基于硅氮化物的集成片上可调谐绿光光源

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41313.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于硅氮化物的集成片上可调谐绿光光源。 导读

绿光光源（波段在510至560纳米）在量子光子学、精密加工及水下通信等领域具有重要应用价值。然而，由于半导体材料在绿光缺口波段存在内量子效率低与调谐能力受限等问题，传统绿光源往往依赖体块非线性晶体进行频率转换，存在系统体积大、集成度低等局限，难以满足片上光子系统的发展需求。

近日，来自瑞士洛桑联邦理工学院的研究团队在硅氮化物（Si3N4）微环谐振腔中实现了基于光诱导二阶非线性的高功率、宽调谐的片上绿光光源，该系统可实现最高3.5毫瓦的绿光输出功率和29纳米的调谐范围，同时首次实验验证了频率梳辅助的非级联和频机制。该成果为构建低阈值、高功率、宽调谐、全集成的片上可见光光源技术提供了重要突破。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为Integrated tunable green light source on silicon nitride。瑞士洛桑联邦理工学院的Gang Wang为论文第一作者，Camille-Sophie Bres为通讯作者。

研究背景

绿光在量子信息处理、原子物理实验以及精密光学测量中具有关键作用，但片上绿光生成始终面临效率与调谐性的双重挑战。基于三阶非线性（χ3）的三次谐波或光参量振荡虽然可以实现可见光输出，但绿光功率通常停留在微瓦级水平，难以满足实际应用需求；基于周期极化薄膜铌酸锂或钽酸锂的二阶非线性转换虽然效率更高，但往往受限于严格的相位匹配条件，调谐带宽通常仅为亚纳米级。另一方面，硅氮化物作为主流CMOS兼容平台，本征为中心对称材料，不具备天然χ2非线性，限制了高效倍频或和频过程的实现。

为克服这一限制，近年来研究者利用相干光生伏特效应在材料内部写入空间周期性静电场，从而诱导有效χ2非线性，实现准相位匹配的频率转换。然而，既有工作仍存在绿光功率不足、全光极化（all-optical poling， AOP）阈值较高以及难以兼顾高功率与宽调谐等问题。因此，在保持集成度优势的同时，实现低阈值、高功率与宽调谐三者统一，成为片上绿光光源技术发展的关键科学与技术难题。

创新研究

针对上述挑战，研究团队利用利用相干光生伏特效应在Si3N4微环中写入空间周期性静电场，形

成等效χ2光栅，实现准相位匹配的二次谐波产生（见图1）。在双谐振条件下，基频与倍频光之间形成自增强过程，使绿光输出功率显著提升。实验结果显示，在50 GHz FSR微环中实现最高3.5 mW绿光输出，转换效率达到3.2 %/W。同时，在1050 – 1070 nm泵浦扫描范围内，约40%的谐振模式可触发AOP，实现可重构绿光输出（见图2）。

而针对降低AOP阈值的挑战，研究团队利用1 μm波段增强的光生伏特效应显著降低了极化门槛。实验结果表明AOP阈值仅为4.5 mW，已进入片上激光器可直接驱动的功率范围；随着泵浦功率增加，极化建立时间从数十秒缩短至亚秒级，证明该过程为自辅助写入而非读取既有光栅（见图3）。这一突破为构建无需光纤放大器的全集成绿光光源奠定了基础。

此外，研究团队还首次实验验证了频率梳辅助的非级联和频机制。研究团队在异常色散微环中产生的相干Kerr频率梳可写入新的χ2光栅，使两个非谐波关系的梳齿直接产生和频信号，并实现单一泵浦谐振内11 nm范围的绿光切换。最终，在1030 – 1070 nm泵浦范围内实现511 – 540 nm绿光输出，总调谐跨度达29 nm，在输出功率与调谐范围两个维度均显著优于既有片上绿光方案（见图4）。该结果建立了χ3频率梳与χ2光栅写入之间的直接关联，实现了高功率、低阈值与宽调谐性能的统一。

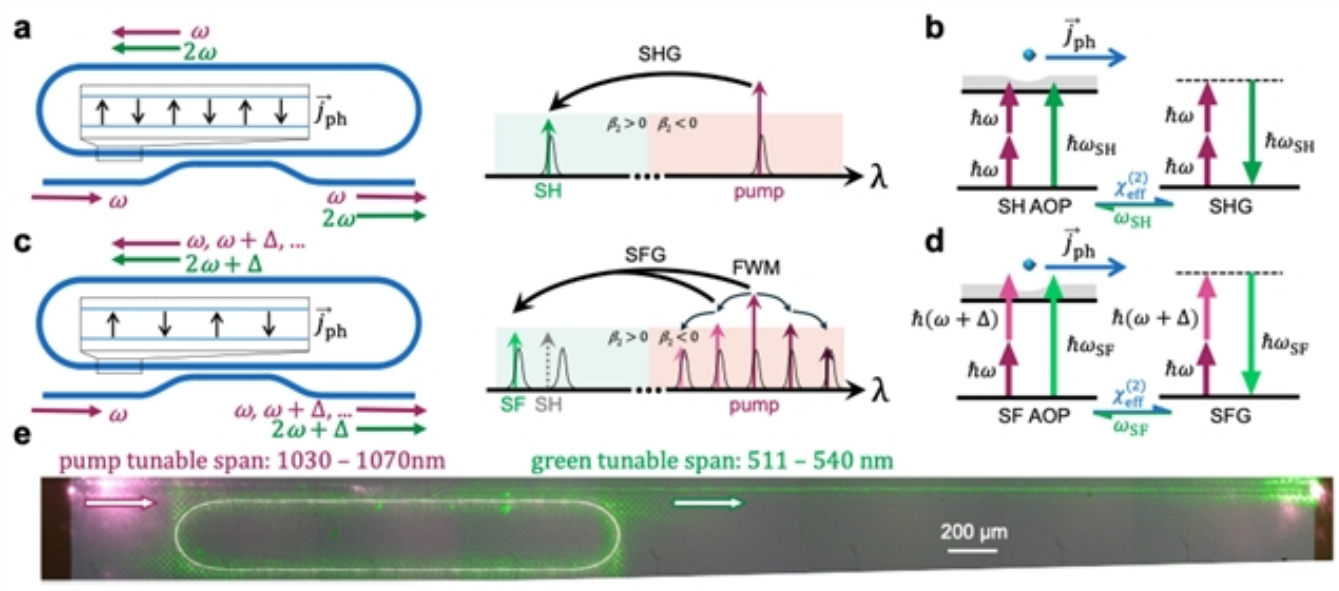


图1：全光极化驱动的Si3N4微谐振腔绿光产生机制。a，在满足双谐振条件时，Si3N4微谐振腔中二次谐波产生（second-harmonic generation, SHG）的示意图。虚线框为光诱导光生电流空间分布的放大图；右侧黑色洛伦兹曲线表示微谐振腔的谐振模。b, SH-AOP过程中光生电流产生机制及SHG的能量守恒示意。基频（fundamental harmonic, FH）与二次谐波（second harmonic, SH）通过多光子吸收干涉共同产生定向光生电流，从而写入周期性内建静电场，该电场进一步与基频相互作用生成二次谐波。c，在两条频率梳线与和频信号之间选择性满足三重谐振条件时，Si3N4微谐振腔中和频产生（sum-frequency generation, SFG）的示意图。在泵浦频率处波导呈异常色散，注入的ω频率泵浦光通过级联四波混频转化为多个频率间隔为Δ的梳齿。SF-AOP可写入不同于SH光栅的独立χ2光栅（虚线框所示）。d，SF-AOP诱导的光生电流产生过程及SFG的能量守恒示意。e，器件工作状态下的显微图像。绿光在微环中产生并向右侧耦出。当泵浦波长在1030 – 1070 nm范围内调谐时，可实现511 – 540 nm范围内的高密度绿光输出。β?表示二阶色散系数。

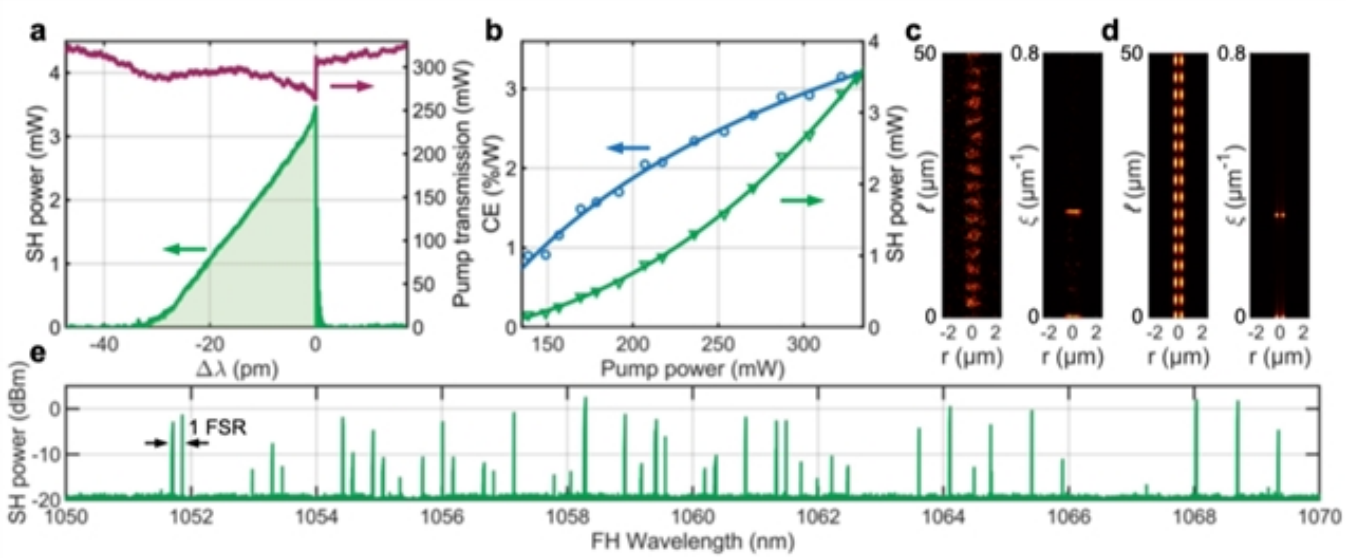


图2：可重构的高功率绿光产生。a, 非线性谐振扫描过程，其中绿色曲线表示片上二次谐波（SH）输出功率，紫色曲线表示泵浦透射信号。b，SH转换效率及输出功率随泵浦功率变化的关系曲线。c，实验获得的双光子显微图像及对应的空间频率分布计算结果，与 d 中基频基模与SH2模式相互作用的数值模拟结果高度一致。ℓ 表示传播距离，r 表示径向距离，ξ 表示空间频率。e，通过可重构全光极化实现的宽带二次谐波产生。约40%的谐振模式能够实现AOP。FSR 表示自由光谱范围。

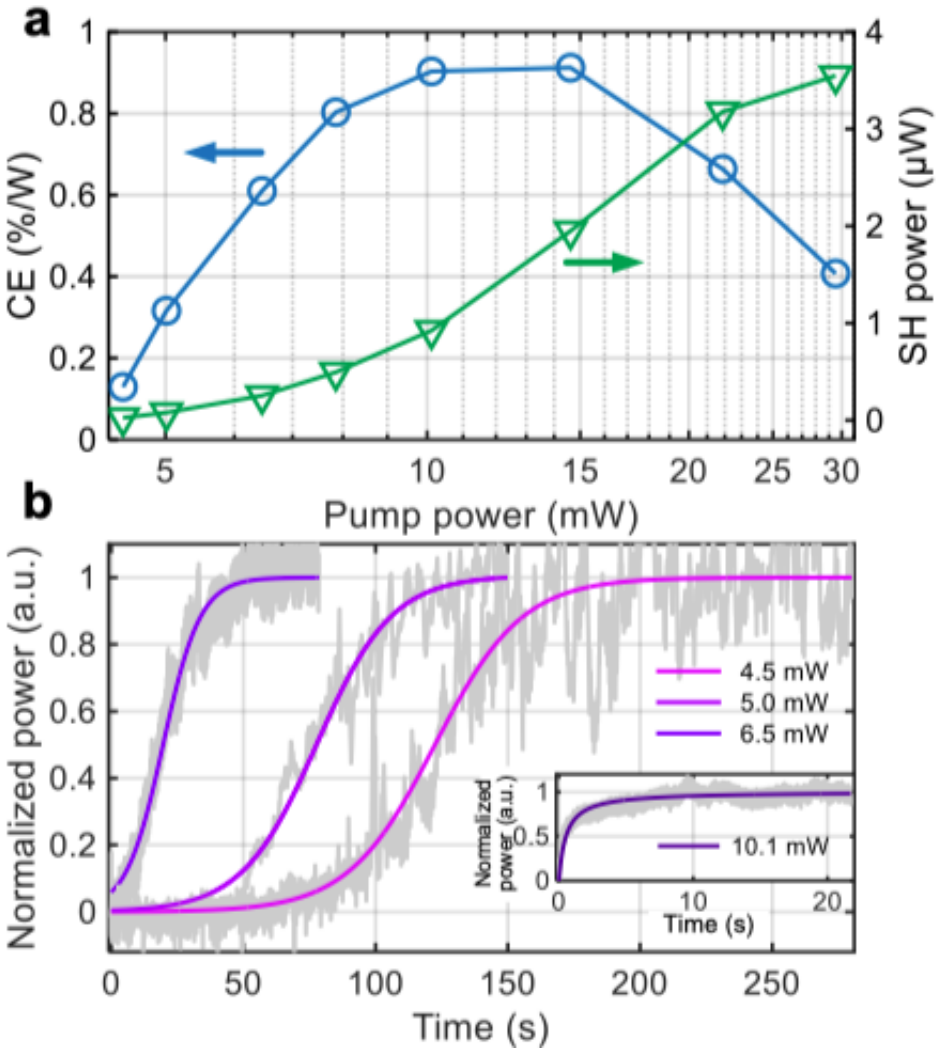


图3：毫瓦级泵浦下的低阈值全光极化。a，二次谐波的转换效率与输出功率随泵浦功率变化的关系曲线，AOP及谐波产生的阈值测得为 4.5 mW。b，在低泵浦功率条件下，生成的SH功率随时间增长的过程。灰色曲线表示实验数据，紫色曲线为S形函数拟合结果。SH功率的逐步增长表明该体系具备自辅助低阈值AOP的能力。插图显示在泵浦功率为 10.1 mW
时SH功率的快速增长过程。

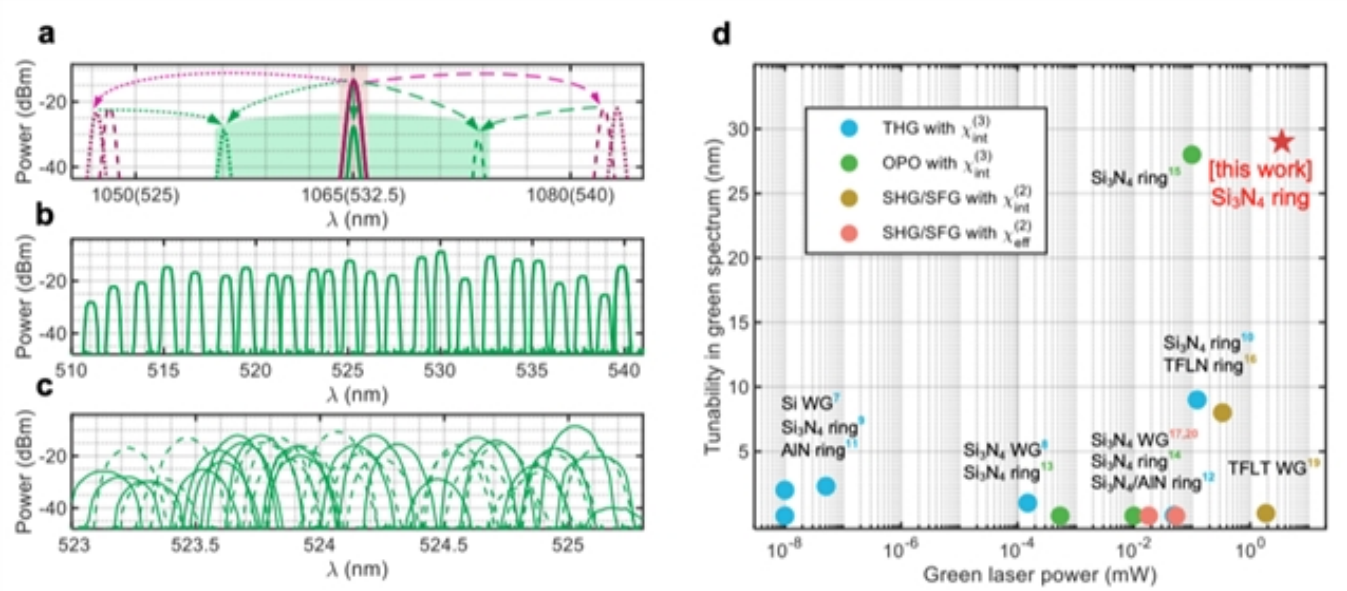


图4：绿光光源性能表征。a，11 nm 可切换绿光输出及对应 1 μm 泵浦光的叠加光谱。紫色曲线表示 1 μm 波段，绿色曲线表示绿光波段。在单一泵浦谐振内记录了三种不同工作状态（由不同线型区分）。实线：1065 nm 泵浦的二次谐波产生；点线：主频率梳产生及其与蓝失谐梳齿之间的后续和频产生过程；虚线：第二种主梳态及其与红失谐梳齿之间的后续和频产生过程。b，在固定温度 50 ° C 条件下，实现 511 – 540 nm 的 29 nm 可调谐范围。c，在 50 ° C（实线）和 40 ° C（虚线）条件下，于 2 nm 范围内获得的绿光信号。d，与其他集成频率转换绿光光源相比，本工作在输出功率和光谱覆盖范围方面的提升。WG 表示波导；TFLN 表示薄膜铌酸锂；TFLT 表示薄膜钽酸锂。

总结与展望

综上所述，本研究成功在硅氮化物微环平台上实现了高功率、宽调谐、低阈值的片上绿光光源，通过光诱导二阶非线性写入机制与频率梳辅助调控，实现了3.5 mW绿光输出、29 nm调谐范围以及毫瓦级AOP阈值，并首次实验验证了非级联和频机制在微腔中的可行性。该工作证明高功率、宽调谐与低阈值可在相似器件架构中统一实现，有望推动硅氮化物平台在可见光集成光子学及量子光学系统中的广泛应用。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02222-8

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Camille-Sophie Bres 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发