

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 94 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2020 年 5 月 11 日

“光学与光子学”论坛综述

一、国内外研究现状

光在我们日常生活中扮演着重要的角色，联合国教科文组织为强调光在科学、文化、艺术和教育以及可持续发展、医药、通信、能源等多个领域的重要作用，宣布 2015 年为“国际光年”，并在 2018 年确定每年的 5 月 16 日为“国际光日”。

光学研究的每一点进步都对人类科学研究、认识世界起到不可或缺的推动作用，特别是激光与光纤的发明极大地推动了信息科学技术的进步，改变了人类社会生活和经济的发展方式。20 世纪 80 年代末，光子晶体概念的提出将传统光学的研究从宏观尺度推进到波长相当的微米尺度。进入 21 世纪以后，等离激元光子学、超构材料等研究的兴起进一步将光学研究拓展至亚波长甚至纳米尺度。随着光学与光子学研究越来越注重光子作为信息和能源的载体，高速率、高效率、高集成、低能耗的新型信息、能源和生物技术中的开发应用成为该领域的前沿热点。

光学和光子学技术的发展和应用在过去的几十年里从本质上推动

了全球的发展，在医学、通讯、娱乐和文化等行业的应用彻底改变了社会。光学和光子学技术具有对未来几十年产生更大社会影响的潜力，21 世纪将在很大程度上依赖光子学，就像 20 世纪依赖电子技术来解决现代世界的挑战一样。

二、论坛简介

2019 年 7 月 21 日，“光学与光子学”科学与技术前沿论坛暨中国科学院 70 周年学术论坛在中国科学院学术会堂举行。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院信息技术科学部、学部学术与出版工作委员会承办，北京大学物理学院和《中国科学》杂志社协办，北京大学龚旗煌院士担任论坛执行主席。中国科学技术大学郭光灿院士、复旦大学金亚秋院士、中国科学院上海技术物理研究所王建宇院士、中国计量科学院李天初院士、解放军总医院顾瑛院士、中国科学院微电子研究所刘明院士、中国科学院上海光学精密机械研究所李儒新院士等参会指导，李天初院士等多位专家围绕国内外光学与光子学前沿研究领域作了精彩的学术报告，与会学者和师生 80 余人开展了深入的交流和讨论。

三、论坛的目的、重要性和必要性

光学与光子学在科学研究和国家需求两方面都具有重要的意义。其一，在科学和基础方面，孕育着重大科学突破的可能性，是诺奖的摇篮；其二，在国家重大需求方面，高精度的时间/频率标准是航空航天和军事领域提供精确导航和准确打击的关键技术，高分辨、高灵敏的光谱技术可用于高精度激光测距、量子保密通信、生化分子的灵敏探测、信息安全领域，新型超快光源、超高分辨成像光谱等关键技术，可以解决探月工程及惯性约束聚变（ICF）中高分辨光学成像及高时空分辨光学信息获取等重大领域的关键问题等。

本次论坛集合了国内相关领域的优秀专家学者，共同分享探讨了

国内外光学与光子学领域的研究进展及应用前景。参与单位包括国内多个重点研究高校、研究所，促进了国内在这一领域的积极合作，特别是基础研究与应用需求的合作，可以充分释放出科学技术对社会进步的推动力。

四、论坛报告

1. 中国计量科学院李天初院士：国际基本单位定义量子化和中国计量院的应对研究

介绍了国际单位制（SI）7个基本单位中时间单位秒（s）、长度单位米（m）的量子化变革理念，以中国计量院的研究为例说明它们的复现方法和发展趋势。简要介绍了2018年11月16日第16届国际计量大会（CGPM）通过、2019年5月20日正式实施的基本单位电流单位安培（A）、温度单位开尔文（K）、质量单位千克（kg）和物质的量单位摩尔（mol）常数化定义及其复现方法。

2. 浙江大学童利民教授：微纳光纤及其技术应用

基于高温拉伸法制备的微纳光纤由于具有原子级表面光滑度及优异的材料和几何均匀度，在所有已知亚波长尺度光波导中，具有最低光学传输损耗。同时，由于通常采用真空或空气作为包层，具有较高的纤芯-包层折射率差，微纳光纤具有强光场约束、大比例倏逝波传输、大范围可调色散、与标准光纤兼容等系列特点，使其在微纳尺度光学近场耦合、光与物质相互作用、光学传感、激光、原子光学、非线性光学等方面具有独特的优势及潜在的应用前景。报告中介绍了微纳光纤的基本光学特性及其制备与功能化技术，然后介绍其在近场耦合、光纤传感、光纤锁模激光及全光调制等方面的主要进展，以及国内外相关研究组在原子光学、非线性光学、光力学等方面的代表性研究工作，并简单讨论该方向所面临的主要挑战、可能的解决方案以及未来的发展方向。

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所贾平研究员：光学

与光子学：精密仪器装备发展不可或缺的使能技术

光学与光子学是一项在诸多领域发挥重要作用的使能技术，其对精密仪器与装备的发展产生的影响尤为深远。因为有层出不穷的光子与光子学前沿创新技术牵引，精密仪器装备领域一直保持着高速发展，但我们也要意识到传统的技术更新路线不会一直适用。例如空间光学遥感器，传统的整体式光学结构受客观因素限制即将遇到瓶颈，必须寻求薄膜成像、分块可展开成像、光学干涉合成孔径成像、在轨组装等新的技术途径。

4. 国防科技大学胡以华教授：面向群体高效电子对抗的多域匹配光电干扰方法

电子对抗是一种新兴作战方式，与陆、海、空、天战并列为重要作战手段之一。光电对抗属于电子对抗，以光波为媒介对目标实施侦察与干扰，争夺光电信息控制权。面对体系化多样化的密集部署并多波段工作的多样光电传感器目标，常规“单对单”作用体制已经难以凑效，如何以最小代价实现最大抑制群体光电传感器的工作效能，达到群体高效电子对抗之目的，成为光电对抗领域需要重点突破的难题，已引起国内外高度重视。报告中提出了多域匹配光电干扰设计思路，针对群体目标，从有源干扰和无源干扰两个方面，提出多源多域干扰方法，进而在使用时，根据战场精确侦察结果，自动形成干扰和目标之间在空、频、码、时、能域的精确定匹配，实现“多对多”的高效干扰。提出了基于多源激光的有源多域匹配干扰方法，研究了其多角度、多波长辐射对多光电传感器的合成匹配作用机理，以光电成像传感器成像质量为考核指标，讨论了其多域干扰效果及其与干扰参数之间的关系，为系统设计和应用提供理论支撑。提出了基于生物介质的无源多域匹配干扰方法，研究了生物气溶胶的多波段长时效大范围光波衰减机理，讨论了生物物质光波衰减特性建模、生物气溶胶光波衰减实验测试与优化筛选问题，外场实验和应用验证了其优势效果，这些重

要成果为发展新型无源干扰手段奠定了理论与技术基础。

5. 清华大学孙洪波教授：超快激光超精细特种制造

超快激光一般是指脉冲宽度小于 10 ps 的超短脉冲激光，与物质相互作用呈现与连续波激光和物质相互作用不同的新规律，如强烈的非线性、高度局域性，使之成为一种超精细特种制造技术，适用于各种材料，对于透明介质，可以制备三维结构。其“特”就表现在可以加工特种材料、可以实现特殊结构和特定的光、电、机械等性能。报告介绍了基于光与物质相互作用调控开展的超精细特种制造基础研究与应用的最新进展。

6. 中国科学技术大学李传锋教授：基于光的量子纠缠网络实验研究

量子纠缠网络是经典网络的升级与完善，它由量子信道和量子节点组成，信息的基本单元是量子比特。与经典网络相比，量子纠缠网络中信息的传输和存储更安全，信息处理更高效。量子纠缠网络的研究将对国家信息安全等具有重要意义。报告介绍了在构建量子纠缠网络方向的一些成果，包括：（1）实现高效的光子的固态量子存储器，构建基本量子网络。首创三明治型光子偏振态固态量子存储器，保真度达 99.9%，存储模式数达到 100，存储维度可达到 51，首次实现跨越频率、时间和空间三个自由度的复用式量子存储。量子存储器是量子中继和量子网络的重要组成部分。（2）研制出光量子模拟器，并用来研究一系列基本物理问题，包括：实现麦克斯韦妖式量子算法冷却，解决量子计算机的初始化问题；实验证实马约拉纳零模的非阿贝尔量子统计特性等。（3）发展量子纠缠等技术研究量子物理基本问题。首次实现量子环境的操控，并观察到马尔科夫到非马尔科夫环境的突变现象；观测到光的波粒叠加状态，挑战互补原理设定的传统界限。制备出高纯度的高维量子纠缠态，把量子密集编码的信道容量提升到 2.09，创造当前国际最高水平。

7. 北京大学胡小永教授：微纳结构光场调控研究

利用光学微纳结构来实现超快调控信号光场在微纳集成光子器件和超高速信息处理等领域具有重要的应用。制备出石墨烯/砷化镓异质结，利用超快时间分辨光电子显微镜实现了石墨烯/砷化镓异质结载流子超快动力学响应的实时成像研究，发现利用砷化镓掺杂能够有效调控异质结界面热电子的迁移；利用一维 Si/VO₂ 光子晶体异质结实现了一维片上集成光子拓扑绝缘体，通过改变温度调控 VO₂ 的金属-绝缘体相变，实现了热光调控一维光子晶体拓扑态。

8. 中国科学院物理研究所刘伍明研究员：激光冷却原子分子的科学与技术

激光冷却原子分子并实现玻色-爱因斯坦凝聚是 20 世纪末物理学的重大进展，近 20 年来有 4 次诺贝尔物理学奖授予了相关领域的科学家。超冷原子具有独特的量子力学波动性、宏观量子相干性以及人工可调控性。作为物理学中全新的量子物质，它已成为当前量子物理的一个重要国际前沿方向。这种量子物质形态，不仅是从宏观角度研究微观机制的不可多得的人造量子体系，而且将量子信息、量子计算、原子分子物理、光物理、凝聚态物理、统计物理、核物理、黑洞和早期宇宙等学科有机地结合起来。由于新的调控方式（例如光晶格的几何结构、维度、原子相互作用势、无序等）的存在，超冷原子理所当然地成为发现新的量子态、探讨新的调控机理以及开展量子仿真的理想的可调控的量子多体系统。报告基于磁光阱、光晶格、规范场中的冷原子分子体系，研究拓扑量子态、拓扑量子相变、强关联拓扑效应、反常量子 Hall 效应、自旋 Hall 效应、Majorana 费米子、Weyl 费米子等基本科学问题，以及原子激光、原子干涉仪、原子陀螺仪、原子芯片、空间冷原子钟、空间冷原子实验站等高新技术。

9. 中国科学技术大学陆朝阳教授：可扩展光学量子信息处理研究进展

光学量子计算所需要的非经典、非线性的量子光源是其中最关键和最具有挑战的部分，必须同时满足高纯度、高效率和高全同性。利用半导体量子点，该团队发展了脉冲共振荧光激发方法，解决了单光子源的确定性产生和高全同性这两个基本问题。进一步通过单量子点和椭圆微腔的确定性耦合，以及发展双色共振激发方法，实现了单极化、高效率，并同时具备高纯度和高全同性的单光子源。利用宽带微腔耦合的量子点，发展了同时具备高效率和高全同性的双光子纠缠源。在此基础上，演示了 20 光子输入 60×60 模式干涉线路的玻色取样量子计算，输出希尔伯特态空间维数高达 370 万亿，同时在光子数、模式数、计算复杂度和态空间这 4 个关键指标上大幅超越了之前的国际记录。利用非线性光学的参量下转换方法，先后演示了 6 光子、8 光子、10 光子和 12 光子纠缠态的制备和验证，把参量下转换技术推向了物理极限，实现了同时具备 97% 收集效率和 96% 全同性的纠缠光子源，为下一步的复用集成奠定了基础。利用多光子操纵的平台，并在理论上设计了多自由度相干操纵、单光子非破坏测量、高维贝尔态联合投影测量等方法，实现了多自由量子隐形传态和高维量子隐形传态。

10. 北京大学王剑威研究员：集成量子光学和量子信息处理应用

硅基集成光量子芯片技术，通过利用半导体微纳制造技术加工出高性能的集成量子器件，可以实现量子态制备、操控和测量，具有高稳定、强可控、易扩展等优点，被认为是实现量子计算、量子模拟、量子精密测量等应用的重要平台。介绍了硅基集成光量子芯片技术及其相关应用，具体包括：高性能集成型参量量子光源、4 光子 GHZ 真纠缠态制备与操控、8 光子态产生与制备；基于大规模集成硅光量子芯片的高维度光量子纠缠体系的高精度、普适化量子调控和量子测量，基于量子玻色取样算法的专用型光量子计算；基于芯片-芯片间偏振-路径相干转化技术的芯片-芯片间的量子纠缠分布和量子隐形传态；利用专用光量子模拟芯片对化学分子能级结构与振动、物理体系演化过

程等进行量子模拟功能演示。

五、共识与建议

与会专家指出，我国光学与光子学研究具有良好的发展基础。我国开展光学研究较早，与国际发达国家的研究水平差距相对较小。而光子学研究近十几年才引起重视，我国科学家与国际上几乎同步启动，这也有利于我国在这一领域加速追赶。

随着光子在信息应用中的重要性越来越受到重视，人们预测光学与光子学将发展成为新一代信息技术的支撑。但是目前仍有很多关键问题尚未解决，制约着光子学技术的广泛应用。例如，受光波长局限，传统光学和光子学器件在空间尺度上与电子学器件有着数量级的差距，严重影响了光电信息间的高效率交换与协同处理。目前光子学器件的信息处理和探测普遍还是基于电子学技术，从机制上仍受限于光电信息融合和交换等，解决这些问题的关键是基础研究与应用研究深度合作。

未来的发展还需要在光学与光子学的基础上开拓思路，实现融合创新，例如与材料学相结合，研究二维材料、超材料、隐身材料、飞秒激光处理等前沿技术，只有在我国原有的优势基础上不断创新，各学科交叉融合，各单位强强联手，才能让我国的光学与光子学研究和应用走到时代的最前沿。

六、与国外同领域研究的比较

光学和光电子学在经济学的许多领域中都是技术的推动者，因此世界各大国和发达经济体都在大力投入这个领域。最近十年间，光学和光子学发展迅速，充分利用新兴光学技术对于创造新兴产业和就业增长非常重要。美国为了保持在该领域的领先地位并应对各国的挑战，经过深度调研分析，在 30 余年内已经形成了 3 份纲领性指引文件，分别是 1988 年的“光子学：在信息时代保持竞争力”，1998 年的“驾驭

光：21 世纪光科学与工程学”和 2013 年的“光学和光电子学：美国关键技术”。为满足其国家战略需求和提升国家竞争力，还提出了 5 个重大挑战问题：(1) 如何发明新技术才能将光学网络容量再增大 100 倍；(2) 如何开发一种光子和电子器件的无缝集成技术；(3) 如何开发必要的光学技术来支撑平台以实现广域监视、目标识别和提高图像分辨率、高带宽自由空间通信、激光打击和导弹防御；(4) 如何实现低成本太阳能发电的可持续发展；(5) 如何开发光源和成像设备，以支撑制造业将分辨率提高一个或多个数量级等。新一轮科技革命和产业变革浪潮席卷而来，源源不断地孕育新产业、新模式、新业态，催生大众消费新格局。

我国目前也及时通过大科学计划，利用已有科技积累，吸引国内外科学家合作研究，推动光学与光子学全领域发展，这是我国在新一轮产业升级中掌握关键科学技术和发言权的关键一步。

七、特色和创新

本次论坛的特色和创新之处在于强调了基础研究和应用研究相结合，围绕当前光学与光子学的前沿领域，重点关注光学与光子学在国家战略需求和高端产业发展方面的应用。

国家战略需求方面，光学与光子学对精密仪器与装备的发展产生的影响及其深远，光学与光子学技术衍生出了光刻技术，也造就了日常使用的高分辨率显示设备和摄像设备。以光子学前沿创新技术为牵引，我国在精密仪器装备领域一直保持着高速发展，取得了多项具有自主知识产权的创新成果。光电对抗是各国国防军事发展的重点领域，光电对抗以光波为媒介对目标实施侦察与干扰，在争夺光电信息控制权方面具有重要的战略意义，光学与光子学研究则是其重要的基础支撑。

在高精尖产业发展中，超快激光与物质相互作用展现出了强烈的非线性和高度的局域性，已经发展成为一种超精细特种制造技术，该

技术适用于各种材料，对于透明介质，可以制备三维结构，可以加工特种材料，也可以实现特殊结构和特定的光、电、机械等性能。激光冷却原子具有独特的量子力学波动性，宏观量子相干性以及人工可控性，在原子激光、原子干涉仪、原子陀螺仪、原子芯片、空间冷原子钟、空间冷原子实验站等高新技术领域有着重要的应用。微纳光纤可以实现强光场约束、大比例倏逝波传输、大范围可调色散、与标准光纤兼容等，微纳光学结构可以用来实现超快调控信号光场，微纳光学的研究已经在集成光子器件和超高速信息处理等领域展现了重要的应用价值。此外，光波已经是信息领域发展的重要媒介。光学量子计算研究致力于实现高复杂度的光学量子计算实验，验证量子计算的加速能力，同时利用高品质的单光子源和纠缠光源实现可扩展的量子信息网络。基于光的量子纠缠网络中信息的传输和存储将会更安全，信息处理更高效，量子信息网络的研究对国家信息安全等具有重要意义。

（作者：龚旗煌，中国科学院院士，北京大学物理学院教授；肖云峰，北京大学物理学院教授；李洪云，北京大学物理学院高级工程师）

联系方式：中国科学院学部工作局学术与文化处，010-59358366