

项目名称：非线性光学拓扑态的实现及调控新原理

项目主要经费来源及数额：国家重点研发计划项目(2877万)

所属领域（在代码前打“√”）

01.数学、物理、天文、力学；02.化学、化工、纺织；03.地球、海洋、大气、资源、矿业；04.与人体研究有关的生物学、医学；05.药  
学；06.农学、林学、畜牧兽医学、水产学和与以上研究内容相关的生物  
学；07.环境；08.材料、冶金；09.计算机、自动化、电子、通讯、  
仪器科学与技术；10.航空航天、机械、电气；11.能源、交通；12.  
土木、建筑、水利；13.管理科学；14.国际合作；15.量子科学与柔  
性电子；16.人工智能与区块链技术；17.脑科学与认知科学；18.交  
叉科学与未来技术；19 生物安全

合作单位（排序）：

克罗地亚萨格勒布大学，

加拿大国立科学研究院，

希腊克里特大学，

德国罗斯托克大学

项目简介（严格限 500 字以内）：

拓扑作为光学全新的自由度在光子学领域的研究方兴未艾。拓扑光子学为探索物理规律和发展高新光子技术如新一代拓扑激光器带来了新机遇，其基础原理到器件应用的研究对我国信息产业的源头创新和科学发展都具有重要意义。

目前拓扑光子学的研究几乎都集中在线性效应上。然而，无论是在经典还是量子世界里，非线性效应比比皆是，塑造了自然界的多元化也促进了应用科学的发展。在光学拓扑系统中考虑非线性效应会带来许多有趣的现象和新应用。然而，如何搭建一个可调控的非线性拓扑光子学实验平台，实现对光学拓扑态的非线性调控，国际上几乎还是空白。

本项目利用自主研发的连续激光直写技术，首次实现了非线性对宇称时间对称性与非厄米拓扑态的调控，实现了非线性诱导的高阶光子学拓扑绝缘体，演示了光学孤子相互作用引起的动态拓扑相变和“演生型”拓扑物理现象。这些结果显示，局部非线性效应可以影响和改变系统的整体对称性和拓扑相，改变了人们对非线性复杂系统中多重特性相互作用的认知。不仅会促进拓扑光子学的发展，对其它交叉学科相关的基础研究都有推动作用，对开发拓扑光子学器件也有深远影响。相关成果发表在《科学》等顶尖期刊上，被国内外多家媒体专题图文报道。

## 主持人及主要完成人简介：

**陈志刚：**南开大学物理科学学院教授，曾获国家海外杰出青年基金，入选国家海外高层次人才引进计划，入选美国光学学会会士、美国物理学会会士。先后担任过包括 *Light Sci. & Appl.*、*Optics Letters*、*Science Bulletin*、*Adv. in Phys. X* 等多种学术期刊编委，担任过多个重大国际学术会议包括 CLEO 的主席和主委。作为科研领军人，组建了一支具有国际先进水平的创新团队，主持和参与主持了多项科研项目，包括作为项目首席科学家承担国家重点研发计划量子调控与量子信息专项项目。在光场调控、人工材料、光子学方面取得了一系列标志性成果。已发表专著和专著章节 8 篇，学术论文 250 余篇，包括 *Science* 和 *Nature* 系列期刊以及国内顶尖期刊《光：科学与应用》、《科学通报》、《物理学报》和《光学学报》。所做工作被频频引用，并被诸多媒体杂志宣传。指导课题组教师荣获国家优秀青年科学基金等人才项目，课题组学生荣获国家博士后创新计划、中国光学学会王大珩光学奖等。

**许京军：**南开大学物理科学学院教授，国家杰出青年基金获得者，教育部长江学者，长期从事凝聚态非线性光学及其应用研究，发现了多项具有重大科学意义和应用前景的新效应、新器件和新机制。合作发表了大量高水平学术论文，编著多部著作，被国际同行大量引用。形成了弱光非线性光子学的研究体系和特色，为国家载人航天等重大工程项目的实施提供了有效的技术支持，极大地推动了弱光非线性光子学及其应用的发展，产生了很好的经济和社会效益，得到国内外同行的高度认可，形成了重要的国际学术影响力。先后承担了国家 863 计划、973 计划、国家杰出青年科学基金、天津市重大科技攻关等重点科研项目的工作，曾获国家自然科学二等奖 1 项、天津市科技进步（自然科学）一等奖 3 项，还获得了全国优秀科技工作者、中国青年科学家奖、中国青年科技奖、全国十大杰出青年等多项荣誉。

对完成项目有特别贡献的 45 岁以下的其他学术骨干情况介绍：

**宋道红**，男，40 岁，博士，南开大学教授，入选南开大学百名青年学术带头人培养计划，获国家优秀青年科学基金资助。主要从事微结构光子学、非线性光学研究，研究内容集中于拓扑光学微结构中的光传输及新颖物理现象。近年来在该领域的研究成果在 *Science*, *Nat. Mater.*, *Nat. Commun.*, *Phys. Rev. Lett.*, *Light: Science & Appl.*, *Optica*, *Opt. Lett.*, *Opt. Express* 等著名期刊发表论文五十余篇，SCI 他引 800 余次。主持承担了国家自然科学基金项目和科技部 973 项目子课题，并以学术骨干身份参与国家重点研发计划项目等，参与撰写由上海交通大学出版社出版的光物理研究前沿系列《非线性光学研究前沿》专著一个章节。作为第二完成人获得首届中国光学科技二等奖。

**夏士齐**，男，28 岁，博士，现为南开大学陈志刚教授课题组博士后，主要从事拓扑光子学方面的研究。他在实验上开创性地使用逐点写入的方式构建波导结构，实验方法的创新促进了平带、拓扑光子晶格、非线性非厄米光学等相关领域的发展。目前，以第一作者在 *Science*, *Physical Review Letters*, *Light: Science & Applications* 上发表论文三篇，以共同一作在 *Nature Communications* 上发表文章一篇。参与的工作还发表在 *Physical Review Letters*, *Advanced Optical Materials*, *Advanced Photonics*, *Optics Letters*, *APL Photonics* 等 SCI 期刊总计 15 篇。曾荣获第十七届王大珩奖学金学生奖、研究生国家奖学金两次、“南开十杰”荣誉称号、天津市创新创业奖学金、南开大学首届唐立新奖学金、研究生一等公能奖学金、*Nature Photonics* 颁发的最佳海报奖。在博士后入站时获得了中国博士后科学基金会博士后创新人才计划支持。

**Domenico Bongiovanni**，男，41 岁，博士，现为南开大学陈志刚教授课题组博士后，研究方向为拓扑光子学和光场调控，在 *Light: Science & Applications*, *Physical Review Letters*, *Photonics Research.*, *Physical Review A*, *Optics Letters*, *Optics Express*, 和 *OSA Continuum* 等具有国际影响力的期刊上发表论文 11 篇。在 *CLEO US*, *European CLEO*, *Advanced Photonics Congress*, *IEEE Photonics Conference* 等国际光学会议上作报告 14 次。其关于突然自聚焦光束的研究得到了相关领域的广泛关注，被 *Opt. Photonics News journal* 评为 2021 年最具影响力的研究之一。博士后期间，**Domenico Bongiovanni** 博士获得了中国博士后科学基金会以及天津博士后基金的资助，同时还参与主持了中国国家自然科学基金会的项目。

## 项目的特色、创新点及标志性成果

### 本项目的特色

拓扑光子学目前主要集中在线性拓扑现象的研究，因为通常人们认为能带拓扑是定义在线性系统中。对于非线性与拓扑态的相互作用研究无论是基本概念还是实验方面都存在挑战，本项目开发了连续激光直写技术，在非线性晶体中制备了同时具有非线性、不同对称性与拓扑特性的多种光学微结构，包括非厄米拓扑和高阶拓扑光子晶格，实现了多种新颖的非线性光学拓扑态，揭示了非线性调控拓扑态新原理。

### 创新点：

(1) 在一维非厄米拓扑光子晶格中，通过非线性调控单缺陷格点的折射率，实现了对系统宇称时间对称性与非厄米拓扑态的调控，揭示了局部非线性效应可以影响和改变系统的整体宇称时间对称性。

(2) 在高阶拓扑光子晶格中，发现了弱非线性条件下高阶拓扑角态与拓扑边界态之间的相互转化以及强非线性作用下拓扑角态到空间孤子的演化。揭示了高阶拓扑晶格与连续谱中束缚态的有机结合以及非线性对属于非带隙束缚态的高阶拓扑态的有效调控。

(3) 提出了一种利用非线性孤子相互作用导致动态拓扑相变的新方法，该工作将非线性孤子态与非平凡拓扑相联系起来，演示了一种新型的“演生型”非线性拓扑物理现象。

### 标志性成果：

本项目依托教育部弱光非线性重点实验室平台和广泛的国际合作，由国家科技部重点研发计划项目及自然科学基金委重点项目资助，在国际上首次实现了非线性对高阶光子学拓扑态、非厄米拓扑态、孤子作用诱导拓扑态的智能调控。相关成果发表在《科学》[Science 372, 72 (2021)]、《光：科学与应用》[Light: Science & Applications 10, 164 (2021)]和《物理评论快报》[Physics Review Letters 127, 184101 (2021)]上。并被 Science 杂志专文评述我们的工作“打开了交叉学科领域研究的大门”（..open the door for investigating this overlap of disciplines），被 Phys.org 网站及中国科技网、中国科学报、国家自然科学基金委网等国内外多家媒体专题图文报道。

### 证明材料目录：

(1) 代表性论文 1: S. Xia\*, D. Kaltsas\*, D. Song\*, I. Komis, J. Xu, A. Szameit, H. Buljan†, , K. G. Makris†, Z. Chen†, "Nonlinear tuning of PT symmetry and non-Hermitian topological states" Science 372, 72-76 (2021)

- (2) 代表性论文 2: Z. Hu\*, D. Bongiovanni\*, D. Jukić, E. Jajtić, S. Xia, D. Song, J. Xu, R. Morandotti, H. Buljan† and Z. Chen†, “Nonlinear control of photonic higher-order topological bound states in the continuum”, *Light: Science & Applications* 10, 164 (2021)
- (3) 代表性论文 3: D. Bongiovanni, D. Jukić, Z. Hu, F. Lunić, Y. Hu, D. Song, R. Morandotti, Z. Chen†, and H. Buljan†, “Dynamically Emerging Topological Phase Transitions in Nonlinear Interacting Soliton Lattices” *Phys. Rev. Lett.* 127, 184101 (2021)
- (4) *Science* 杂志同期评述论文: P. Roztocki, R. Morandotti, “Death and rebirth through nonlinear control” *Science*, 372:32-33 (2021)