
多模硅光延迟线：突破延迟密度极限

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34966.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！

多模硅光延迟线：突破延迟密度极限。 导读

片上光波导延迟线在诸多光学系统中具有突出应用价值，但难以同时实现低损耗、大范围、小尺寸和大带宽的要求。针对这一问题，浙江大学戴道锌研究团队首次提出并演示了一种多模硅光延迟线，一举打破了单模波导的延迟密度限制，实现了创纪录的高延迟密度（3299 ps/mm²）和超大片上延迟量12.7 ns，推动大带宽片上延迟线朝着mm²尺寸和10 ns级大延迟量迈进。该成果以Multimode-enabled silicon photonic delay lines: break the delay-density limit为题发表于国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》。博士生洪仕瀚为第一作者，戴道锌教授为通讯作者。

研究背景

片上光波导延迟线在微波光束形成、高速光通信和集成量子光子学等领域具有广阔应用前景。特别是，微波光子波束形成系统、光频域反射计（OFDR）和光学相干断层扫描系统（OCT）及高速光通信系统等都对片上光波导延迟线延迟范围、带宽、尺寸都提出了更高要求。如何在小尺寸条件下实现大带宽/低损耗的10 ns级大延迟范围一直面临重要挑战，其关键在于实现超低损耗传输及高延迟密度。

研究亮点

在各类光波导体系中，硅光波导以其超高折射率差和CMOS兼容性而备受关注，有助于实现超紧凑的片上光波导延迟线及阵列。本文提出了硅光多模延迟单元（图1(a)所示），创新性地单片集成了阿基米德多模波导螺旋线、欧拉S弯曲、TE₁/TE₂模式复用/解复用器等，其中：

1. 选取3 μm波导宽度的阿基米德多模波导螺旋线，以支持多个模式的低损传播。
2. 优化螺旋线的波导间隙，实现低耦合串扰的紧凑器件。
3. 引入了欧拉S弯曲，实现超紧凑尺寸和超低弯曲损耗，并消除更高阶模的串扰。
4. 引入TE₁/TE₂模式复用/解复用器和双迂回波导实现光场循环传输。

在此结构中，基于多通道模式复用技术，光场在阿基米德多模波导螺旋线中来回循环传输，实现了延迟总量的显著增强。为了更好地表征延迟量水平和结构紧凑性，本文定义每单位面积的延迟

量为延迟密度 Dd (ps/mm²)，并作为其品质因子。很显然，延迟密度 Dd 主要由线延迟密度 Dd_L 和延迟损耗 Ld 决定。在此，线延迟密度 Dd_L 定义为延迟量与波导长度的比值 (ps/cm)，而延迟损耗 Ld (dB/ps) 则被定义为传播损耗与延迟时间之比。

在此，我们成功地研制了3模式通道的多模延迟单元芯片，利用三个模式通道实现了高达376.9 ps/cm的线延迟强度(见图1 (b)、比单模延迟单元高2.7倍)，同时还实现了0.0018 dB/ps的超低延迟损耗(见图1 (c)、比单模延迟单元小一个量级)。

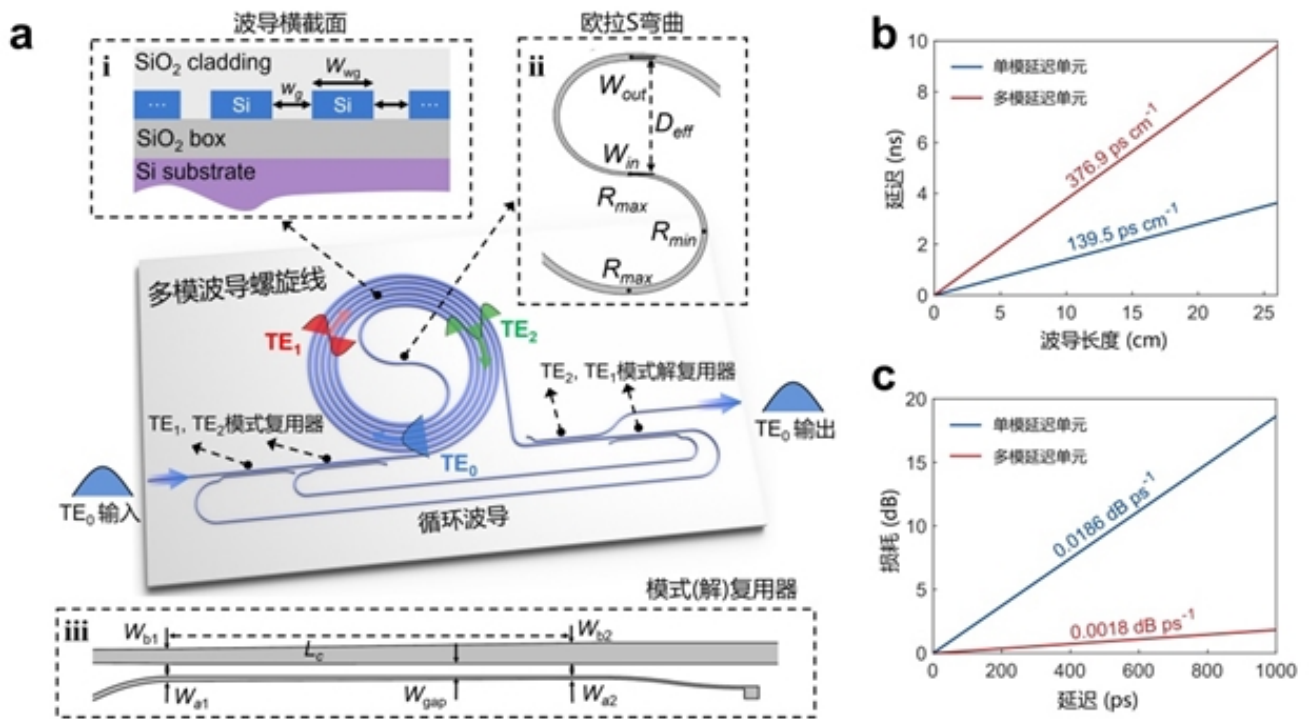


图1. (a) 硅光多模延迟单元及其 (b) 线延迟密度和 (c) 延迟损耗。

测试结果表明：所研制硅光多模延迟线的TE₀、TE₁和TE₂模传播损耗分别为0.2、0.31和0.49 dB/cm (图2 (a) 所示)，均远低于单模波导损耗 (~ 3.1 dB/cm)；相应地，其总的等效延迟损耗为0.0040 dB/ps (图2 (b) 所示)，亦远低于单模波导 (~ 0.022 dB/ps)。

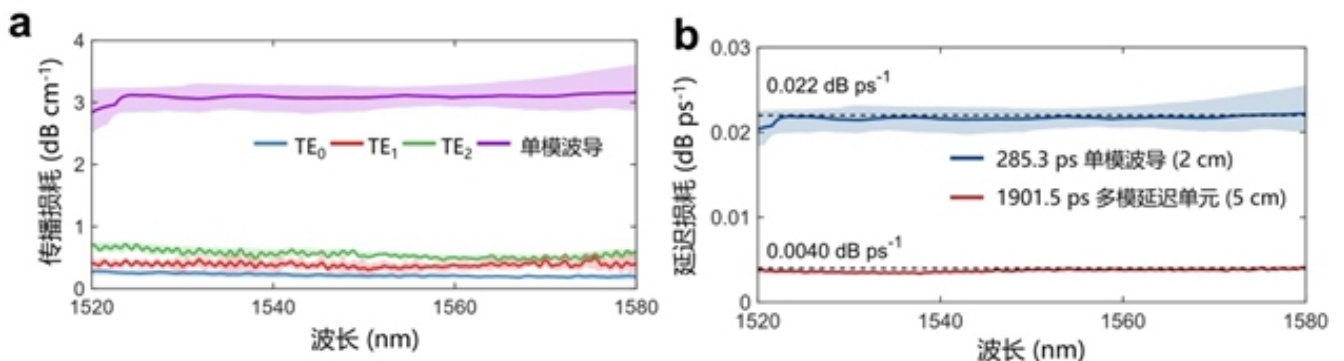


图2. 多模波导和单模波导延迟线特性对比：(a) 各模式传输损耗，(b) 延迟损耗。

基于所提出的多模延迟单元和免校准 2×2 光开关，本文进一步研制了7-bit可调多模硅光延迟线，实现了高达12.7 ns的超大延迟，其分辨率为100 ps，总尺寸仅3.85 mm²。

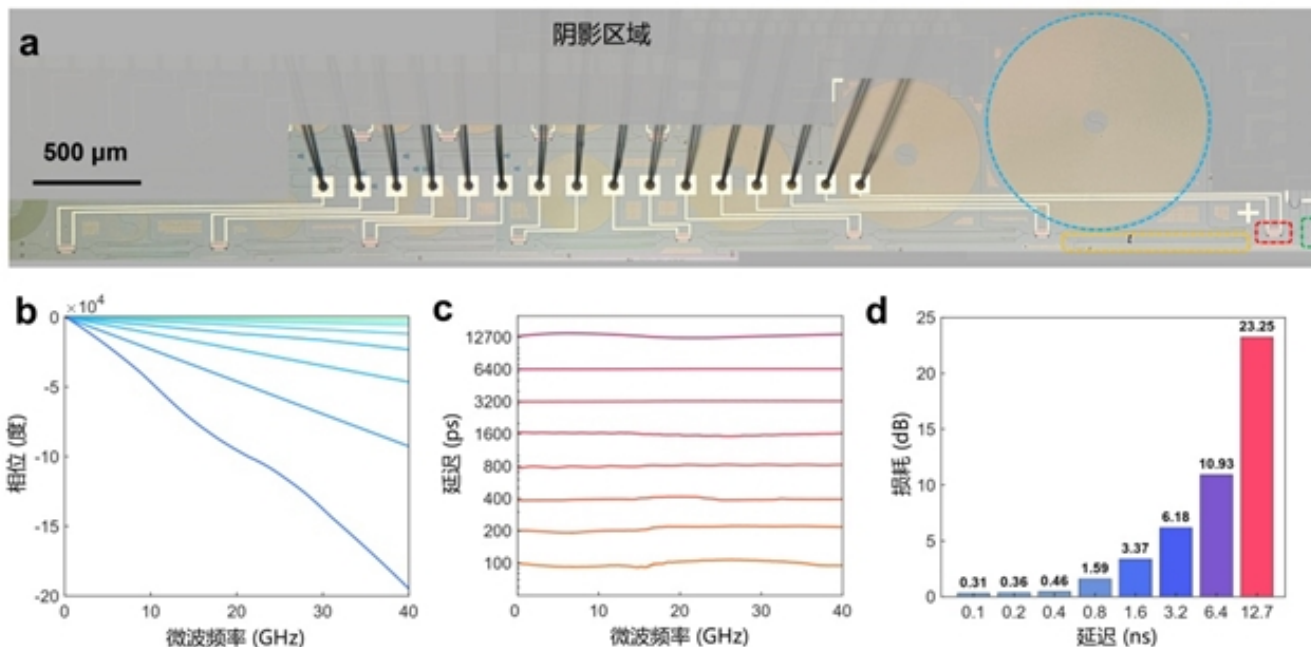


图3. (a) 7-bit可调多模硅光延迟线；(b) 微波相位响应；(c) 可调延迟量；(d) 不同延迟情况的损耗。

图4对基于不同波导体系的延迟线进行了比较。由此可见，氮化硅波导由于其低损耗往往更易于实现超大时延，但总体尺寸也大，相应的延迟密度为10 ps/mm²量级；相比之下，硅光波导以其超高折射率差更利于实现超小尺寸延迟线，但传统单模波导传输损耗较大，可获得的总延迟量通常为数百ps，其延迟密度为~100 ps/mm²量级。而本文利用展宽硅光波导超低传输损耗特点实现了逾10 ns的超长延迟，同时通过引入模分复用方法实现逾3000 ps/mm²的超高延迟密度，创造了新的纪录。

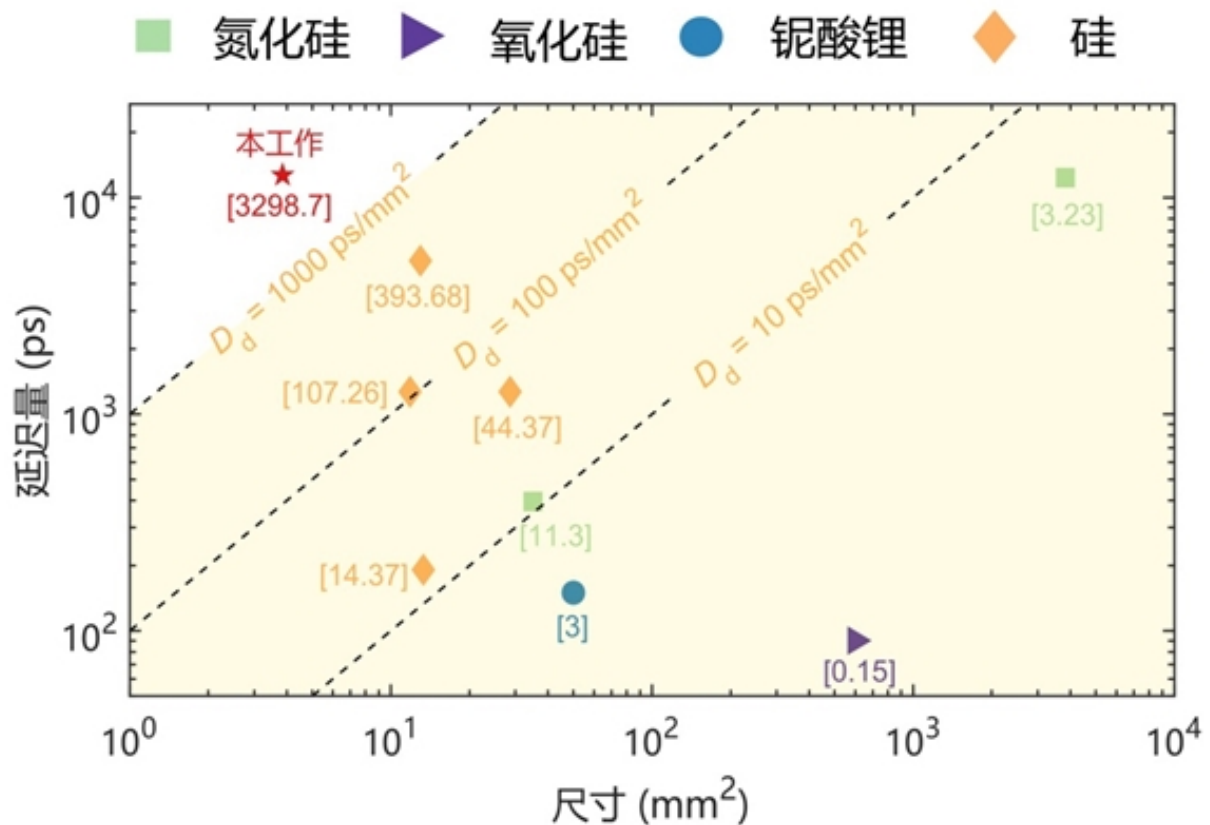


图4. 各种片上可调光波导延迟线的性能比较。

前景展望

本文提出了全新的多模硅光延迟线，基于模分复用及展宽波导技术，打破了片上延迟密度限制。所研制的可调多模硅光延迟线实现了12.7 ns超大延迟量，总尺寸仅3.85 mm²，是迄今报道片上硅光波导延迟线的最高延迟密度（3299 ps/mm²），为大规模微波波束形成、OFDR、OCT和集成量子光学等应用提供关键支撑。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01820-2>

作者：戴道锌等 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](https://www.iikx.com)转发