

# 基于液晶材料的智能可重构表面研究综述

赵春雨

华北水利水电大学 电子工程学院 河南郑州 450046

**摘要:** 本文聚焦基于液晶材料的智能可重构表面 (RIS) 这一适配高频通信需求的前沿交叉领域, 系统阐述其研究背景与核心价值, 全面梳理国内外在液晶材料改性、RIS单元结构设计、调控机制优化及多场景应用等方向的研究现状, 客观评述现有文献成果的优势与不足, 并展望未来发展趋势与突破方向。旨在为该领域的学术探索、技术创新及6G通信等实际工程应用提供坚实的理论参考与清晰的实践指引。

**关键词:** 液晶材料; 智能可重构表面 (RIS); 高频通信; 电磁调控

## 引言

在无线通信向毫米波、太赫兹等更高频段演进的趋势下, 传统通信技术面临复杂电磁环境适配难、高频段损耗大、多用户干扰突出等诸多瓶颈。智能可重构表面 (RIS) 作为构建智能无线电环境 (SREs) 的核心技术, 通过对电磁波的可编程调控, 为突破这些瓶颈提供了全新思路。早期RIS多采用PIN二极管、变容二极管等分立器件实现可重构, 但在高频段中, 这类器件存在损耗剧增、成本攀升及集成难度大等问题, 难以满足技术发展需求。

液晶材料凭借介电各向异性和电光效应, 可通过外部电场便捷调控分子取向, 进而实现对电磁波反射、折射特性的动态调节。相较于传统方案, 液晶基RIS具备成本低、易于大面积制备、功耗小等显著优势, 完美契合当前通信技术对低成本、低功耗、高效电磁调控的迫切需求, 逐渐成为高频通信领域的研究热点。尽管液晶RIS存在响应时间较长的短板, 在需频繁重构的场景中面临挑战, 但其在6G通信的室内外覆盖、高速移动场景及大规模物联网连接等复杂场景中仍展现出巨大应用潜力。

近年来, 随着材料合成技术、微纳加工工艺及电磁仿真理论不断进步, 基于液晶材料的RIS设计与应用取得重要进展。本课题围绕这一核心方向, 深入探讨液晶材料的高频适配改性、RIS单元结构的创新设计、调控机制的优化及实际应用场景的适配性, 旨在推动该类

RIS向高性能、低时延、集成化、实用化方向发展, 为6G等新一代通信技术提供核心支撑。

## 一、国内外研究现状

### (一) 研究现状及发展动态

在6G的基础性研究工作中, 智能无线电环境 (SREs) 概念<sup>[1]</sup>应运而生。SREs意味着无线环境不再被当作随机且不可控的实体, 而是成为网络设计参数的一部分, 人们能够依据自身意愿定制无线环境。为达成SREs, 智能超表面 (RIS) 这一全新技术在无线电研究领域备受瞩目。RIS源于工程复合材料, 主要涉及超表面。超表面是经人工精心设计的, 具备自然媒介无法提供的特殊性质, 比如对电磁波媒介进行调控。最初的超表面多为单层结构, 由不同图案元件构成, 能使入射波前产生突变相位, 通过巧妙设计如蘑菇云型、环形、回子型等不连续界面剖面<sup>[2][3]</sup>, 可实现波前的任意操作。然而, 这类超表面存在灵活性欠佳、调节成本较高的缺陷, 于是人们开始探寻能产生可变相位的超表面, 期望借助可调节元件的等效高度、长度等物理因素实现相位可变。

RIS利用超表面单元的可重构特性, 以实时可编程/可控制的方式实现对电磁波信号的调控功能。与天线和相控阵天线不同<sup>[5]</sup>, RIS通常将亚波长的超表面单元依循一定准则排布于二维表面, 每个RIS单元通过加载射频开关实现可调谐特性, 常见的可调谐器件有PIN二极管、变容二极管和射频微机电系统 (RFMEMS) 等。Chen等提出的毫米波频段超表面单元由两个矩形贴片组成, 贴片间集成PIN二极管, 工作在27GHz处, 两种开关状态的相位差为180°。Dai等<sup>[4]</sup>设计的基于变容二极管的RIS

**作者简介:** 赵春雨 (2000—), 男, 汉族, 河南周口人, 硕士, 研究生, 研究方向为可重构智能表面。

单元结构由两对矩形贴片组成，介质板背面有开槽铜接地板，变容二极管连接金属贴片并通过金属通孔与接地板相连以施加偏置电压，偏置电压变化时相位差范围约为 $300^\circ$ 。但在高频段，PIN管和变容二极管损耗剧增、成本大幅攀升，且高频反射面单元体积小，给分立器件集成设计带来巨大挑战，传统方式难以满足需求。相比之下，基于液晶的调控方式优势明显，成本低、易于大面积制备且功耗小，契合当前通信技术对低成本、低功耗、高效电磁调控技术的迫切需求，液晶RIS技术因此逐渐成为研究热点。

S. Bildik, S. Dieter等人在2015年设计了一款基于液晶的可重构天线，测试结果表明该天线在78 GHz的工作频率下增益达25.1 dBi，该天线显现出可重构、高增益、低剖面、低成本等优良特性。2019年，哈尔滨工业大学的孟繁义团队提出了一种静态驱动技术，将接地板分块，并与贴片两两匹配，实现对每一个移相单元的独立馈电。通过静态驱动技术，在仿真上实现了天线的二维扫描。Robin Neuder等人研究了缺陷接地结构倒置微带线（DGS-IMSL）在基于液晶（LC）的移相器中的适用性，该移相器可集成于可重构智能表面（RIS）。DGS具有慢波效应和低插入损耗的特点，适用于紧凑且低插入损耗的移相元件。文中采用Merek的GT7-29001 LC，通过仿真和测量展示了在25至30 GHz频段内的性能，紧凑宽带移相器覆盖整个频段。Gerardo Perez-Palomino等人设计、制造并测试了一款工作在100 GHz以上的基于液晶（LC）的可重构反射阵列天线。该天线采用多谐振单元架构，提升了带宽性能，并通过一种无需测量数据的单元电压合成方法，提高了天线在旁瓣电平 and 扫描范围方面的性能。汤浩戈<sup>[7]</sup>设计了一款工作在Ka波段的一比特RIS单元，并能在以28.8GHz、38.8GHz为中心频点的两个工作频段上实现对双极化入射波的反射相位调控。

液晶RIS作为新兴的RIS技术，在多个方面展现出相较于PIN二极管和变容二极管的显著优势。在高频通信场景下，PIN二极管和变容二极管面临着损耗剧增、成本大幅攀升以及集成设计困难等问题，而液晶RIS以其低成本、易于大面积制备和低功耗的特性脱颖而出。这使得液晶RIS特别适用于未来高频段信号的处理，如在6G通信中<sup>[6]</sup>，对于降低成本、提升能源效率以及实现高效电磁调控具有重要意义。

## （二）研究问题在本研究领域应用上的地位与价值

在6G高频通信与智能无线电环境构建中，液晶RIS

作为RIS技术核心分支，地位关键。传统依赖PIN、变容二极管的RIS，在毫米波、太赫兹频段存损耗高、集成难、成本高的缺陷，制约规模化应用。液晶RIS依托电光效应调控相位，兼具低成本、大面积制备、低功耗及宽频段适配优势，可精准弥补短板。其能优化高频信道性能、降低部署成本，助力6G广覆盖与绿色通信目标，推动RIS技术落地，在6G多场景应用前景广阔，研究价值显著。

## 二、文献评述

纵观现有文献，在液晶材料领域，学者们围绕高频适配改性、响应速度优化等核心问题展开深入研究，开发出一系列适用于毫米波、太赫兹频段的专用材料，为RIS的高频应用提供了坚实基础。然而，现有液晶材料仍存在明显短板：高频段电磁损耗虽有改善但仍需进一步降低，以适配更高频段通信需求；响应时间较长的问题尚未彻底解决，在需频繁重构的动态场景中适配性不足；部分高性能改性材料的制备工艺复杂，规模化生产难度较大。

在RIS单元结构设计与集成技术领域，现有研究已提出反射阵列、相控阵等多种架构，实现了宽角度扫描、宽频段覆盖等功能。但仍存在诸多不足：单元结构设计 with 液晶材料特性的匹配度有待提升，部分方案存在调控精度不足、带宽受限等问题；集成工艺虽已实现高精度液晶层控制，但大面积制备时的一致性仍需优化；柔性集成技术尚处于起步阶段，难以满足复杂载体部署需求。

在调控机制与性能优化领域，现有研究已实现连续相位调控与宽范围波束扫描，但调控灵活性与效率仍有提升空间<sup>[8][9]</sup>。多数方案采用单一电场调控方式，多维度协同调控技术尚不成熟；响应时间优化虽取得进展，但与半导体基方案相比仍有差距；相位分配与波束成形的优化算法多针对特定场景，通用性不足，难以适配复杂多变的通信环境<sup>[10]</sup>。

总体而言，基于液晶材料的RIS研究已取得阶段性进展，但仍处于发展阶段，在材料性能、结构设计、调控机制及应用落地等方面均存在较大提升空间。未来需要进一步加强多学科交叉协作，针对现有问题开展系统性研究，推动该领域从理论探索向实际应用跨越。

## 结论

综上所述，基于液晶材料的智能可重构表面（RIS）是融合材料科学、电子工程、通信技术等多学科的前沿阵地，既承载着突破高频通信技术瓶颈的使命，又面临

着材料性能、结构设计、调控机制及应用适配等多重挑战。通过对国内外研究现状的全面梳理与文献评述,我们清晰地认识到,未来需要以多学科协同为核心,整合材料改性、电磁仿真、集成工艺等多领域技术,深入挖掘液晶材料在RIS领域的潜在应用价值。一方面,聚焦核心技术攻坚,针对性解决材料高频性能、结构调控精度、集成可靠性等关键难题;另一方面,强化技术与场景的适配性,推动工艺优化与工程化落地,使其更好地满足高频通信及多领域应用需求。同时,注重理论研究与实际应用的紧密结合,针对6G通信、毫米波雷达、工业物联网等具体应用场景,量身定制基于液晶材料的RIS解决方案,推动该领域从实验室研究迈向规模化工程应用,为高频通信与智能传感领域筑牢技术根基。

在未来的研究中,还应密切关注量子计算、智能算法等新兴技术的发展动态,积极探索这些技术与液晶RIS的深度融合路径,提前布局下一代智能调控技术,应对潜在的技术迭代与应用挑战,确保该领域技术始终走在前沿。相信随着多学科交叉研究的不断深入,基于液晶材料的RIS技术必将突破现有瓶颈,在6G通信、智能传感等领域绽放出耀眼光芒,为数字化社会的高质量发展提供有力支撑。

#### 参考文献

[1]YEN T J, PADILLA W J, FANG N, et al.Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5663): 1494-1496.

[2]TAO H, BINGHAM C M, STRIKWERDA A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz meta material absorber: design, fabrication, and characterization[J].Physical Review B, 2008, 78(24): 241103.

[3]TAO H, STRIKWERDA A C, FAN K, et al.Recon figurable terahertz metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(14): 147401.

[4]DAI J Y, TANG W K, ZHAO J, et al.Wireless com munications through a simplified architecture based on time- domain digital coding metasurface[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(7): 1900044.

[5]乔畅.可重构人工电磁超材料的设计及研究[D].西安:西安电子科技大学.2019.

[6]马琳.智能反射面辅助毫米波通信系统中的信号处理技术[D].成都:电子科技大学,2021.

[7]汤浩戈,於阳,郝鹏,等.一种基于液晶的Ka波段1bit双频双极化RIS单元设计[C]//2023年全国微波毫米波会议论文汇编(三).2023.

[8]薛炜民.数字可重构反射阵天线研究[D].西安:西安电子科技大学.2018.

[9]张金美,龙宇航,孙云龙,等.大规模RIS辅助ISAC系统资源优化研究[J/OL].无线电通信技术, 1-9[2026-01-16]

[10]王华华,张笑剑,刘佳璇.基于耦合相移的STAR-RIS加权和速率优化方法[J/OL].无线电通信技术, 1-9[2026-01-16]