从无序的散射态向有序的透明态转变,最终使得薄膜能够在较低的驱动电压下实现电光切换,有效降低了薄膜的驱动电压需求。

#### (二) 界面极化效应

在钛酸钡纳米粒子、液晶以及聚合物所构成的复合薄膜体系中,三者之间存在着清晰的界面。由于钛酸钡纳米粒子、液晶和聚合物各自具有截然不同的介电常数与极化特性,这种差异在界面处引发了显著的界面极化现象。当外加电场作用于薄膜时,在界面区域,电荷会发生重新分布,以试图平衡电场带来的电势差。一方面,这种界面极化使得薄膜整体的极化强度得到显著提升,因为额外的界面极化电荷参与到了整体的极化过程之中,进而促使薄膜的介电常数增大,增强了薄膜对电场的响应能力;另一方面,界面极化过程的动态特性也深刻影响着薄膜的电学响应速度和稳定性。快速且稳定的界面极化能够确保薄膜在电场变化时迅速做出响应,并且在长时间使用过程中保持电学性能的稳定,避免因极化松弛等问题导致性能劣化。

#### (三) 对液晶分子排列的影响

钛酸钡纳米粒子的表面并非完全光滑、均匀,其表面存在着特定的电荷分布以及化学基团。这些表面特性使得纳米粒子与液晶分子之间具备了发生相互作用的基础。当纳米粒子均匀分散于液晶体系中时,粒子表面的电荷能够与液晶分子的偶极矩产生静电吸引或排斥作用,引导液晶分子的取向;同时,化学基团之间也可能发生化学反应或物理吸附,进一步调整液晶分子的排列状态。通过合理控制钛酸钡纳米粒子的掺杂浓度、粒径、形貌等参数,能够营造出适宜的粒子 - 液晶相互作用环境,使得液晶分子的排列更加有序。有序的液晶分子排列能够减少内部的缺陷和紊乱,避免因分子无序导致的光散射损失以及电学性能不均等问题,从而全方位提高薄膜的电光性能,使得薄膜在透光率调控、电学均匀性等方面都展现出更为优异的表现。

### 结论

钛酸钡纳米粒子具有高介电常数、铁电和压电等优异性能,将其掺杂到液晶功能薄膜中能够显著影响薄膜的电学性能。薄膜的电学性能受到钛酸钡纳米粒子含量、粒径、形貌以及聚合条件等多种因素的综合影响。通过优化这些因素,可以制备出具有低驱动电压、高介电常数等优异电学性能的液晶功能薄膜。钛酸钡纳米粒子掺杂改善薄膜电学性能的机制主要包括局部电场形成、界面极化效应以及对液晶分子排列的影响等方面。深入理解这些机制对于进一步优化薄膜性能具有重要指导意义。

#### 【参考文献】

[1] 庆达, 王晓宇, 苏新悦, 王建省, 赵英娜, 曾雄丰. 钛酸钡薄膜制备及压电光催化研究进展[J]. 陶瓷学报, 2024, 45(03): 446-462.

[2] 淡辉羽. 钛酸钡铁电薄膜材料及传感器研究[D]. 广西大学, 2022.

[3] 黄磊. 钛酸钡基铁电薄膜的制备及性能研究[D]. 电子科技大学, 2021.

基金项目: 陕西省大学生创新训练计划项目 (NO. S202312715045、NO. S202312715050)。