

北京师范大学

“本科生科研训练与创新创业”项目中期进展报告

项目名称	利用超表面结构色实现大视角多功能全彩显示			项目级别	国家级
项目负责人	李昊霖	所在院系及专业	物理学系物理学	手机	19506466228
项目组成员	曹杨	所在院系及专业	物理学系物理学	手机	18618357277
	陈自立	所在院系及专业	物理学系物理学	手机	13684172826
		所在院系及专业		手机	
导师姓名	陈建军	所在院系	物理学系	手机/电话	13811459730
项目计划执行情况		按时完成 <input checked="" type="checkbox"/> 延期完成 <input type="checkbox"/> 可能无法完成 <input type="checkbox"/>			
项目进展及下一步工作安排	1.项目进展情况（项目是否如期进展、已完成的工作等）： （1）文献学习 通过对 40 余篇相关文献的研读，我们对超表面领域的研究现状有了初步的了解，基本掌握了利用几何相位控制相位和偏振的原理与方法，并积累了一些常见的超表面结构，比如光栅、纳米槽阵列、V 形天线、环形谐振器、柱面谐振器等。 我们意识到，超表面结构共振的各向异性会导致正交偏振光的产生，而正交偏振光是控制超表面色彩的关键；此外，旋转结构单元产生的几何相位是控制超表面相位分布的关键。 （2）Comsol 学习与超表面模拟 在这一阶段，我们了解了有限元方法（FEM）求解麦克斯韦方程组的原理，并掌握了使用 Comsol 软件进行超表面仿真的方法。我们分别对表面浅光栅、金属槽阵列、V 形天线阵列、V 形槽阵列进行了建模仿真，并对文献报导的结果进行了对比验证。由此我们掌握了对超表面结构的仿真模拟技术，并能对文献的结构进行改进或者自行设计新的超表面结构，并开展系统的仿真模拟研究。 （3）超表面结构设计 在这一阶段，我们模拟了用于全彩显示和多通道全息超表面设计的流程，在设计中以金属表面浅光栅为例。为了实现全彩显示，我们通过对不同结构参数的超表面单元的仿真，找到了三基色对应的结构参数，并利用混色原理设计了一套颜色匹配算法，从而确定了每个像素点对应的超表面的几何结构参数；为了实现多通道全息，我们学习了全息相位重建算法 Gerchberg - Saxton (GS)算法，并利用该算法计算出了每个结构单元产生的几何相位，进而得到结构的旋转角度。 为了设计出可直接用于电子束光刻（e-beam lithography; EBL）的 GDS 版图，我们使用了开源的 Matlab GDS Photonics Toolbox 和 KLayout 工具设计大规模超表面结构。最终，我们设计了一套生成用于全彩显示和多通道全息超表面的 GDS 版图的算法流程。				
	2.项目实施过程中遇到的困难及解决措施： （1）在同一个超表面上使用的不同参数的基本结构单元数量决定了全息图通道数和单元可显示的颜色数，若不同参数的结构单元过多，虽然显示的色彩会更加丰富，但是不同全息通道间产生串扰。 为了选择合适的结构单元，我们可以通过仿真不同结构参数的单元的正交偏振反射谱，从中选取反射峰重叠程度较小的几种结构作为超表面基本的结构单元。以金属表面浅光栅为例，选择 3 种或 4 种基本结构单元可以实现不同通道间的低串扰。 为了实现更大色域和更丰富色彩的全彩显示，我们将 N*N 个（N≥3）超表面结构单元组合为一个像素点，通过 3 种或 4 种基色的混合，实现更为丰富的色彩，并可以在一定程度上调节亮度；更大的 N 可以实现更为丰富的色彩，但色域并不会扩展；为了扩展色域应该使用更多的基色进行混合。 （2）在设计多通道相位型全息图时，每个通道的相位调制单元（对应于某一结构参数的基本单元）并不是连续分布的，GS 算法的适用性存疑。				

我们直接使用 GS 算法在不连续的调制单元上进行设计，然后逆傅里叶变换计算全息重构图，发现 GS 算法表现良好，仍然可以使用。

3.项目经费使用明细：

名称	单价	数量	总价	事由
不间断供电电源	2850.00	1	2850.00	实验室专用设备
《朗道理论物理学教程》	960.80	1	960.80	书本费
高纯铜等	3655.39	1	3655.39	专用材料费
iPad 手写笔	899.10	1	899.10	办公用品费
1TB SSD 固态硬盘	524.00	1	524.00	数据存储
英睿达 32GB 笔记本内存条	441.60	2	997.98	仿真计算使用
快递费	46.20	1	46.20	邮电费

4. 项目阶段性成果（含发表、待发表及未发表）：

（1）我们通过对多种超表面结构的仿真计算和理论分析，对常见超表面的性质进行了验证性计算，重点关注了正交偏振反射/透射峰的波长、高度和半高全宽，这分别决定了色彩单元的颜色、效率以及单色性，并对不同结构进行了总结与比较。

（2）我们设计了一套用于全彩显示和多通道全息的超表面设计算法，通过输入要显示的图像和各个全息通道的图像，可以直接生成用于电子束光刻（e-beam lithography; EBL）的 GDS 版图。该算法分别通过我们自行设计的色彩匹配算法和改进的 GS 算法实现全彩显示和多通道全息图的处理，将目标图像转化为超表面单元的结构参数，然后利用 Matlab GDS Photonics Toolbox 生成完整的 GDS 版图。

5. 下一步的工作计划：

（1）对目前的流程算法进一步完善，目前是以表面浅光栅超表面为例，下一步需提升算法的灵活性和可扩展性，可以很方便的设计其他类型的超表面，最终期望形成一个全流程的工具箱。

（2）目前设计的超表面完全依赖于表面亚波长结构，缺乏灵活性和可调谐性，因此下一步我们将探索动态调控超表面的理论与技术，目前文献报导的超表面动态调控手段主要有热调谐、电调谐、光调谐、化学调谐、机械调谐，此外，我们将结合我们实验室的优势，通过可控激光诱导气泡的方式实现超表面的动态调控。

项目负责人签名：李昊霖 2024 年 3 月 4 日

项目组成员签名：曹杨 陈自立

审核意见

指导教师对项目研究工作的意见、建议：

项目《利用超表面结构色实现大视角多功能全彩显示》依据开题时的研究主题和研究计划，有序进行了文献阅读、超表面仿真模拟、超表面设计等步骤。团队通过文献学习，掌握了超表面领域的基础理论和关键技术，此外，团队还成功利用 Comsol 软件进行了超表面仿真，验证了文献报道的结果，并尝试进行结构的改进和新设计。在超表面结构设计环节，团队设计了一套全彩显示和多通道全息超表面的算法流程，这是项目的一大进展。经过半年的课题研究，该课题整体推进趋势良好，较好的按照既定研究目标和研究内容进行了研究。

下一步建议以动态可调谐超表面为主要研究方向，并充分利用新材料、新技术设计新的超表面调控方式，以期在超表面领域取得更大突破。

指导教师签名：陈建军 2024 年 3 月 4 日

