

基于微纳结构的新功能光电子芯片

黄翊东^{1,2,3,4,5*}, 张巍^{1,2,3,4,5}, 冯雪^{1,2,4,5}, 刘仿^{1,2,4,5}, 崔开宇^{1,2,4,5}

¹清华大学电子工程系, 北京 100084;

²清华大学量子信息前沿科学中心, 北京 100084;

³北京量子信息科学研究院, 北京 100193;

⁴北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;

⁵北京市未来芯片技术高精尖创新中心, 北京 100084

摘要 微纳结构的物理机理和独特的光电特性为探索新型光电子芯片提供了可能。回顾了本研究组在微纳结构光电子芯片领域的研究成果。总结了各种微纳结构中光与物质相互作用的机理,介绍了具有自由电子辐射、实时光谱成像、声子传感、光轨道角动量辐射、光量子态产生及操控等功能的光电子芯片。

关键词 光电子学; 微纳结构; 光子晶体; 光声晶体; 自由电子辐射; 光学轨道角动量; 量子态产生及操控

中图分类号 TN25

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1513001

1 引言

各种光电子芯片的工作原理都是基于光与物质的相互作用。通过在微纳尺度下控制物质的结构及其与光场的相互作用,可以获得不同于传统材料/结构的独特光电特性,这为实现新型光电子芯片提供了可能。光与物质之间的相互作用在本质上可以理解为各种基本粒子和准粒子之间的相互作用,微纳结构可以操控声子、表面等离基元等准粒子的特性及其与光子、电子的相互作用,这种操控作用带来的新机理、新特性促进了新功能光电子芯片的发展。微纳结构突破传统光电子芯片基于束缚电子和光场相互作用的框架,使得自由电子也成为了光电子芯片的新角色。基于纳米结构或超材料,芯片飞行电子、晶体束缚电子、光子三者相互作用的新机制为未来的光电子芯片提供了新途径。

基于微纳尺度下各种新结构中光与物质相互作用的新机理,本研究组成功研制出了一系列新型光电子芯片。

2 自由电子辐射芯片

自由电子与不同材料微纳结构的相互作用可以产生不同频段的电磁辐射,该机理在粒子探测、生物医学、电磁辐射源等领域具有重要的应用价值^[1-7]。我们将传统真空电子学与新兴的微纳光电子学相结合,聚焦微纳结构上的自由电子辐射,围绕突破产生辐射的限制条件、拓展辐射频率范围、调控辐射相位、操控自由电子的能量和空间分布以及实现全新形式的自由电子辐射器件等展开了研究。提出并验证了无阈值切伦科夫辐射(Cherenkov Radiation, CR)的机理,研制出世界上首个全片上集成自由电子光源^[8],实现了深紫外波段 Smith-Purcell 辐射(Smith-Purcell radiation, SPR)^[9],并理论研究了基于等离激元微腔的受激切伦科夫辐射^[10]。

2.1 无阈值自由电子切伦科夫辐射芯片

切伦科夫辐射是带电粒子的运动速度大于电磁波在媒质中的相速度时所产生的辐射^[11]。基于该物理现象,科学家在基本粒子和物理规律的探索中

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2200402, 2018YFB2200400, 2017YFA0303704)、国家自然科学基金(61875101, 61621064, 91750206, 617751115)、北京市基金重点项目(Z180012)、北京市科委项目(Z201100004020010)、北京市量子信息科学研究院项目(Y18G26)、北京信息科学与技术国家研究中心项目、清华大学自主科研项目

通信作者: *yidonghuang@tsinghua.edu.cn

获得了重要突破,如反质子、J 粒子、中微子振荡的发现^[1-3]。为了产生 CR,需要将带电粒子加速到极高的速度,例如,为了在水中产生 CR,电子速度需达到真空光速的 7/10 左右,对应的电子能量为 30 万电子伏特。光频段产生 CR 的最小电子能量仍需 2 万电子伏特^[4]。降低产生 CR 所需的电子能量阈值一直是未能突破的重大基础科学问题。另一方面,自由电子激光光源在基础物理、国防军事、生物医疗、信息科学等领域具有重要的应用价值^[4-7]。但自由电子光源通常需要庞大的电子加速器才能产生光频辐射,如何实现自由电子光源在芯片上的集成是器件物理的一大挑战。

我们提出借助微纳结构双曲超材料(hyperbolic metamaterial, HMM)来消除产生 CR 所需的电子速度阈值的新观点^[8]。由于 HMM 可以支持波矢非常大的电磁模式,因此当电子能量极小时,自由电子周围大波矢的消 V 逝场仍然可以耦合到 HMM 中产生 CR。我们理论研究了 HMM 中 CR 的产生条

件、辐射角度、能流方向和辐射功率谱,得到了 HMM 中产生 CR 所需的电子速度(能量)阈值的数值仿真结果:当电子能量仅为 0.1 keV 时,仍可以产生宽谱的电磁辐射,并且辐射能量输出可高达 10^{12} W/cm² 量级。实验上提出将片上电子发射源、双曲超材料和金属周期狭缝结构集成到同一芯片上产生 CR 的方案,如图 1(a)所示,并利用光刻、溅射、抬离和离子束刻蚀等半导体平面加工工艺,研制出自由电子 CR 光源芯片,其中 SEM 为扫描电镜。如图 1(b)、(c)所示,在 HMM 中,电子能量仅为 0.25~1.4 keV 时就能成功观测到 CR 输出,相比其他实验报道的产生 CR 所需的电子能量阈值降低了 2~3 个量级,验证了借助 HMM 可降低产生 CR 所需的电子速度(能量)阈值;当电极电压为 1.4 kV 时,500~900 nm 波长范围内的光的输出功率达 200 nW,高于其他微纳结构自由电子光源输出功率 2 个数量级以上^[8]。这是国际上首次观测到无阈值切伦科夫辐射现象,同时首次实现了自由电子光源在芯片上的集成。

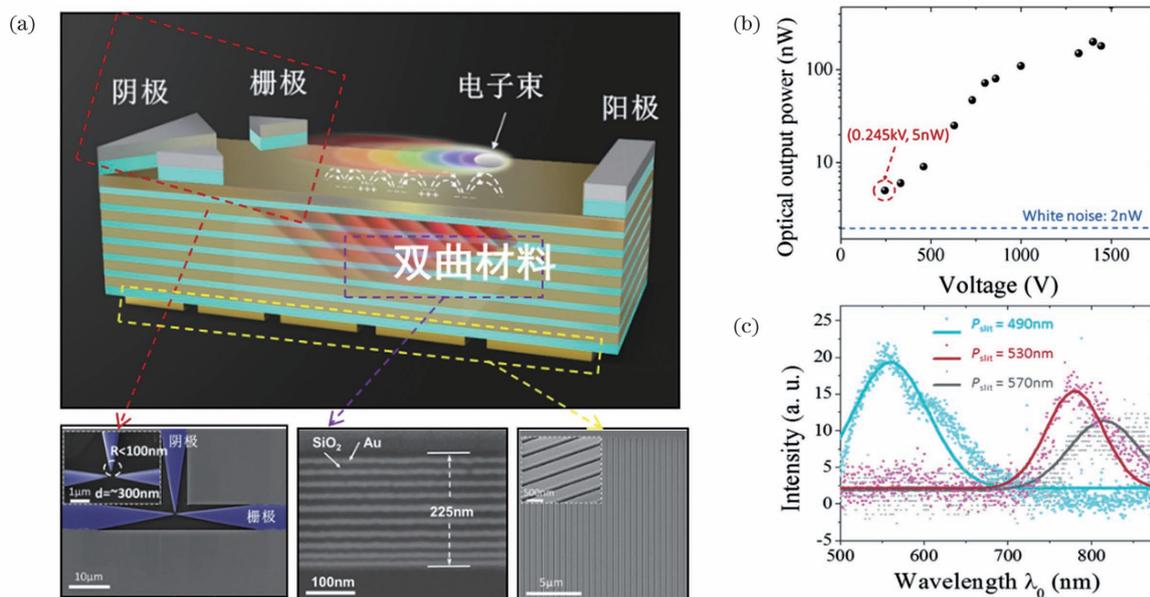


图 1 CR 芯片^[8]。(a)集成自由电子辐射芯片示意图和扫描电镜照片;辐射芯片的(b)辐射功率和(c)辐射光谱的测试结果

Fig. 1 CR chip^[8]. (a) Schematic and SEM image of integrated free-electron radiation chip; measured (b) radiation power and (c) radiation spectra of radiation chip

2.2 基于声子极化激元的切伦科夫辐射

利用基于声子极化激元的 HMM,我们进一步将自由电子 CR 的研究拓展至中远红外波段^[12]。对低能量的自由电子在六方氮化硼(hexagonal boron nitride, hBN)中产生基于双曲声子激元(hyperbolic phonon polariton, HPhP)的 CR 进行了理论研究。图 2(a)所示为低能量自由电子飞跃氮化硼表面产生的 CR。为了在金属/介质多层膜双

曲超材料中产生 CR,所需的最小电子能量受到膜层厚度的限制,而 hBN 的每一层仅为单原子层,因此作为天然 HMM 的 hBN 可以支持波矢更大的电磁模式传输,对应的产生 CR 所需的电子能量可以有更低的下限。理论计算结果表明,产生辐射所需的电子能量可以低至 $E=0.2$ eV,比目前已报道的产生 CR 所需的最低电子能量低 3 个数量级。图 2(b)所示为当频率 $\omega=800$ cm⁻¹,能量从 $E=$

1000 eV 降到 $E=1$ eV 时自由电子在 hBN 中激励的 CR 的电场分布(E_z 分量)。可以清楚地看到,能量低至 $E=1$ eV 的自由电子仍可以成功激励 CR。图 2(c) 是当频率从 $\omega=1450\text{ cm}^{-1}$ 增大到 $\omega=1600\text{ cm}^{-1}$ 时,能量 $E=1$ eV 的自由电子在 hBN 中激励的 CR 的电场分布。研究者进一步基于等效媒质理论,逆向构建了“多层膜声子超材料”,并

在偏离等效媒质理论时对 hBN 中的 CR 特征进行了仿真研究,证实了能量低至 $E=1$ eV 的自由电子可产生 CR,并且辐射功率比 $E=100$ eV 时的辐射功率高一个数量级^[12]。与在上述金属/介质多层膜 HMM 中产生 CR 所需的最低电子能量相比,理论预测在 hBN 中产生 CR 所需的电子能量小 2 个数量级。

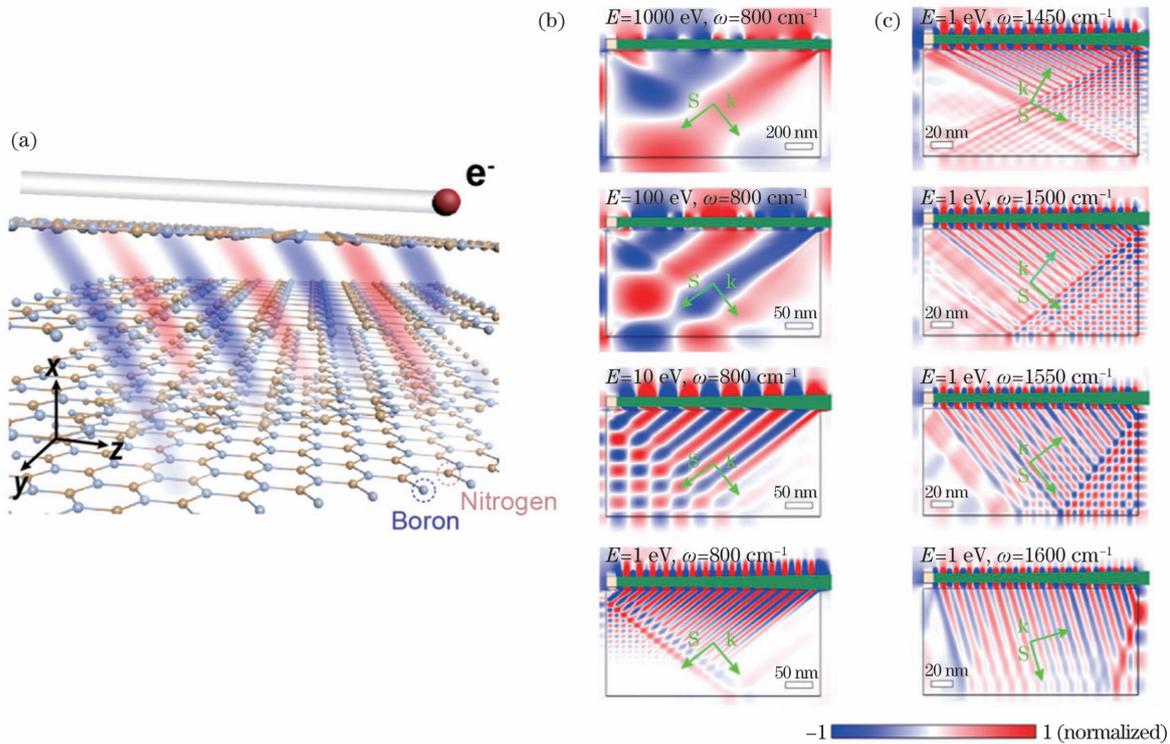


图 2 氮化硼中的无阈值 CR^[12]。(a)低能量自由电子飞跃氮化硼表面产生 CR;(b)不同能量自由电子在氮化硼中产生红外波段 CR 的模拟结果;(c)能量仅为 1 eV 的电子在不同频率下产生 CR 的模拟结果

Fig. 2 Threshold-less CR in hBN^[12]. (a) Low-energy free-electron flying on top of hBN layer for CR generation; (b) simulated results of infrared CR in hBN for different free-electron energies; (c) simulated results of CR in hBN under different frequencies for electron energy of only 1 eV

2.3 自由电子与纳米狭缝光栅相互作用产生辐射

我们还探索了自由电子与纳米狭缝光栅的相互作用,实现了波长 300 nm 以下深紫外波段的 Smith-Purcell 辐射(SPR),首次将 SPR 的频率拓展到深紫外波段,1 阶和 2 阶 SPR 谱可覆盖 240~1100 nm 的波长范围^[9]。

在理论和实验上研究了深紫外波段 SPR 产生的关键物理因素,发现紫外 SPR 强度随自由电子与光栅间距的增大而急剧减小。因此,我们提出利用纳米狭缝的二维光栅结构与自由电子的相互作用来产生深紫外辐射的方法,如图 3 所示^[9]。精确控制能量 $E=30$ keV 的电子束,使其穿过 30 nm 宽的纳米狭缝,观测到周期为 190 nm 的二维光栅产生的 1~3 阶 SPR,背向(辐射与电子飞

行方向的夹角 $\theta \approx 180^\circ$) SPR 的最短波长约为 250 nm,当光栅周期减小至 120 nm 时,2 阶背向 SPR 的最小波长约为 237 nm,这是首次测量得到波长小于 300 nm 的 SPR 输出;通过调控电子束能量(15~30 keV),SPR 输出可实现大波长范围的调控,紫外、可见光、近红外波段的波长调谐范围分别为 90,120,230 nm^[9]。

进一步,通过设计级联纳米光栅结构,极大拓展了 SPR 的输出谱宽,实现了基于级联光栅的覆盖深紫外到近红外的自由电子超宽谱辐射。如图 4 所示,实验制备了周期为 120 nm+260 nm 的级联光栅结构(光栅总长度约为 4 μm),在动能为 30 keV 的电子束作用下,实际观测到 1 阶和 2 阶 SPR 的辐射谱可覆盖 240~1100 nm 波段;如果考虑到前向

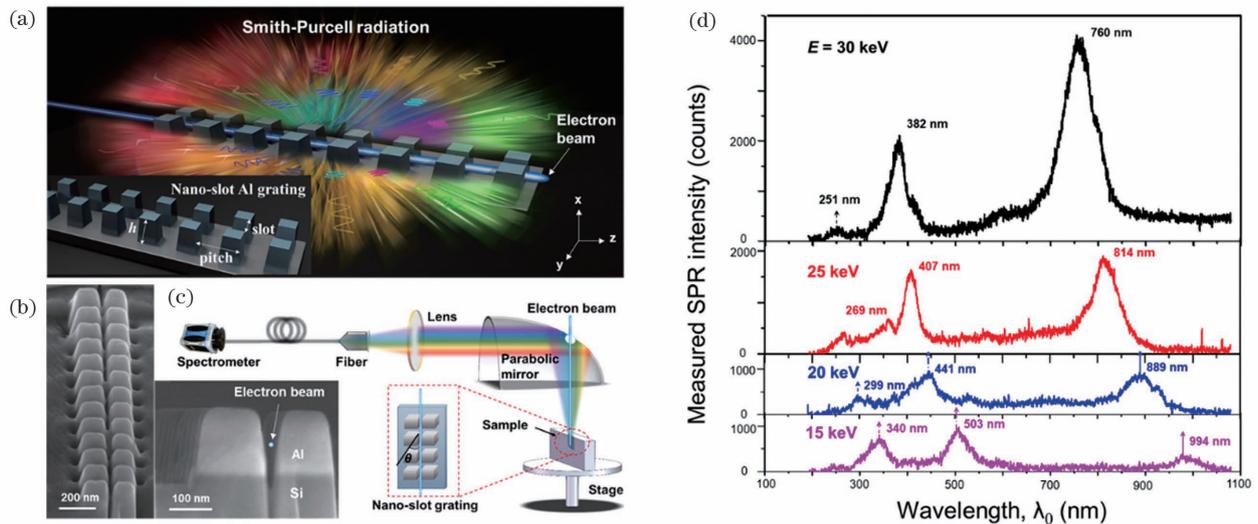


图3 自由电子与纳米狭缝光栅相互作用产生辐射^[9]。(a)自由电子与光栅相互作用示意图;(b)纳米狭缝光栅 SEM 照片;(c)实验测试系统;(d)实验测试 SPR 的结果

Fig. 3 Interaction between free-electrons and nano-slot grating for radiation generation^[9]. (a) Schematic of interaction between free-electrons and grating; (b) SEM images of nano-slot grating; (c) experimental test system; (d) experimental test results of SPR

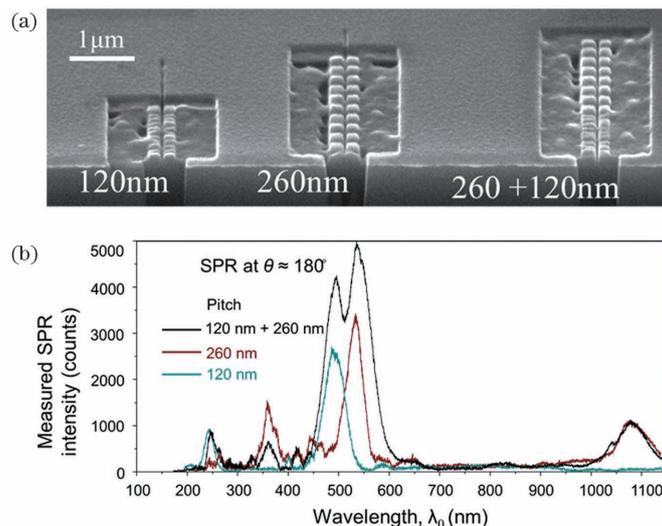


图4 级联纳米狭缝光栅 SPR 的测试结果^[9]。(a)级联纳米狭缝光栅 SEM 照片;(b)实验测试的辐射输出结果

Fig. 4 Test results of cascaded nano-slot grating SPR^[9]. (a) SEM image of cascaded nano-slot grating; (b) output radiation results from experimental measurement

SPR, 辐射谱范围可达 3 个倍频程, 覆盖 120 ~ 1100 nm 的波长范围^[9]。

2.4 基于表面等离子激元微腔的受激切伦科夫辐射

我们理论研究了基于表面等离子激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 的受激切伦科夫辐射 (stimulated Cherenkov radiation, SCR) 的物理机制^[10], 这是自由电子激励下 SPP 受激 CR 的理论研究。如图 5 所示, 自由电子飞越金属 SPP 腔的表面

可以激励金属 SPP 模式, SPP 模式与自由电子束相互持续作用, 电子的能量被调制并产生电子空间群聚, 最终产生 SCR。仿真得到受激前后的 CR 输出光谱, 中心频率为 851 THz (波长 $\lambda_0 \approx 353$ nm), 受激辐射后辐射谱宽被显著压窄, 功率密度高达 $30 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ 。通过调控自由电子的能量, 可以改变自由电子周围消逝场与 SPP 模式色散曲线的交点, 在深紫外波段实现受激辐射频率的灵活调控^[10]。

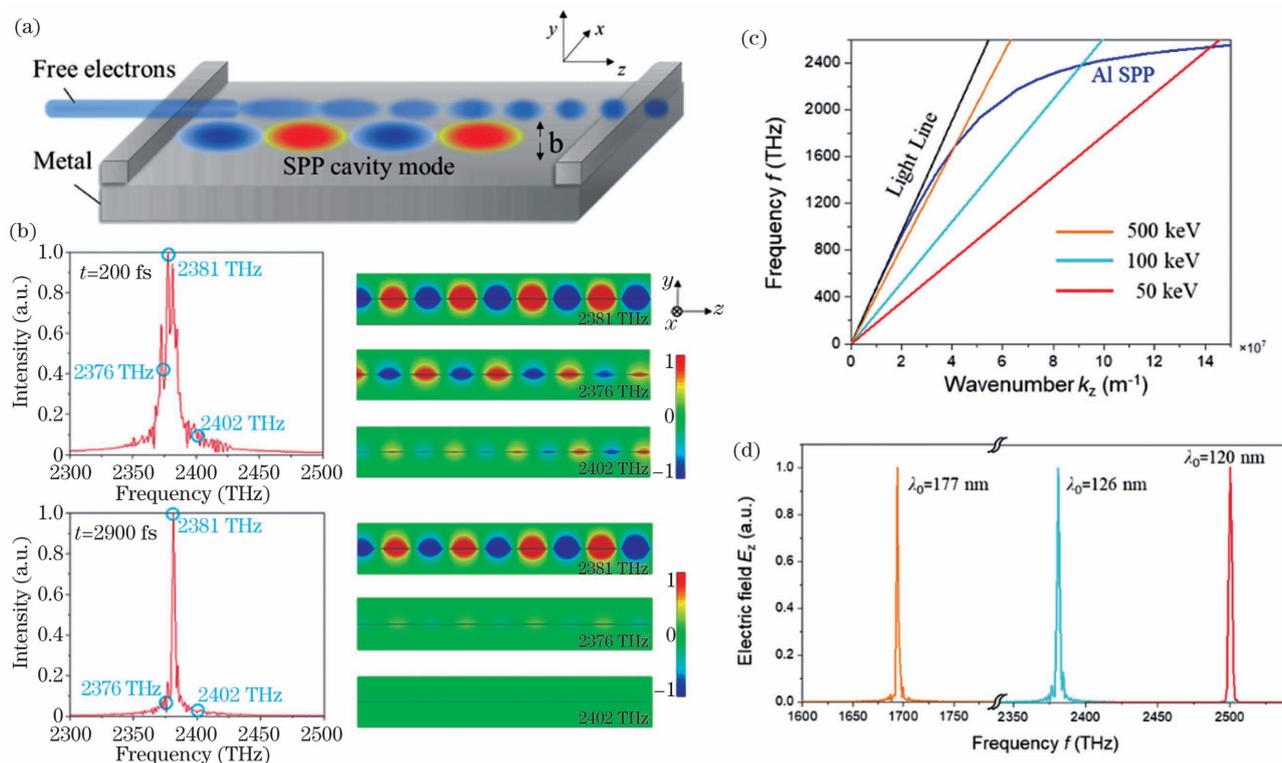


图5 基于SPP微腔的受激切伦科夫辐射的理论研究^[10]。(a)结构示意图;(b)模拟仿真结果;(c)SPP模式和自由电子周围消逝场的色散关系;(d)不同电子能量下的激光波长

Fig. 5 Theoretical investigation of stimulated Cherenkov radiation based on SPP micro-cavity^[10]. (a) Structural diagram; (b) simulated results; (c) dispersion relation of SPP mode and evanescent wave surrounding electron beam; (d) emission wavelengths under different electron energies

3 光/声精密测量芯片

光子和声子是重要的信息载体,利用微纳周期结构对光子和声子进行有效调控和精密测量,可以实现多维度信息感知和多种物理量的精密测量。我们提出并研制成功了基于超表面宽带滤波的世界首创CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)实时光谱成像芯片,通过纳米臂光声晶体微腔实现了高频率的声子激射,研制出基于光声弹簧效应的新型折射率传感芯片。

3.1 实时光谱成像芯片

作为物质指纹的光谱是人类认识世界的重要工具,光谱分析是智能化社会诸多应用场景不可或缺的关键技术。然而,传统的光谱仪基于传统棱镜色散、光栅衍射或干涉原理,需要精密的器件和足够的光程来将不同波长的光分开,不仅体积庞大且价格昂贵,极大制约了光谱仪器的应用。作为新一代的光谱分析技术,光谱成像可以获得视野内所有点的光谱信息,在环境监测、资源勘查、精细农业、军事侦察等各个领域具有不可替代的作用。然

而,目前的光谱成像需要通过空间或时间扫描的方式来实现,无法实时、动态地对目标进行光谱成像。迄今为止,尚无一次获得空间上不同点光谱的光谱成像技术。

针对光谱成像芯片化的研究目标,我们提出并研制成功了基于超表面阵列的高精度光谱成像芯片^[13],通过超表面实现光场的有效调控,即通过设计超表面结构实现入射光光谱的宽带波长调制,将入射光的光谱信息编码到图像传感器不同位置处的响应上,然后通过算法恢复出入射光光谱。该技术可以用少量的超表面结构恢复出多个波长点的光谱信息,从而实现高精度、大谱宽的实时光谱成像芯片。在实验上,我们将6336个微型光谱仪成功集成在一个CMOS图像传感器上(图6),一次拍照得到一幅完整的光谱图像(图7),即可以一次获得空间上不同点的光谱信息;每个微型光谱仪都具有独立的光谱分析功能,工作谱宽为450~750 nm,单色光谱恢复的中心波长偏差小于0.1 nm,光谱分辨率为0.8 nm。本光谱成像芯片是世界首款可量产的硅基微型光谱成像芯片,实现了从微型光谱仪到

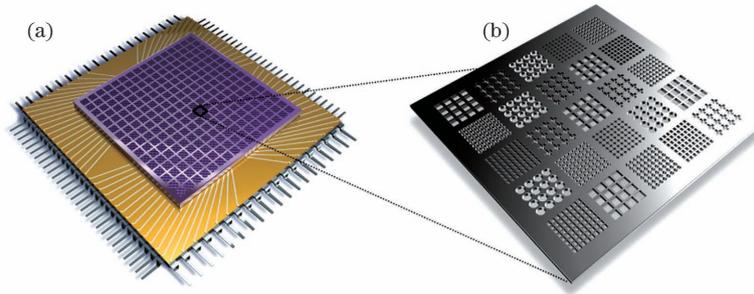


图6 光谱成像芯片及单个微型光谱仪示意图^[13]。(a)多个微型光谱仪集成的光谱成像芯片;(b)单个微型光谱仪的超表面结构

Fig. 6 Spectral imaging chip and single micro-spectrometer^[13]. (a)Spectral imaging chip including integrated several micro-spectrometers; (b) metasurface structure for a micro-spectrometer

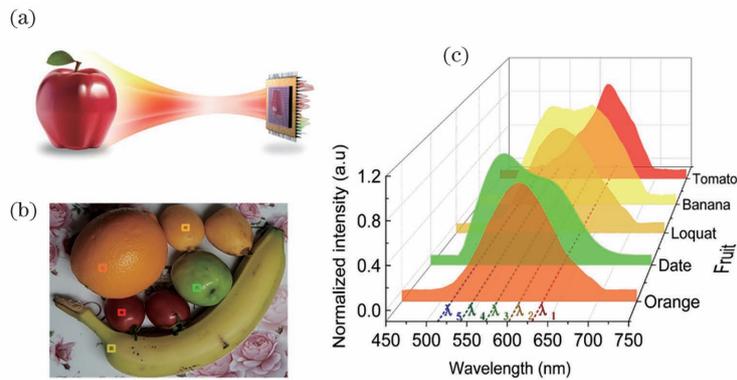


图7 快照式光谱成像^[13]。(a)快照式光谱成像示意图;(b)光谱成像的拍摄目标;(c)光谱数据展示

Fig. 7 Snapshot spectral imaging^[13]. (a) Schematic of snapshot spectral imaging; (b) shooting target for spectral imaging; (c) demonstration of spectral data

光谱成像芯片的跨越,可用于军事侦查、卫星遥感、消费电子、环保监测、机器视觉、医疗诊断等领域。高精度、可量产的特点使得该芯片可获得各个领域实时的光谱大数据,为构建未来的“智能光谱云”提供可能。

3.2 纳米臂光声晶体微腔

利用光声晶体微腔可以同时局域和调控光子、声子并操控其相互作用过程,从而将介观/宏观尺度的片上系统致冷到量子基态,即不含声子的“超冷”真空态。传统的 Doppler 激光冷却方案仅能实现单个原子的量子基态,光声晶体微腔为实现片上系统的量子基态提供了可能,是迄今为止唯一的片上量子基态实现方案,必将引起量子控制、精密测量、量子信息领域的革命性飞跃。

我们提出了异质光声晶体(图8),即在纳米悬臂上设计两种周期结构,分别调控光子和声子能带,解决同一周期结构无法同时优化光子和声子能带的瓶颈问题。光声晶体微腔的声子频率被提高到 5.88 GHz,光声耦合系数为 1.31 MHz^[14]。

光声晶体微腔的原理性验证测试采用消逝场

光纤垂直耦合的方法,该方法无法应用于实用的集成芯片上。为了推进器件层面的应用,我们提出了集成纳米臂波导耦合的渐变孔光声晶体微腔^[15],如图9所示。不同于消逝场光纤垂直耦合的方法,这种集成端面耦合波导的光声晶体微腔可以有效避免非集成、动态耦合给微腔带来的扰动。在此基础上实现了频率为 6.22 GHz 的声子激光,激光后的声子线宽由 3.2 MHz 压缩至 5.4 kHz。光声纳臂微腔的器件长度仅为 10 μm ,激光阈值低至 0.5 mW^[16]。

3.3 光声晶体折射率传感芯片

折射率传感在许多领域都发挥着不可替代的作用。我们提出了一种基于硅材料的折射率传感新方法,即通过引入对声学振动的监测,将折射率变化引起的光学谐振波长的变化转换为声学频率的变化,同时利用腔内的光辐射压增强声学振动,大大提高了折射率的传感灵敏度。

我们设计和实现的光声微腔采用基于硅纳米悬臂的一维光声晶体微腔结构,该结构在支持光通信波段高Q值光学谐振模式的同时,还支持一个高频

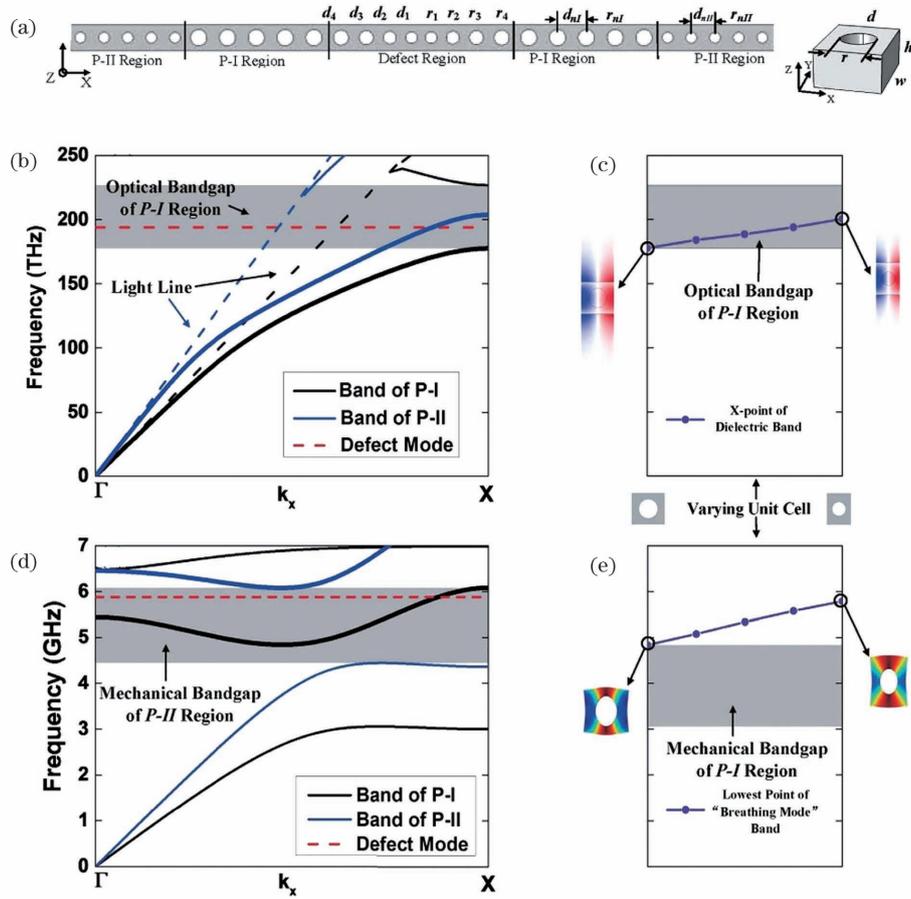


图8 纳米臂异质光声晶体微腔^[14]。(a)光声晶体微腔平面图;(b)光学周期结构能带图;(c)介质能带在X点的频率随周期结构尺寸的变化;(d)声学周期结构能带图;(e)呼吸能带最低点随周期尺寸的变化

Fig. 8 Nano-beam micro-cavity based on hetero opto-mechanical crystals^[14]. (a) Plan-view schematic of opto-mechanical crystal micro-cavity; (b) optical energy band in periodic region; (c) frequency variation of X point of dielectric bands with unit cell size; (d) mechanical energy band in periodic region; (e) frequency variation of lowest point of breathing-mode bands with unit cell size

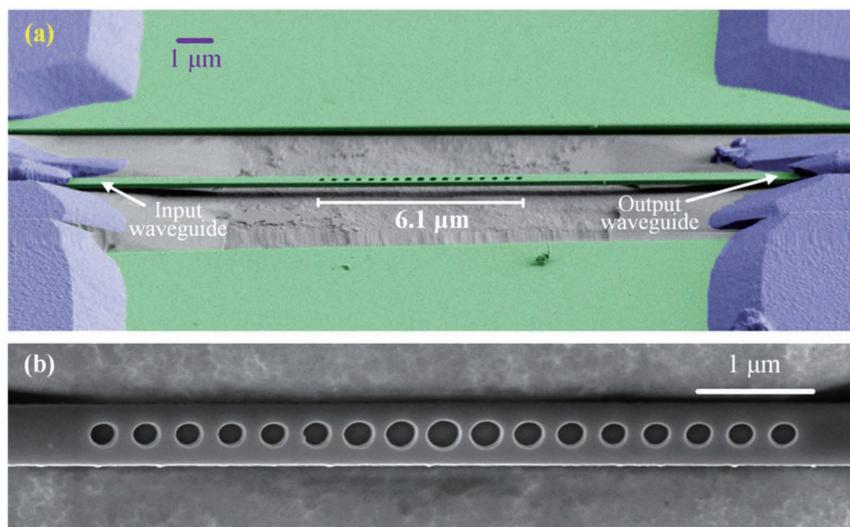


图9 波导耦合的纳米臂光声晶体微腔^[15]。(a)微腔的伪彩侧视图;(b)微腔的俯视电镜图

Fig. 9 Waveguide-coupled nano-beam micro-cavity based on opto-mechanical crystals^[15]. (a) Pseudo-colored side-view of micro-cavity; (b) top-view SEM image of micro-cavity

高 Q 值的声学振动模式,其谐振频率为 4.36 GHz,声学 Q 值为 18300。实验表明,该结构中高质量的光学和声学振动模式易于产生光弹簧效应,使得声子谱线宽得到进一步压窄,这一效应可用于探测微腔周边环境折射率的微小变化。理论分析表明,利用基于光弹簧效应的传感方法,结合我们高声学 Q

值硅纳米臂微腔的独特性质,可以实现 10^{-7} ^[17] 的超高传感分辨率(图 10)。这一实验结果比传统的硅基光子器件高一个数量级以上,并且可以实现传感功能的芯片集成,为实现高灵敏度折射率传感器件提供了新的结构和思路。

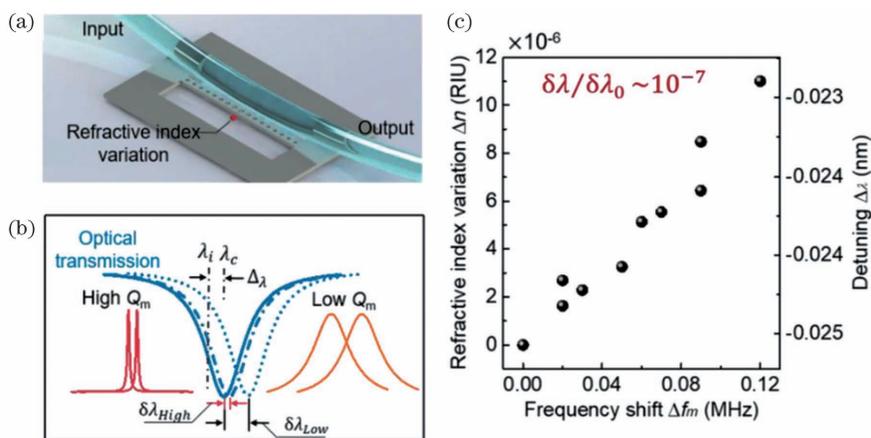


图 10 光声晶体折射率传感芯片^[17]。(a)纳米颗粒导致微腔附近折射率发生变化;(b)不同声学 Q 值下的折射率传感机制;(c)折射率和失谐变化情况下声学频率的变化

Fig. 10 Refractive index sensing chip based on opto-mechanical crystals^[17]. (a) Variation of refractive index near micro-cavity induced by nano-particles; (b) refractive index sensing mechanisms under different mechanical Q values; (c) refractive index variation and corresponding detuning versus frequency shift

4 光学轨道角动量辐射和接收芯片

人们很早就认识到每个光子能够携带线动量 (Linear Momentum),并且圆偏振光波还可以携带自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM),这是光子的基本属性。然而,直到 1992 年,Allen 等^[18]才发现具有角向相位分布的光波携带有轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM)。在过去的二十年中,关于光学轨道角动量的基础研究和应用取得了相当大的进展。但是,利用传统光学器件产生光学轨道角动量的方式存在体积大、系统复杂、响应速度慢和调节范围有限等问题。我们在相关领域开展研究,研制出具有动态轨道角动量辐射、自由电子轨道角动量辐射以及轨道角动量探测和分类功能的新型光电芯片。

4.1 硅基集成动态角动量辐射芯片

利用不同阶次 OAM 光束之间的正交性,我们提出了利用硅基光学微环构成高速轨道角动量 (OAM) 动态编码/解码器,在同一波长利用不同阶次的 OAM 进行信息编码和解码,并在集成芯片上通过 OAM 编码实现了高速无线光通信,无需其他复杂的技术,这种方法可应用于现有的光互连构架

中^[19]。这是世界上首次将 OAM 编码成功应用于片上无线光互连。在理论工作的基础上,我们基于 SOI (Silicon on Insulator) 制备了可动态调控的 OAM 发射芯片。如图 11(a)所示,发射芯片中包含一个传输波导和一个带有 16 个末端的光栅结构的下载波导的微环腔。微环谐振腔中的本征模式是所谓的“回音壁模式”,在方位角方向天然存在相位梯度。通过微环腔中均匀分布的下载波导,对环腔中谐振波长的光波在空间上进行均匀采样,从而产生与下载波导数目以及回音壁模式阶次相关的特定相位分布,即产生了携带 OAM 的光束。进一步,再通过下载波导末端的光栅,将微环腔中的光波散射到自由空间中,光波呈 OAM 辐射模式^[20]。图 11(b)、(c)给出了从上方拍摄的所制芯片的扫描电镜显微照片,在微环腔上方制作了一个环形热电极,利用热光效应对回音壁模式的阶次进行调节。

我们将工作波长选在 1550 nm 附近,并研究了该器件的动态特性。通过不断增加热电极的驱动电压,逐渐升高微环腔的局部温度。与此同时,回音壁模式的阶数和生成的涡旋光的拓扑荷数增大,实验和仿真结果如图 12 所示。干涉条纹的数量和螺旋方向显示了 OAM 阶次的大小和正负。可以看到,

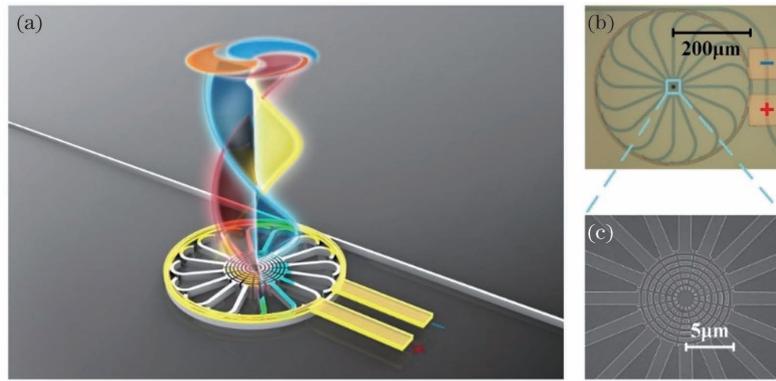


图 11 基于 SOI 的集成光 OAM 发射器^[20]。(a)结构示意图;(b)制备的样品照片;(c)“蛛网”形状光栅结构的放大照片

Fig. 11 Integrated OAM emitter based on SOI^[20]. (a) Structural diagram; (b) picture of prepared sample; (c) amplified picture of “cobweb” grating

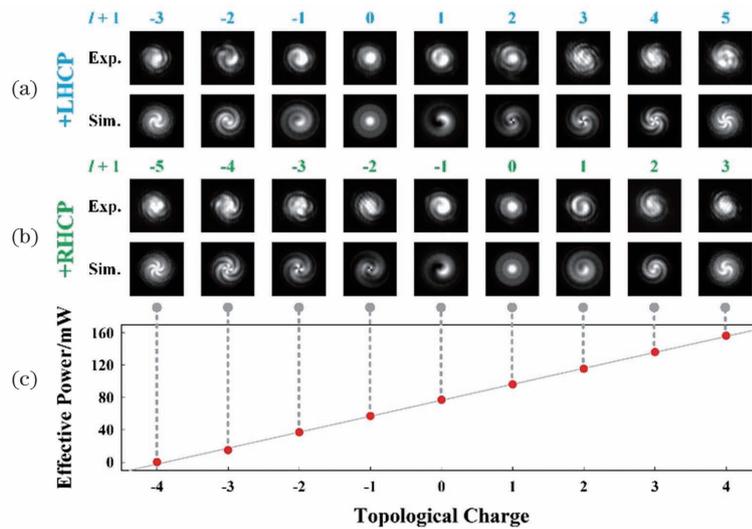


图 12 集成 OAM 发射器的动态特性^[20]。(a)左旋圆偏振光的实验和仿真结果;(b)右旋偏振光的实验和仿真结果;(c)调控功率与拓扑荷数的关系

Fig. 12 Dynamic characteristics of integrated OAM emitter^[20]. (a) Results of simulation and experiment for left-hand circular polarization (LHCP); (b) results of simulation and experiment for right-hand circular polarization (RHCP); (c) switching power versus topological charge

这里仅需要 0.4% 的最大调制比就可以动态调节出 9 个不同阶次 ($l = -4 \sim 4$) 的 OAM 光模式。同时,实验结果表明,OAM 的阶次与驱动功率呈线性关系,每两个相邻模式间的切换所需的驱动功率约为 20 mW。传统利用空间光调制器产生 OAM 模式的方法,其切换频率只有 50~100 Hz。与之相比,我

们提出的硅基微环加热光调控器件的调控频率可达 10~15 kHz,提高效果显著^[20];并且我们实现了 9 个不同阶次的调控范围,是已有报道中最高的。近期,我们将下载波导的数目增加到 32,发射器发射的 OAM 模式的阶次进一步增加到了 21 个阶次 ($l = -10 \sim 10$),图 13 给出了实验测试的模式干涉图样。

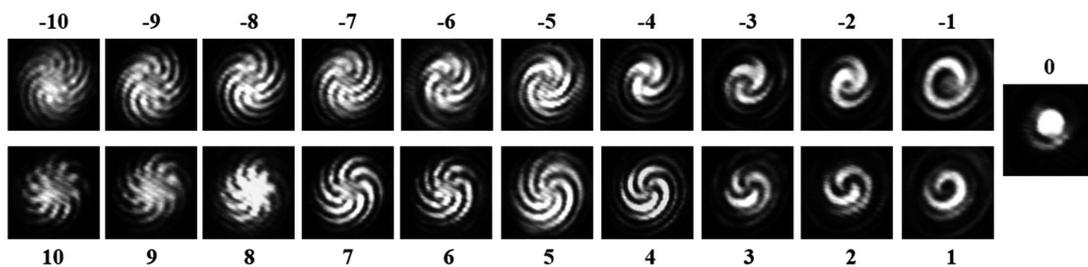


图 13 带有 32 个下载波导的 OAM 发射器辐射模式的干涉图样

Fig. 13 Interference patterns of radiation mode from OAM emitter with 32 download waveguides

4.2 自由电子角动量辐射芯片

在已有的利用自由电子产生 OAM 光束的研究中,极高的电子能量和复杂的立体结构使得自由电子 OAM 光源难以小型化、集成化。我们提出了利用周期群聚的自由电子与全息光栅的相互作用产生涡旋 SPR(即携带 OAM 的 SPR)的可集成新方法,如图 14 所示。研究了自由电子产生涡旋 SPR 的物理机制,即利用消逝平面波(参考光)和涡旋光束(物光)干涉形成全息光栅,进而周期群聚自由电子周围的消逝场经全息光栅衍射,还原生成涡旋 SPR 光束。利用粒子云网格-时域有限差分算法进行模拟

仿真,获得了不同频段(微波、太赫兹、红外、可见光和紫外波段)、不同电子能量(31~0.64 keV)激励的涡旋 SPR,产生辐射所需的电子能量较低和平面化的光栅结构为自由电子涡旋 SPR 光源的小型化和集成化提供了可能。通过设计不同的全息光栅结构,产生了不同拓扑荷数($l=1, 2, 3, 4, 10$)的单模 OAM 辐射以及多模式混合的涡旋 SPR,并证明了涡旋 SPR 辐射频率和辐射角满足传统 SPR 的辐射公式。仿真发现高阶 SPR(阶次 $m > 1$)的 OAM 模式拓扑荷数加倍的现象,同时利用惠更斯原理阐述了其机理^[21]。

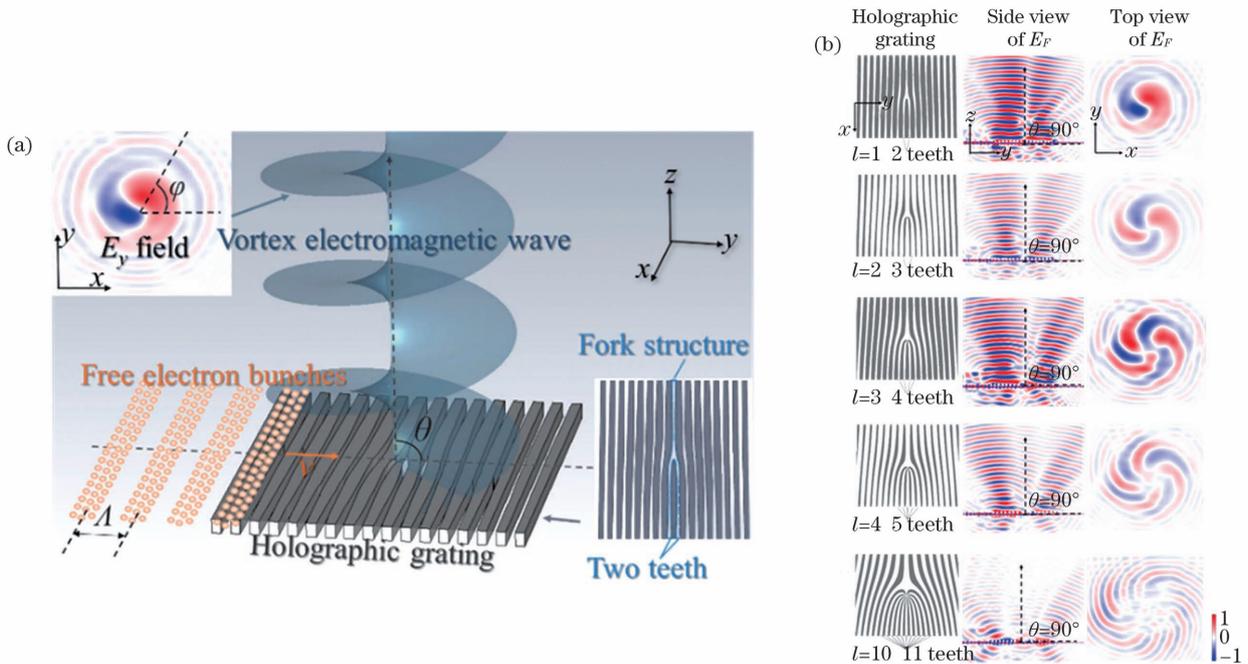


图 14 涡旋 SPR 产生示意图和仿真结果^[21]。(a)周期群聚的自由电子与全息光栅作用产生涡旋 SPR;(b)不同阶次涡旋 SPR 的模拟仿真结果

Fig. 14 Schematic of vortex SPR generation and simulated results^[21]. (a) SPR generation via interaction between periodic-grouping free electrons with holographic grating; (b) simulated results of vortex SPR with different topological charges

4.3 带有相位调制的复合光学角动量分束芯片

我们还开展了 OAM 接收器和分束器的研究工作。提出并实现了一种带有相位调制的复合光学角

动量分束芯片,该芯片可以同时区分入射光束携带的自旋角动量和轨道角动量^[22]。如图 15 所示,角动量分束器由一组随空间位置变化的 Λ 形金属纳

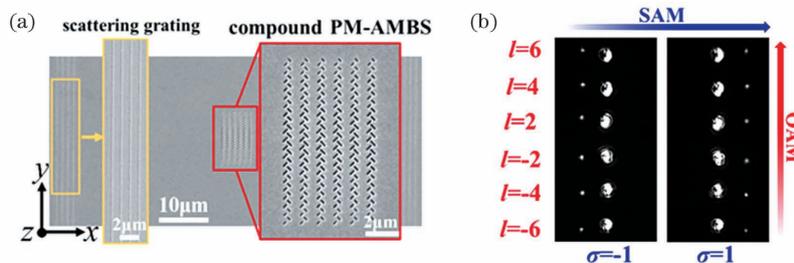


图 15 带有相位调制的复合光学角动量分束器^[22]。(a)样品照片;(b)分束实验结果

Fig. 15 Compound angular momentum beam splitter with phase modulation^[22]. (a) Picture of sample; (b) experimental result of beam splitting

米狭缝阵列组成。

携带着 SAM 和 OAM 的光束从金属薄膜的背面入射并聚焦在器件的上表面,该分束器可以根据入射光中所携带的角动量,将空间光束耦合成为沿不同方向传输的金属表面模式。器件中采用了 Δ 形金属纳米狭缝,由于 SPP 模式具有横磁(TM)偏振特性,利用两条狭缝上的 SPP 模式耦合可将携带有不同 SAM 的光束分别耦合到狭缝的两侧;进一步,狭缝构成的光栅结构会与入射光束携带的 OAM 发生相互作用,从而根据 OAM 光束本身具有的相位梯度,将光束散射到特定方向;同时,在 Δ 形金属纳米狭缝阵列中,位置不同的狭缝尺寸不同,这会在耦合的金属表面模式中引入相位调制,通过控制这个相位调制,可以进一步将入射光束耦合成为沿着直线传播、近似不发散的 SPP 光束——局域余弦高斯光束(LCGB),从而有效地提高模式区分度。实验中观测到携带有不同 SAM 的光束被耦合到器件两侧,消光比大于 10。OAM 光可被耦合到不同的偏转角度,阶次间隔为 2 的 OAM 入射光被耦合为 LCGB,且传输 $30\ \mu\text{m}$ 后分束间隔大于 $1.1\ \mu\text{m}$,相比以往器件只能单独区分光束携带的 SAM 或者 OAM,我们首次实现了能够同时区分 SAM 和 OAM 的器件^[22]。

5 光子量子态产生、操控和探测芯片

光子理想的飞行量子比特。以光子作为量子信息载体的光子量子信息技术具有原理清晰、便于实现的特点,是量子信息科学与技术领域的重要分支。光子量子信息系统包含量子态的产生、操控和探测等功能。实现上述功能的芯片集成是光子量子信息技术创

新发展的关键。我们从 2010 年开始了光子量子芯片的研究,在硅基光子芯片上实现了光子量子态的产生、操控和探测,并将其应用于量子通信和量子成像。

5.1 光子量子态产生芯片

硅光子量子芯片上产生双光子量子态的机理是基于硅波导中的自发四波混频。在这个三阶参量非线性光学过程中,两个泵浦光子湮灭,同时产生一对信号/闲频光子。由于该过程满足能量守恒和动量守恒,信号/闲频光子间具有强烈的量子关联特性。自发四波混频作为量子光源时最初采用的是石英光纤。很快人们发现,与石英光纤相比,单模硅波导的三阶非线性系数高 5 个量级,仅需毫米量级的波导即可实现量子光源功能,支持芯片集成。另一方面,硅的自发拉曼散射谱很窄且便于滤除,因此硅波导量子光源噪声低且支持室温工作。这些特点使得硅波导成为自发四波混频的理想媒质。

我们在 2010 年采用自主制备的单模硅波导,实现了光通信波段关联双光子态的产生,这是国内首个硅波导量子光源的实验报道^[23]。利用图 16(a)所示的硅微环腔的光场增强,可以将非线性光学效应集中在微腔内部,极大减少泵浦光产生的噪声光子,因此研究重点在硅微环腔上。我们系统研究了硅微环腔中非线性损耗对双光子产生率的影响,理论指出并实验论证了其微腔 Q 值的 7 次方成正比^[24]。为了进一步拓展硅微环腔量子光源的功能,我们还将硅微环腔引入到保偏光纤环路中,在硅微环腔双方向上产生了关联双光子态,其在保偏光纤环路输出端实现了相干叠加,从而实现了偏振/能量-时间超纠缠双光子态^[25]。将硅微环腔引入到光纤 Sagnac 环路中,利用光纤环路中双向产生的关联双

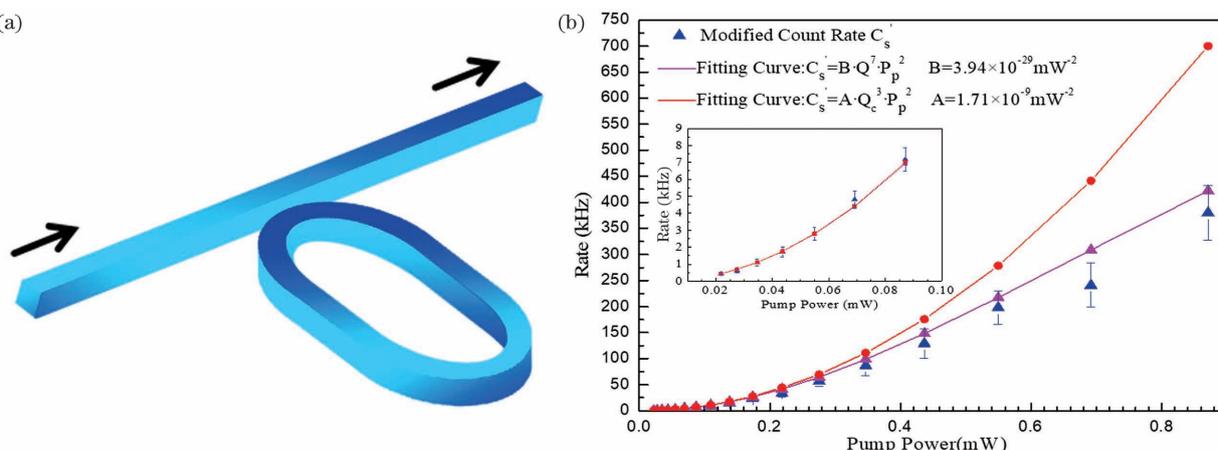


图 16 硅微环腔中的关联双光子态产生^[24]。(a)硅微环腔示意图;(b)硅微环腔的关联光子产生率随泵浦功率的变化

Fig. 16 Correlated photon pair generation in silicon micro-ring resonator^[24]. (a) Schematic of silicon micro-ring resonator; (b) photon pair generation rate in silicon micro-ring resonator versus pump power

光子态间的量子干涉,实现了频率/能量-时间超纠缠双光子态^[26]。这些工作表明,硅微环腔配合辅助光路可以实现复杂光量子态的产生,是实现芯片集成量子光源的有效途径。

5.2 芯片上光量子态的操控和探测

在芯片上实现光量子态操控的手段是量子干涉,测量则基于单光子探测。因此,全功能集成的光量子芯片应包含量子光源阵列、光学干涉仪阵列和单光子探测器阵列三部分。

通过将量子光源阵列和光学干涉仪结构集成到硅光量子芯片上,可以实现复杂光量子态的产生和操控。我们实现了输出两个偏振纠缠贝尔态的量子光源芯片^[27]。在该芯片中,利用四条长单模硅波导中非简并泵浦的自发四波混频,产生高质量的双光子量子态;通过双光子量子干涉对光子量子态进行变换,实现路径纠缠态;通过两个二维偏振合波光

栅,实现路径自由度向偏振自由度的转换,从而实现偏振纠缠态的产生。产生的光子对不但偏振纠缠而且频率简并,可以被贝尔态测量装置(BSM)区分。同时,芯片上的光学干涉结构具备热光相位调控功能,这使得输出双光子量子态在两个偏振纠缠贝尔态之间可动态调控,频率达到 10 kHz 量级。另一方面,为了避免量子光源阵列的泵浦光在传输波导和光学干涉仪阵列中引入噪声光子,我们提出了一种集成硅光量子芯片的新方案^[28]。该方案的原理示意图如图 17 (a)所示,在芯片上采用条形波导作为量子光源的非线性媒质,采用浅脊波导实现量子光源外泵浦光的传输和量子态的操控。利用两种波导色散不同导致的自发四波混频光子流密度谱差别,可降低泵浦光在量子光源外传播时产生的噪声光子影响。该方案大大简化了芯片的设计,特别适用于大规模复杂功能硅光量子芯片的研发。

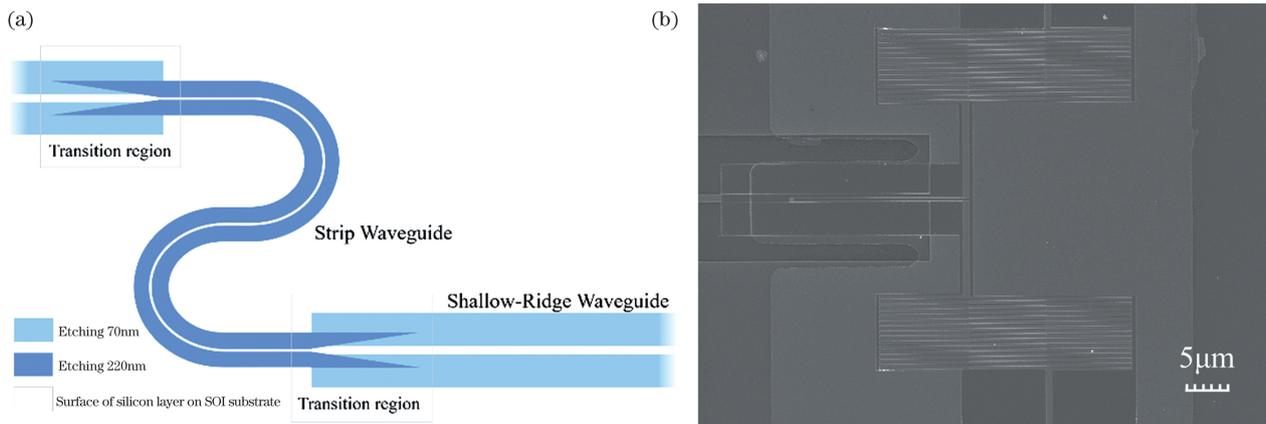


图 17 硅光量子芯片的关键功能实现^[29]。(a)硅光量子芯片方案示意图;(b)硅浅脊波导集成的超导纳米线单光子探测器样品 SEM 照片

Fig. 17 Realization of crucial functions of silicon quantum photonic chip^[29]. (a) Schematic of silicon quantum photonic chip; (b) SEM image of silicon shallow-ridge waveguide integrated superconducting nanowire single photon detector

在片上单光子探测方面,我们与中国科学院上海微系统与信息技术研究所合作,实现了硅浅脊波导集成的超导纳米线单光子探测器^[29]。我们突破了硅光子器件和超导纳米线器件混合集成的难点,发展出了完整的制备工艺,成功制备出器件样品,SEM 照片如图 17(b)所示。测试表明,器件系统整体的单光子探测效率为 3.1%,片上探测效率达到 18.5%。暗计数低达 2.1 /s,时间抖动为 93.1 ps^[29]。我们在硅光量子芯片上全面实现了光量子态产生、操控和探测,发展这些功能的综合集成技术是我们未来工作的重点。

5.3 硅光量子芯片的应用

光量子芯片的发展与系统应用密不可分,芯片

的价值需要通过实际应用体现。我们在发展硅光量子芯片核心技术的同时,重视芯片的应用,力图通过器件创新推动量子通信和量子成像的发展。

我们将硅波导量子光源用于时域量子鬼成像。基本思想是利用光纤长距离分配硅波导量子光源产生的宽带频率关联光子对,在两端利用空间色散和时间色散,将频率关联转化为光子照射位置-光子到达时间之间的关联,从而利用时间分辨符合计数测量实现一维时域量子鬼成像。二维图像则可以像传真机一样通过步进成像实现。实验系统示意图如图 18(a)所示,图 18(b)是典型的实验结果。实验中光纤长度达到 50 km,论证了这一时域量子鬼成像方案的光纤长距离实现^[30]。进一步,我们将此方案

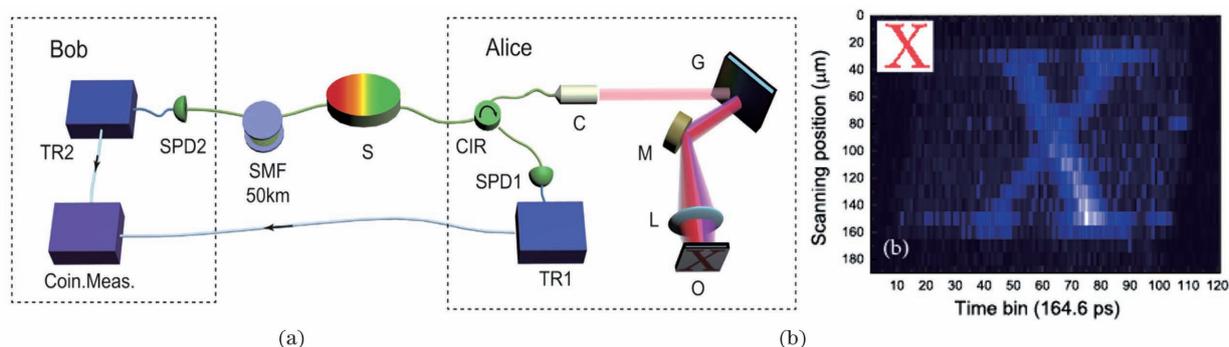


图 18 基于硅波导量子光源的时域量子鬼成像^[30]。(a)实验系统示意图;(b)典型的实验结果

Fig. 18 Temporal quantum ghost imaging realized by silicon-waveguide quantum light source^[30]. (a) Schematic of experimental setup; (b) typical experimental result

与量子密钥分发的安全检测机制结合,提出并实验论证了可以通过光纤长距离实现的量子安全鬼成像,实现了图像信息的量子安全传送^[31]。

我们还将硅波导量子光源用于发展大用户规模的量子密钥分发网络。量子密钥分发是保障未来社会信息安全的重要技术,简单高效地实现多用户组网是该技术应用于通信网络的关键。我们利用硅波导量子光源产生了宽带时间能量纠缠光子对,通过波分复用和基于多端口被动分束器的空分复用技术实现了多用户之间的全连通纠缠分发。产生的宽谱纠缠光子对被分为 15 对频率共轭的纠缠资源,其中 5 对纠缠资源分别通过多端口分束器支持 5 个 8 用户全连通子网,其余纠缠资源用于子网之间的连接。最终,利用一个硅波导量子光源实现了 40 个用户两两之间总共 780 个量子密钥分发线路,形成了大规模全连通网络^[32]。

6 结束语

回顾了本研究组在新功能光电子芯片领域的研究进展。在微纳结构中,光与物质相互作用新机理的研究取得了突破,研制出了双曲超材料、光子晶体超表面、悬臂梁光声晶体微腔、末端光栅结构下载波导微环腔、金属纳米狭缝阵列、纳米硅线波导/微腔等新型微纳结构,引入了自由电子、声子和表面等离子元,实现了具有自由电子辐射、实时光谱成像、声子激射传感、轨道角动量发射/分束/接收以及量子态产生/操控等一系列新功能的光电芯片。目前,部分芯片正处于产业化阶段,期待在不久的将来走向实用。

参 考 文 献

[1] Aubert J J, Becker U, Biggs P J, et al. Experimental observation of a heavy particle J[J]. Physical Review

Letters, 1974, 33(23): 1404-1406.

- [2] Chamberlain O, Segrè E, Wiegand C, et al. Observation of antiprotons [J]. Physical Review, 1955, 100(3): 947-950.
- [3] Fukuda Y, Hayakawa T, Ichihara E, et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(8): 1562-1567.
- [4] Adamo G, MacDonald K F, Fu Y H, et al. Light well: a tunable free-electron light source on a chip [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(11): 113901.
- [5] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, et al. Relativistic multiwave Cherenkov generators [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1990, 18(3): 525-536.
- [6] Duan Z Y, Shapiro M A, Schamiloglu E, et al. Metamaterial-inspired vacuum electron devices and accelerators [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(1): 207-218.
- [7] Ruggiero A, Holland J P, Lewis J S, et al. Cherenkov luminescence imaging of medical isotopes [J]. Journal of Nuclear Medicine, 2010, 51(7): 1123-1130.
- [8] Liu F, Xiao L, Ye Y, et al. Integrated Cherenkov radiation emitter eliminating the electron velocity threshold [J]. Nature Photonics, 2017, 11(5): 289-292.
- [9] Ye Y, Liu F, Wang M X, et al. Deep-ultraviolet Smith-Purcell radiation [J]. Optica, 2019, 6(5): 592-597.
- [10] Ye Y, Liu F, Cui K, et al. Free electrons excited SPASER [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31402-31412.
- [11] Bolotovskii B M. Vavilov-Cherenkov radiation: its discovery and application [J]. Physics-Uspekhi, 2009, 52(11): 1099-1110.
- [12] Qu T, Liu F, Lin Y C, et al. Cherenkov radiation generated in hexagonal boron nitride using extremely low-energy electrons [J]. Nanophotonics, 2020, 9

- (6): 1491-1499.
- [13] Cai X S, Xiong J, Cui K Y, et al. One-shot ultraspectral imaging with reconfigurable metasurfaces[EB/OL]. (2020-05-06) [2021-03-20]. <https://arxiv.org/abs/2005.02689>.
- [14] Huang Z L, Cui K Y, Li Y Z, et al. Strong optomechanical coupling in a nanobeam cavity based on hetero optomechanical crystals [C] // CLEO: Science and Innovations 2014, June 8-13, 2014, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2014: JTh2A.55.
- [15] Huang Z L, Cui K Y, Bai G R, et al. High-mechanical-frequency characteristics of optomechanical crystal cavity with coupling waveguide[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34160.
- [16] Xiong J, Huang Z L, Cui K Y, et al. Phonon and photon lasing dynamics in optomechanical cavities [EB/OL]. (2019-07-15) [2021-03-20]. <https://arxiv.org/abs/1907.06475>.
- [17] Pan F, Cui K Y, Bai G R, et al. Radiation-pressure-antidamping enhanced optomechanical spring sensing [J]. ACS Photonics, 2018, 5(10): 4164-4169.
- [18] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [19] Zhang D K, Feng X, Huang Y D. Encoding and decoding of orbital angular momentum for wireless optical interconnects on chip [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26986-26995.
- [20] Wang Y, Zhao P, Feng X, et al. Integrated photonic emitter with a wide switching range of orbital angular momentum modes [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 22512.
- [21] Wang M X, Liu F, Lin Y C, et al. Vortex Smith-Purcell radiation generation with holographic grating [J]. Photonics Research, 2020, 8(8): 1309-1315.
- [22] Zhao X S, Feng X, Liu F, et al. A compound phase-modulated beam splitter to distinguish both spin and orbital angular momentum [J]. ACS Photonics, 2020, 7(1): 212-220.
- [23] Cheng J R, Zhang W, Zhou Q, et al. Correlated photon pair generation in silicon wire waveguides at $1.5 \mu\text{m}$ [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(12): 124208.
- [24] Guo Y, Zhang W, Lü N, et al. The impact of nonlinear losses in the silicon micro-ring cavities on CW pumping correlated photon pair generation [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2620-2631.
- [25] Suo J, Dong S, Zhang W, et al. Generation of hyper-entanglement on polarization and energy-time based on a silicon micro-ring cavity [J]. Optics Express, 2015, 23(4): 3985-3995.
- [26] Suo J, Zhang W, Dong S, et al. Discrete frequency entangled photon pair generation based on silicon micro-ring cavities [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2016, 85(10): 104401.
- [27] Yu L J, Zheng J Y, Liu X, et al. An integrated quantum light source of frequency degenerate polarization entangled bell states[C]//CLEO: QELS_Fundamental Science 2020, May 10-15, 2020, Washington, D.C., United States. Washington, D.C.: OSA, 2020: FTu4C.3.
- [28] Yu L J, Yuan C Z, Qi R D, et al. Hybrid waveguide scheme for silicon-based quantum photonic circuits with quantum light sources [J]. Photonics Research, 2020, 8(3): 235-245.
- [29] Yu L J, Wang H Q, Li H, et al. A silicon shallow-ridge waveguide integrated superconducting nanowire single photon detector towards quantum photonic circuits [J]. Chinese Physics Letters, 2019, 36(8): 084202.
- [30] Dong S, Zhang W, Huang Y D, et al. Long-distance temporal quantum ghost imaging over optical fibers [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26022.
- [31] Yao X, Liu X, You L X, et al. Quantum secure ghost imaging [J]. Physical Review A, 2018, 98(6): 063816.
- [32] Liu X, Xue R, Wang H Q, et al. Fully connected entanglement-based quantum communication network without trusted node [EB/OL]. (2020-11-23) [2021-03-20]. <https://arxiv.org/abs/2011.11319>.

Novel Functional Optoelectronic Chips Based on Nanostructures

Huang Yidong^{1,2,3,4,5*}, Zhang Wei^{1,2,3,4,5}, Feng Xue^{1,2,4,5}, Liu Fang^{1,2,4,5}, Cui Kaiyu^{1,2,4,5}

¹ *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

² *Frontier Science Center for Quantum Information, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

³ *Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China;*

⁴ *Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;*

⁵ *Beijing Innovation Center for Future Chips, Beijing 100084, China*

Abstract

Significance A series of new physical mechanisms and unique optoelectronic properties in nanostructures provide the possibility to explore and study new optoelectronic chips.

Progress Photons and phonons are important information carriers. Precise measurement of photons and phonons in micro-/nano- periodic structures allows the detection of multi-dimensional physical information and various physical quantities. Here, by manipulation of photons with metasurface units, a one-shot miniaturized ultraspectral camera with thousands of micro-spectrometers on a CMOS image sensor chip is proposed and applied to realize real-time on-chip spectral imaging. Micro-spectrometers with high center-wavelength accuracy of 0.1 nm and spectral resolution of 0.8 nm are realized and the ultraspectral imaging results for a plate of fruits just under the lighting of a fluorescent lamp are obtained. For phonons, opto-mechanical crystals are studied by dealing with the interaction between photons (light) and phonons (mechanical motion). A hetero opto-mechanical crystal is proposed and demonstrated by integrating two types of periodic structures into the system, and the optical and mechanical modes can be confined separately. This separate confinement gives rise to phonon lasing with a high mechanical frequency of 6.22 GHz. Moreover, radiation-pressure-antidamping enhanced opto-mechanical spring sensing based on a silicon nano-beam opto-mechanical structure is proposed and demonstrated, which allows for sensing resolution of $\sim 10^{-7}$.

Some interesting phenomena and novel devices are arising by free electrons interacting with various nanostructures. We demonstrate the first on-chip integrated free electron light source by greatly reducing electron energy to 0.25–1.4 keV for generating Cherenkov radiation (CR). In hexagonal boron nitride (hBN) with hyperbolic phonon polaritons, the theoretical and simulated results reveal that CR can be generated using free electrons with an extremely low kinetic energy of 1 eV, which is about two-orders of magnitude lower than that in multilayer plasmonic hyperbolic metamaterial. For generating Smith-Purcell radiation (SPR) in the deep UV region, we let an electron beam pass through a grating with 30 nm-wide slots and observe the SPR with the shortest wavelength of ~ 230 nm and the broadband SPR with wavelengths covering 230–1100 nm. We numerically investigate the SPASER excited by free electrons, and the tunable, deep-ultraviolet laser with output power density reaching about 30 W/ μm^2 and wavelength widely tuned by varying the electron energy. Our work opens up the possibility of exploring high performance on-chip integrated free electron light sources and optoelectronic devices, and provides a way for realizing an integrated free electron laser.

Introduced by Allen in 1992, orbital angular momentum (OAM) was characterized as a new freedom of lightwave. Since then, it has been attracted much research interest and shown the potential for various applications. Compared with the bulk optics, photonic integrated devices are much more compact and, the most importantly, compatible with the matured CMOS fabrication process. Since 2012, we have proposed and demonstrated integrated OAM emitters, plasmonic vortex arrays, angular momentum beam splitters and sorters, as well as the methods to identify the topological charges carried by OAM beams, etc. Here, three representative works are shown. Firstly, beams carrying OAM generated on chips are proposed for wireless optical interconnects and an integrated OAM emitter with a wide switching range of OAM modes is demonstrated. The independence of the micro-ring cavity and the gratings unit provides the flexibility to design the device and optimize the performances. Second, we propose an integrable method for generating vortex Smith-Purcell radiation by letting free electrons pass on holographic gratings and the numerical results indicate that the OAM wave with different topological charges can be obtained. Third, an angular momentum (AM) beam splitter has been demonstrated so that both spin and orbital components carried by lightwave can be distinguished simultaneously.

Photons are ideal flying qubits. Photonics provides an important way to develop quantum information technologies. A quantum information system based on photonics includes functional units for quantum state generation, manipulation, and detection. How to integrate these functions on a photonic chip is a crucial technology for future quantum information applications. We have taken part in the research of integrated quantum photonic circuits since 2010. In these ten years, we have developed comprehensive solutions on integrated quantum light sources for various quantum entangled state generation at telecom bands, based on spontaneous four-wave-mixing in silicon waveguides and micro-ring resonators. We have also developed technologies for quantum state manipulation and detection on a silicon photonic chip. Utilizing high-performance energy-time entangled photon pairs generated in silicon waveguides, we have proposed and demonstrated a scheme of temporal ghost imaging based on the frequency correlation in the photon pairs, and have developed a quantum secure ghost imaging scheme based on it. Recently, we have realized a fully connected quantum key distribution (QKD) network with 40 users and 780 QKD links based on a silicon photonic quantum light source. It is the entanglement-based QKD network with the largest user number to the knowledge of authors.

Conclusion and Prospect In summary, the research achievements of our research group in the field of nanostructured optoelectronic chips are reviewed. Various nanostructures have been successfully developed to control the mechanism of photons, electrons, phonons, surface plasmon polariton and their interactions, and a series of new functional optoelectronic chips have been realized, such as free electron radiation, real-time spectral imaging, phonon sensing, optical orbital angular momentum radiation, and quantum state generation and control. At present, some of the chips are being industrialized and expected to become practical in the near future.

Key words optoelectronics; micro-nano structure; photonic crystals; acousto-optic crystals; free-electron radiation; optical orbital angular momentum; quantum state generation and control

OCIS codes 250.5300; 350.4238; 140.2600; 270.5565