

清华大学优秀博士学位论文丛书



tsinghua
theses

基于手性光场作用的 超颖表面的相位调控特性 及其应用

黄玲玲 著 Huang Lingling

The Phase Modulation Property of Metasurfaces Based on
Chiral Field Interaction and Its Applications

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

基于手性光场作用的 超颖表面的相位调控特性 及其应用

黄玲玲 著 Huang Lingling

The Phase Modulation Property of Metasurfaces Based on
Chiral Field Interaction and Its Application



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍超颖表面领域的研究现状,包括物理机制及功能应用。创新性地提出并实现了一种基于金纳米棒天线阵列的超颖表面,并以此为基础,设计了一系列新颖的功能应用,突破了传统光学器件的限制,可适应未来高度集成的微型光电系统的发展要求。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于手性光场作用的超颖表面的相位调控特性及其应用/黄玲玲著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-51507-4

I. ①基… II. ①黄… III. ①纳米材料—调相—研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 255151 号

责任编辑:陈朝晖

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:董 瑾

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:9 字 数:150 千字

版 次:2018 年 12 月第 1 版 印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

产品编号:071349-01

一流博士生教育

体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生导师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长
2017年12月

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月

导师序言

正如《哈利·波特》系列电影里的隐身衣带给大家的新奇和震撼一样,超颖材料(Metamaterial,也译作“超材料”)在过去20年逐渐进入人们视野,引起了研究人员的广泛兴趣,正在成为全球科技创新的又一焦点。超颖材料是指一类能够实现自然界中不存在的超常物理特性的人造复合材料。打个比方,一根筷子插入水杯中,立在水中的部分看起来会发生偏折,上下两段筷子分立液面法线两侧;而在负折射率的液体中,上下两段筷子将位于液面法线同一侧,即产生异常偏折。但在自然界中是不存在负折射率的材料,而通过深亚波长微纳结构的巧妙设计,就可以实现具有负折射率的人造材料,从而突破自然规律的限制。超颖材料的设计思想极大地拓展了自然材料的范畴,把功能材料的设计和开发带入另一片崭新的天地,引发了诸如新一代信息技术、国防工业、新能源技术、微细加工技术等领域的重大变革,被多个国家列为颠覆性基础研究领域之一,上升为国家层面的重大科研战略。

在超颖材料掀起全球科技高潮的同时,也面临着一系列挑战,可归结为较大的光学损耗和严苛的三维微纳加工要求这两个瓶颈问题。以此作为切入点和攻克方向,研究人员提出了一类特殊的二维超颖材料,即超颖表面。超颖表面以其平面化、超薄、低损耗、易加工的优势使得其更具有应用价值。通过对入射超颖表面的电磁波宏观参量的灵活有效的调控,利用逆向设计可实现特定的功能应用,在成像显示、光学全息技术、光束轨道角动量操纵、光束整形、超大容量信息存储、量子信息处理、奇异光学等方面展现了巨大的潜力。

本论文选题前沿,首先介绍了超颖表面这一领域的研究现状,包括物理机制及功能应用。在此基础上,创新性地提出并实现了一种基于金纳米棒天线阵列的超颖表面,其对入射电磁波的相位改变具有独特的宽带无色散特性和手性选择性,即相位改变依赖于入射光的圆偏振态旋向。作者通过设计表面相位改变的梯度排列,实现了手性依赖的广义折射定律,并在此技术上实现了上述负折射现象。以此为基础原理,设计实现了一系列新颖的物理现象和功能应用,包括生成宽带涡旋光束、实现手性光场调控的表面等

离激元可调谐定向激发、实现手性光场调控的双极性平板超透镜,以及实现高分辨率同轴再现三维纳米全息显示等,极大地突破了传统光学元器件的限制,可适应未来高度集成的微型光电系统的发展要求。这些具有重大创新的工作成果发表在 Nature Communications 等高水平学术期刊上,一经发表即引起了国际同行的极大关注,获得了很高的引用率。

超颖表面无疑为新一代超薄、小尺寸、高效智能的光电功能器件的研发开启了大门。今后一段时期,超颖表面将沿着光场复振幅、偏振、角动量等全面调控的研究方向深入发展,进一步挖掘超颖表面的物理特性,解决一些关键物理问题,将为其设计加工和性能优化提供可靠的理论依据,拓展新型功能性应用能力和范围。未来我们终将不再受限于大自然的馈赠,而是通过人造材料的不断发现,可以更自由地驾驭光,更好地服务人们的生活。

最后,衷心祝贺黄玲玲博士的论文付梓出版。祝愿她未来的科研事业和人生一切顺利,永保清华赋予她的“自强不息,厚德载物”的精神,勇攀科研高峰。

是为序。

谭峭峰

2018年9月于清华园

摘 要

超颖表面(Metasurface)由亚波长尺寸的周期、准周期或随机排列的单元构成,其厚度远小于光波长,可以近似为二维平面。通过逐点设计超颖表面的电磁响应,能够实现对光场相位、振幅、偏振和角动量的操纵。与体超颖材料相比,超颖表面的二维特性能够减小光场与其相互作用的欧姆损耗以及结构对微纳加工工艺的挑战。本文提出并研究一种基于棒形纳米天线阵列的超颖表面,在圆偏振光(称为“手性光场”)作用下产生无色散的表面相位突变,从而对出射光波前相位进行调控,并在此基础上研究若干新颖功能应用。

首先研究了这种超颖表面的相位调控机理。通过偶极子模型和严格数值模拟,揭示了该超颖表面对出射场波前改变的贝里相位本质,并分析和归纳了其相位调控的三个特性:相位和振幅独立可调;宽带无色散相位特性;以及表面相位突变的符号具有依赖于入射光场手性的特性。通过设计表面梯度相位,实验验证了左/右旋圆偏振光倾斜入射时,实现依赖于入射光手性的广义折射定律和负折射现象。

基于上述相位调控机理,实现了一种手性光场调控的双极性平板柱透镜和球透镜,能够通过改变入射/出射圆偏振光的手性而改变透镜的极性,实现凸透镜或凹透镜的功能。通过实验验证了手性光场调控的聚焦以及放大/缩小成像功能。基于相同原理,设计并实现了能够在可见光和近红外波段生成宽带涡旋光束的超颖表面,其产生的涡旋光束拓扑电荷数的正负可通过入射光的手性调控。

研究了基于圆偏振光垂直入射的超颖表面激发器,实现表面等离激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)定向激发。利用超颖表面产生依赖于手性的波数增量,从而建立两个相反方向非对称或对称 SPP 波矢匹配条件,在同一超颖表面上实现三个波长的 SPP 定向激发,包括完全的单向定向激发以及双向对称激发。利用椭圆偏振光入射,通过调控椭圆率,实现了 SPP 定向激发比的连续可调。

研究并实现了基于超颖表面的亚波长像素同轴再现三维相位全息。利用计算全息的原理将物光光波的相位编码到超颖表面,加工实现的全息图尺寸仅有 $400\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}$,像素大小仅有 $500\text{nm}\times 500\text{nm}$,突破了现有的空间光调制器、衍射光学元件等的像素尺寸限制导致的小视场角瓶颈,去除了多级衍射串扰和孪生像。实验分别设计和实现了三维飞机和三维螺旋点阵全息图,可工作于不同波长并具有 $[-40^\circ, 40^\circ]$ 的大视场角。

关键词: 超颖材料;超颖表面;金属微纳结构;表面等离激元;三维全息

Abstract

A metasurface is composed of patterned periodic, aperiodic or random distributed flat subwavelength-scale building blocks in two-dimensional (2D) array, which is supported by dielectric substrate. The thickness of such metasurface is ultra-thin by comparing to the wavelength of incident light. The planar metasurface is expected to facilitate the full control of light, including phase, amplitude, polarization and angular momentum. The major issues hampering the development of bulk three-dimensional (3D) metamaterials technology, such as high loss, cost-ineffective nanofabrication and challenging integration can be conquered by reducing the dimensionality to the 2D "surface". This dissertation studies a novel class of metasurface composed of nanorods, whose phase modulation presents interesting features. Such metasurface is capable of generating dispersion-less interfacial phase discontinuities and controlling the light propagation. Several applications are proposed and demonstrated.

The interaction of circularly polarized (CP) light with a nanorods antenna at the interface to generate spatially varying abrupt phase discontinuities is thoroughly investigated. By using dipole radiation theory approach and full-wave simulations, three characters of such metasurface are summarized: the phase and amplitude can be tuned independently; the phase modulation is dispersion-less; the sign of the phase discontinuities is helicity-dependent with respect to the incident light field. Importantly, the phase discontinuity solely depends on the orientation of dipole antennas, but not the spectral response. Such phase is geometry in nature, which is referred to as Berry phase. By arranging the antennas in an array with a constant phase gradient along the interface, the phenomenon of broadband anomalous refraction, even negative refraction are observed in experiment with oblique incidence ranging from visible to

near-infrared wavelengths.

Based on helicity dependent phase discontinuities for CP light, a counter-intuitive dual-polarity flat lens is demonstrated. Specifically, by controlling the helicity of the input and output light, the positive and negative polarity is switchable in one identical flat lens, that is, the convergence (divergence) wave-front will be reversed to divergence (convergence) one. The switchable focusing properties and magnified/demagnified imaging are observed on the same lens experimentally. With well-designed 2D distributions of nanorods, a broadband optical vortex beam is generated without extra burden on nanofabrication. Similarly, by manipulating the helicity of incident light, the sign of topological charge of a vortex beam will change as well.

Based on the asymmetry momentum matching condition resulting from interfacial phase gradient for anomalous refraction, light can be coupled to the oscillation of free electron and photons, known as surface plasmon polariton(SPP). Unidirectional excitation of SPP in one direction for anomalous diffractions and equally excitation of SPP in both directions for ordinary diffractions are observed at three different wavelengths with the same metasurface. The device works upon normal incidence. By tuning the ellipticity, the extinction ratio can be tuned continuously.

On-axis 3D phase holography using metasurfaces is investigated. The metasurface encodes the object phase information into the azimuthal orientation angle of the subwavelength nanorods based on computer generated hologram(CGH) method. The whole size of hologram is only $400\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}$, with subwavelength pixel size of $500\text{nm}\times 500\text{nm}$, which exceed the ability of traditional spatial light modulator and diffractive optical devices for holography. In addition, the undesired effect of multiple diffraction orders and twin images usually accompanying hologram are eliminated. In experiment, a 3D air plane model and a helix model are demonstrated, and large field of view (FOV) range from $[-40^\circ, 40^\circ]$ is achieved.

Key words: metamaterials; metasurface; metallic micro-nano-structures; surface plasmon polariton; 3D holography

主要符号对照表

SPP	表面等离激元 (surface plasmon polariton)
SRR	开口谐振环(split ring resonator)
EBL	电子束光刻(electron beam lithography)
FIB	聚焦离子束(focused ion beam)
FSS	频率选择表面 (frequency-selective surface)
LCP	左旋圆偏振光(left-handed circularly polarized light)
RCP	右旋圆偏振光(right-handed circularly polarized light)
SHEL	光子自旋霍尔效应(spin Hall effect of light)
LSPR	局域表面等离激元共振(localized surface plasmon resonance)
SEM	扫描电子显微镜(scanning electron microscope)
CCD	电荷耦合元件(charge coupled device)
FTIR	傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy)
FWHM	半高全宽(full width half maximum)
NSOM	近场扫描光学显微镜(near-field scanning optical microscopy)
PML	完美匹配层(perfect matched layer)
CGH	计算机全息图(computer generated hologram)
SLM	空间光调制器(spatial light modulator)
FOV	视场角(field of view)
SBP	空间带宽积(space-bandwidth product)
k_{SPP}	表面等离激元的传播常数
λ_{SPP}	表面等离激元的波长

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 超颖材料	1
1.1.1 超颖材料简介	1
1.1.2 超颖材料的研究现状	3
1.2 超颖表面	5
1.2.1 超颖表面概念的提出	5
1.2.2 超颖表面的特点	7
1.2.3 超颖表面的研究现状	8
1.3 本文的主要研究内容	15
第 2 章 基于手性光场作用的超颖表面特性研究	17
2.1 引言	17
2.2 加入表面梯度相位后的广义折射与反射定律	18
2.3 基于圆偏振光入射的表面相位调控机理	22
2.3.1 基于电偶极子模型推导棒形纳米天线的散射特性	22
2.3.2 基于 Pancharatnam-Berry 相位推导棒形纳米天线 散射特性	27
2.4 依赖于手性的广义折射定律的理论与实验	29
2.4.1 依赖于手性的广义折射定律	29
2.4.2 数值模拟	32
2.4.3 实验验证	34
2.5 本章小结	41
第 3 章 手性光场调控的双极性平板透镜和宽带涡旋光束生成	43
3.1 手性光场调控的双极性平板透镜	43
3.1.1 引言	43