综述：用于高性能非线性集成光子学的氧化石墨烯二维薄膜

David J. Moss

澳大利亚维多利亚州霍桑市 3122，斯威本科技大学光学科学中心

关键词： 二维材料、 氧化石墨烯、集成光子学、非线性光学。

摘要

基于光学非线性工作的集成光子器件为全光信息处理提供了强有力的解决方案，其处理速度远超电子处理，同时还具有体积小、稳定性高、可扩展性强和功耗低等优势。对高性能非线性集成光子器件日益增长的需求，推动了新型材料的混合集成，以克服现有集成光子平台的局限性，例如非线性光吸收过强或光学非线性不足。近年来，氧化石墨烯（GO）凭借其强大的光学非线性、灵活调控自身性质的能力以及简便的制备工艺，受到了广泛关注，并促成了许多性能更优、功能更新颖的混合非线性集成光子器件。本文综述了氧化石墨烯在非线性集成光子学中的应用。首先，概述氧化石墨烯的光学性质及其片上集成所需的制备技术。随后，回顾氧化石墨烯非线性集成光子器件的最新进展，并比较集成氧化石墨烯的不同集成平台的非线性光学性能。最后，探讨这一领域面临的挑战与展望。

1. 引言

通过避免低效的光电光转换，基于光学非线性的全光信号生成、放大和处理可实现远超电子器件的处理速度[1-3]，，并支撑多种应用，例如超快开关[4, 5]，、宽带光放大[6, 7]，、光逻辑门[8, 9]，、全光波长转换[10, 11]，、计量学[12, 13]，、光谱学[14, 15]，、光学隐身[16, 17]，和量子光学[18, 19]。与庞大且分立的片外器件相比，采用成熟的互补金属氧化物半导体（CMOS）技术制造的光子集成电路，为在芯片尺度上实现紧凑型非线性光学器件提供了颇具吸引力的方案，从而使集成器件在高稳定性、可扩展性、低功耗和大规模制造等方面获益匪浅[20-22]。

尽管绝缘体上硅（SOI）一直是光子集成电路的主导平台，但其间接带隙对光源构成了重大劣势，而其中心对称晶体结构则对二阶非线性光学应用造成了固有的限制。此外，其在近红外波长下强烈的双光子吸收（TPA）限制了其在电信波段的三阶非线性光学响应[2, 23]。其他兼容CMOS的平台，例如氮化硅[7, 24, 25]和掺杂二氧化硅[26, 27]，双光子吸收要低得多，但其三阶光学非线性仍远小于硅。为解决这些问题，片上集成新型材料为克服现有集成平台的局限开辟了前景广阔的新途径。已有许多混合非线性集成光子器件采用聚合物[28, 29]，、碳纳米管[30, 31]，和二维材料[32-34]，展现出

显著提升的性能，并实现了超越传统集成光子器件的新功能。

自 2004 [35] 发现石墨烯以来，石墨烯、黑磷（BP）、过渡金属二硫属化物（TMDCs）、六方氮化硼（hBN）和氧化石墨烯（GO）等二维材料引发了研究热潮。凭借原子级厚度和层状结构，这些材料展现出许多显著的光学性质，与传统块体材料的光学性质截然不同 [36-42]。近年来，人们对二维材料的非线性光学性质愈发关注；这类性质不仅在实验室研究中令人着迷，也因其潜在的实际和工业应用前景而引人瞩目[43-50]。

在各种二维材料中，氧化石墨烯在实现具有优异非线性光学性能的混合集成光子器件方面展现出诸多优势 [37, 51-54]。据报道，氧化石墨烯具有很强的三阶光学非线性（折射率$_2$），比硅高出 4 个数量级以上 [55, 56] ；其在红外区域的线性吸收也比石墨烯低 2 个数量级以上 [52, 57], ，这两项特性对于三阶非线性光学过程都非常有用。此外，氧化石墨烯具有非均匀原子结构，呈现非中心对称性，因此具有较强的二阶光学非线性；这种非线性在具有中心对称结构的本征石墨烯中并不存在。氧化石墨烯的带隙和缺陷也可通过调控来促进多种线性和非线性光学过程。氧化石墨烯的这些材料性质，加上其简便的合成工艺以及与集成平台的高度兼容性 [57, 58], ，使一系列高性能非线性集成光子器件得以实现。本文将系统综述这些器件，重点介绍其

基于多种非线性光学过程的应用（图 1），并比较不同的集成平台。

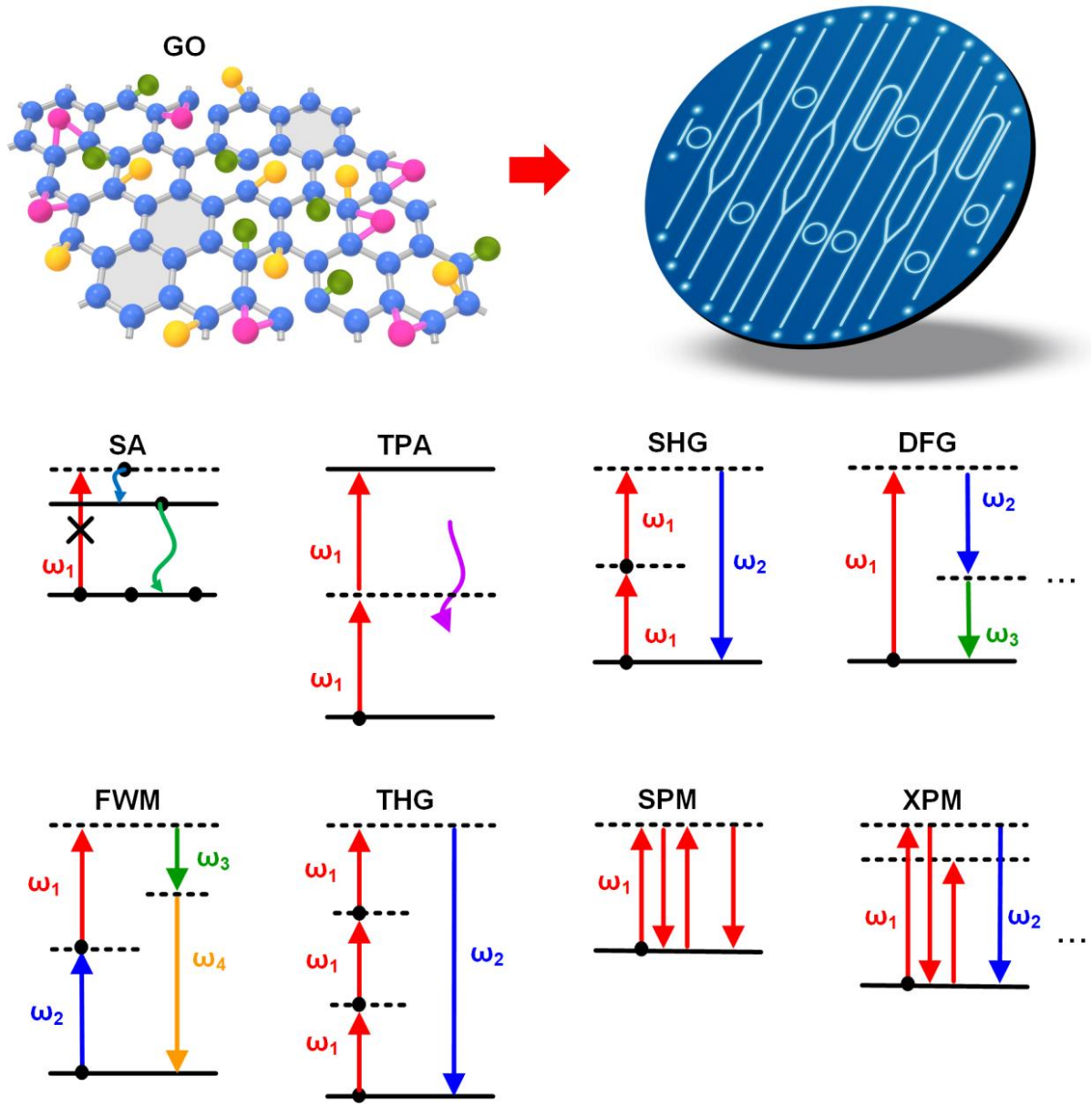

图 1. GO 在非线性光学应用中的片上集成示意图。SA：可饱和吸收。TPA：双光子吸收。SHG：二次谐波产生。DFG：差频产生。FWM：四波混频。THG：三次谐波产生。SPM：自相位调制。XPM：交叉相位调制。

本文的组织结构如下。第2节介绍 GO 的光学性质，包括线性性质和非线性性质，尤其着眼于其在集成光子器件中的应用。 接下来，介绍将 GO 薄膜集成到

芯片上的制备技术，这些内容汇总于**第3节**，并分为 GO 合成、芯片上的薄膜涂覆和器件图案化。**第4节**回顾了采用 GO 的先进非线性集成光子器件。**第5节**详细比较并讨论了采用 GO 的不同集成平台的非线性光学性能。**第6节**讨论了当前面临的挑战与未来展望。最后，**第7节**给出结论。

2. 氧化石墨烯的光学性质

GO 含有多种含氧官能团（OCFGs），例如环氧基、羟基和羧基，这些官能团都连接在类石墨烯碳网络上，是石墨烯最常见的衍生物之一 [59-62]。其非均匀原子结构同时包含具有 π-态的 sp^2碳位点，以及具有 σ-态的 sp^3键合碳原子，使 GO 呈现出一系列独特的材料性质，尤其是在二维形态下。本节简要介绍 GO 的光学性质，包括线性和非线性性质，重点关注近红外电信波段（约 1550纳米）。**表1**比较了 GO 与石墨烯、过渡金属二硫族化合物和黑磷等典型二维材料，以及用于实现集成光子器件的硅（Si）、二氧化硅（SiO_2）、氮化硅（Si_3N_4）和高折射率掺杂二氧化硅玻璃（Hydex）等块体材料的基本光学性质。下文将根据**表1**详细介绍 GO 的光学性质。

表1. GO 与其他二维材料和块体材料用于集成光子器件时的基本光学性质比较。LO：线性光学。NLO：非线性光学。

材料	带隙 (eV)	线性光学参数 a)		非线性光学参数 a)		Ref.
		n	k	折射率$_2$ ($\times10^{-14}$ m^2·钨$^{-1}$)	β ($\times10^{-12}$ m·石墨烯$^{-1}$)	
GO	2.1 – 3.5	1.97	0.005 – 0. 01	1.5 – 4.5	-5.3×10^4	[53, 55, 63]
石墨烯	0	2.7	1.37 – 2.21	-8.0 – -10.0	9.0×10^4	[64-67]
MoS_2	1.2 – 1.8	3.65	0.1 – 0.9	0.027	120	[68-72]
WSe_2	1.2 – 1.7	3.70	0.04	-0.17	2.1×10^4	[73-76]
BP	0.3 – 2.0	2.65	1.2 – 1.9	-1.25 × 10^{-5}	0.18	[77-83]
Si	1.1 – 1.3	3.48	≈0	6 × 10^{-4}	5.0	[2, 3, 84]
SiO_2	6.5 – 7.5	1.45	≈0	2.60 × 10 $^{-6}$	—	[85, 86]
硅$_3$N$_4$	4.5 – 5.3	1.99	≈0	2.61 × 10 $^{-5}$	—	[3, 24, 87]
Hydex	—	1.6 – 1.7	≈0	1.3 × 10^{-5}	—	[3, 88, 89]

a) 此处展示了波长为 1550纳米附近的折射率、消光系数、折射率$_2$, 和 β 的数值。

2.1 线性光学性质

与带隙为零的石墨烯 [90], 相比，GO 的典型带隙为 2.1 eV – 3.6 eV [59, 91], ，因此其在电信波段的线性光吸收较低。尽管在**表1** 中，GO 的光学消光系数k （0.005 – 0.01）不如硅、Si_3N_4,和 SiO_2, 低，但仍远低于其他二维材料，尤其是石墨烯，其损耗比 GO 高出 100 多倍。GO 的这一性质对于自相位调制（SPM）和四波混频（FWM）等非线性光学应用极具吸引力，因为这类应用需要较高功率来驱动非线性过程。另一方面，在从近红外到中红外区域的宽广光学波段内，GO 的折射率n约为 2[53, 55, 62, 63]。因此其材料色散较低，这对于实现器件至关重要

具有宽广的工作带宽，例如基于相位匹配的宽带四波混频或自相位调制器件 [2, 6]。

通过采用不同的还原方法改变sp^2和sp^3组分的比例，可以调控氧化石墨烯的带隙 [92, 93], ，从而使其材料性质发生变化。**图2(a)** 比较了石墨烯、氧化石墨烯、还原氧化石墨烯（rGO）和完全还原氧化石墨烯（trGO）的原子结构。可以看出，随着含氧官能团不断去除，氧化石墨烯逐渐还原，最终转变为完全还原氧化石墨烯。与石墨烯相比，完全还原氧化石墨烯具有相似的碳网络，但缺陷更多。完全还原氧化石墨烯与石墨烯在性质上的差异主要源于这些缺陷；这些缺陷不仅会在还原过程中形成，也会在石墨烯转变为氧化石墨烯所涉及的氧化过程中形成 [94, 95]。**图2(b)**比较了氧化石墨烯、还原氧化石墨烯、完全还原氧化石墨烯和石墨烯的实测折射率、消光系数 [63, 96]。随着还原程度提高，还原氧化石墨烯的折射率和消光系数均增大，并呈现向石墨烯靠近的趋势；完全还原氧化石墨烯的折射率和消光系数则与石墨烯极为接近。块体材料的折射率和消光系数调谐范围有限（例如，硅的折射率通常仅在 10^{-4} – 10^{-3} 量级 [97]），与之相比，氧化石墨烯的折射率（从 ~2 到 ~2.7）和消光系数（从 < 0.01 到 ~2）均具有非常宽广的调谐范围，因此许多光子器件得以实现出色的相位和振幅调谐能力 [63, 96]。

与石墨烯和过渡金属二硫族化合物相似 [98-100], 氧化石墨烯薄膜在从可见光到红外区域的宽波段内表现出强烈的光吸收各向异性 [57, 101]。这一特性有助于实现工作带宽较宽的偏振选择器件。

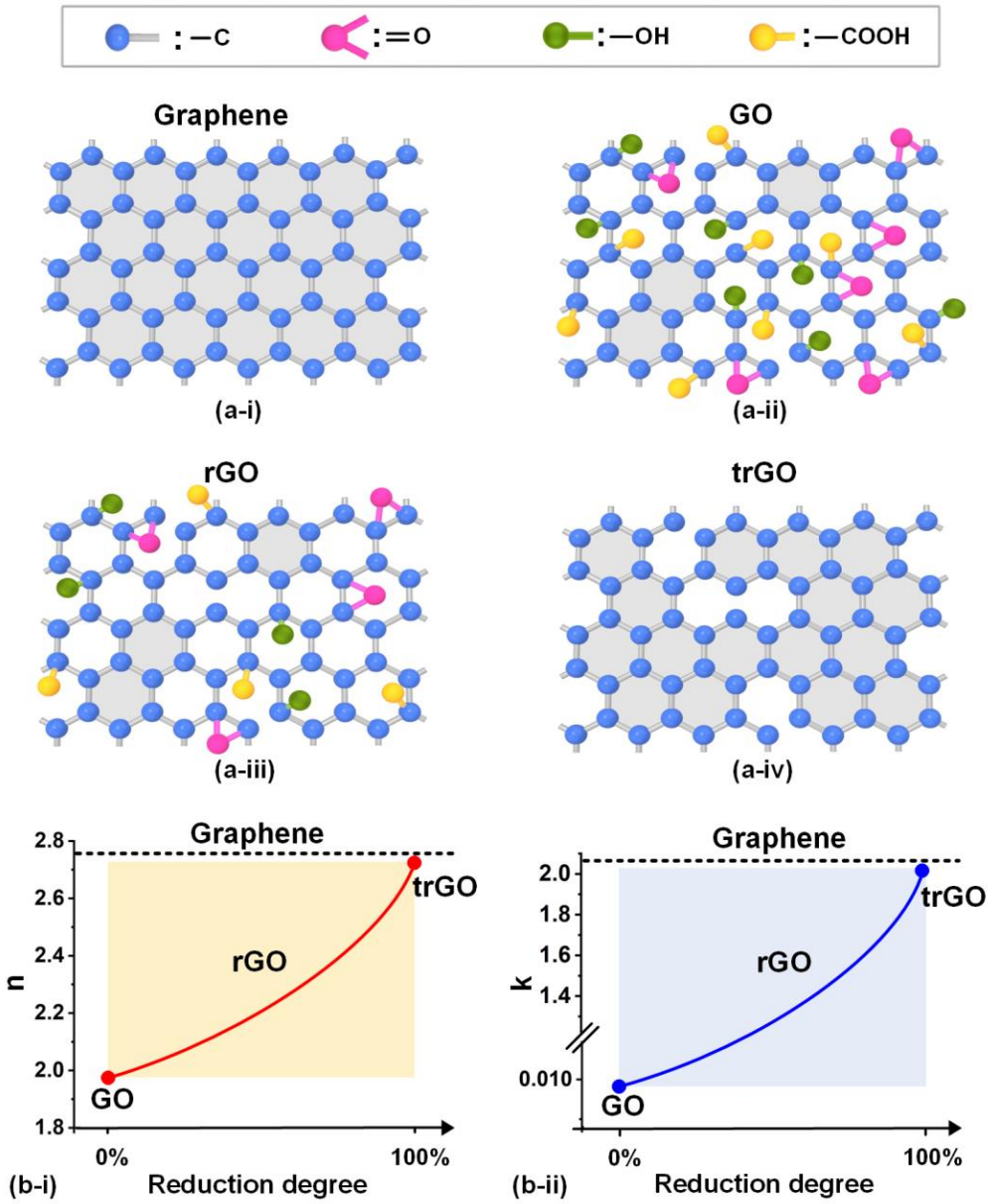

图2。（a）（i）石墨烯、（ii）氧化石墨烯、（iii）还原氧化石墨烯和（iv）完全还原氧化石墨烯的原子结构示意图。（b）它们的（i）折射率 n 和（ii）消光系数 k 的比较。

在 **图3**中， 我们比较了采用二维层状氧化石墨烯薄膜的不同集成波导，包括横截面分别为 0.50 μm × 0.22 μm、1.60 μm × 0.66 μm 和 2.00 μm × 1.50 μm 的硅、硅$_3$N$_4$，和 Hydex波导。**图3(a)**展示了混合波导的示意图。为便于比较，我们选用顶面经过平坦化处理的集成波导，并在每个波导上覆盖一层氧化石墨烯薄膜（厚度为 ~2 纳米 [52, 53]）。除非另有说明，在下文讨论中，未覆膜的集成波导均相同

如**图3(a)**所示。**图3(b)** 展示了混合波导的横向电场（TE）模式分布，该分布是根据实验测得的二维层状氧化石墨烯薄膜在1550纳米处的折射率计算得出的 [63, 96]。**图3(c)** 比较了氧化石墨烯、硅、Si_3N_4, Hydex 和 SiO_2 在1500纳米至1600纳米波长范围内的折射率。氧化石墨烯的折射率高于 Hydex 和 SiO_2, ，但低于 Si_3N_4 和硅。在三种波导材料中，硅的折射率最高，因此波导中的光约束最强，波导几何结构也最小。

图3(d)展示了未涂覆氧化石墨烯薄膜的裸硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导的色散。文中也展示了氧化石墨烯包覆硅波导的色散以作比较。 所有色散均使用**图3(c)**中的折射率进行模拟。裸硅波导呈正常色散，而裸 Si_3N_4 和 Hydex 波导则呈轻微反常色散。涂覆氧化石墨烯薄膜后，GO-Si 混合波导的正常色散略有减弱，而 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导的反常色散略有增强（未在**图3(d)**中显示，因为这些波导的曲线几乎与未涂覆波导的曲线重合），这表明在这些波导中加入氧化石墨烯薄膜可能有利于四波混频或自相位调制的相位匹配。

图3(e) 和 **(f)** 分别展示了不同氧化石墨烯层数*N*下，氧化石墨烯中的功率与波导芯层中的功率之比。模拟中假设氧化石墨烯薄膜的厚度与*N*成正比。对于氧化石墨烯层数相同的混合波导，GO-Si 波导的倏逝场泄漏最强，与氧化石墨烯薄膜的模式重叠也最大，这主要是因为其波导几何结构更小。随着*N*增加，所有混合波导与氧化石墨烯薄膜的模式重叠均有所增加，这反映了

GO薄膜厚度增加可以增强光与GO之间相互作用这一事实。

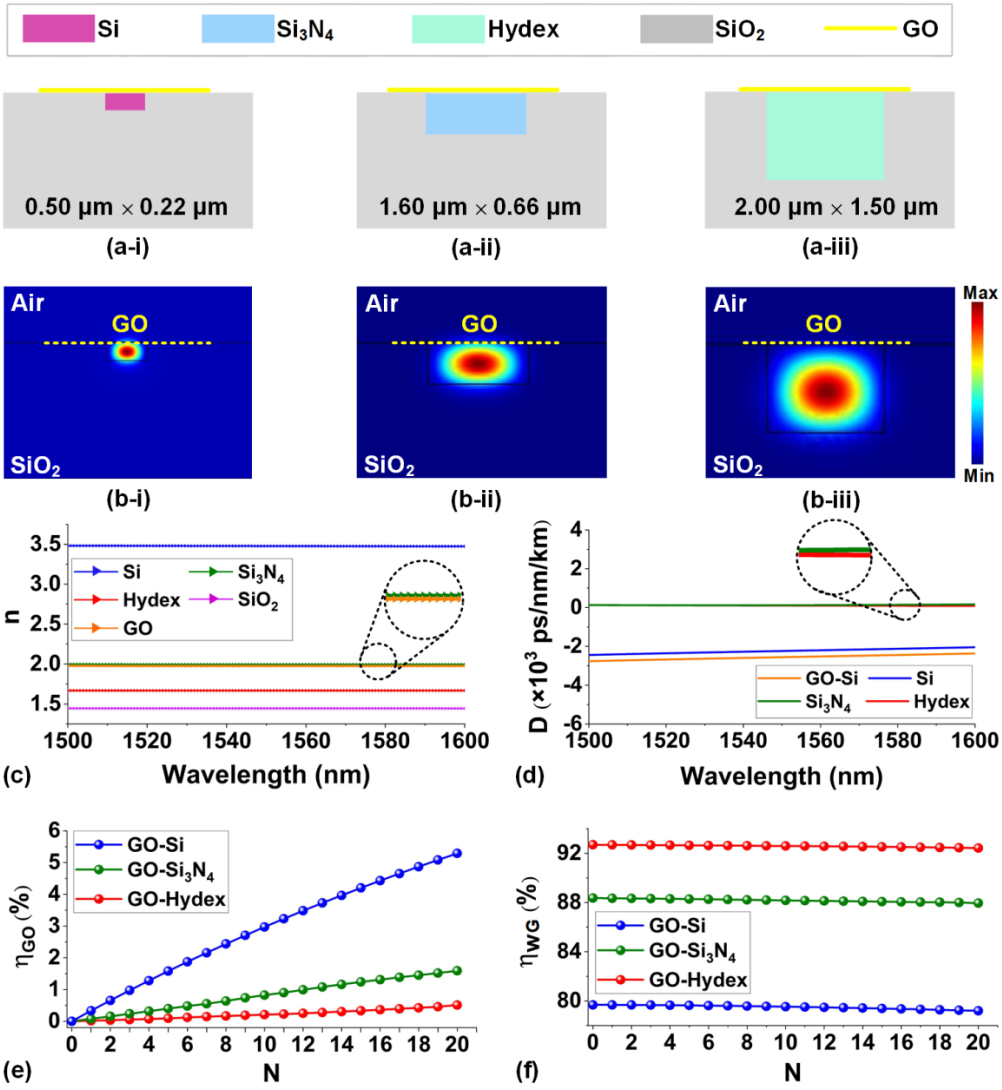

图3. (a) 示意图展示了以下波导的横截面：(a-i) 硅（0.50 μm × 0.22 μm）、(a-ii) Si_3N_4（1.60 μm × 0.66μm）和 (a-iii) Hydex（2.00 μm × 1.50 μm），每种波导均涂覆了1层氧化石墨烯薄膜。(b) (a)中混合波导的横电模场分布。(c) 对比GO、SiO_2, Si、Si_3N_4, 和Hydex的折射率n。(d) 对比未涂覆氧化石墨烯薄膜的三种集成波导与氧化石墨烯包覆硅波导的色散。(e) 不同混合波导中GO内功率与所有材料区域内功率的比值（η_{GO}）随层数N的变化。(f) 不同混合波导中波导芯层内功率与所有材料区域内功率的比值（η_{WG}）随N的变化。

在**图4(a)**中，我们比较了混合波导的线性传输损耗随GO层数*N*的变化；该损耗是根据实验测得的二维层状氧化石墨烯薄膜在1550纳米处的消光系数计算得出的 [63, 96]。对于实际的氧化石墨烯薄膜，消光系数会随*N*略微增大，这主要是由于薄膜制备过程中产生的薄膜缺陷累积所致

表面不平整、多层堆叠以及局部缺陷 [53, 57]。如图所示，GO-Si 波导的传播损耗远高于可比的 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导，并且这些波导的传播损耗均随*N*增加而增大。这与 **图 3(e)** 所示结果相似，表明增强 GO 模场重叠会导致线性传输损耗增加。模式重叠在权衡增强三阶光学非线性与尽量降低线性损耗方面起着重要作用，从而实现 GO 混合波导的最佳性能；这一点已在参考文献 [102, 103] 中进行了详细讨论。

实际应用中，暴露于空气中的 GO 混合波导的线性传输损耗会随输入光功率变化，尤其是在平均功率较高时 [51, 54]。这种功率依赖线性损耗（PDLL）源于 GO 薄膜中对功率敏感的光热变化，包括光热还原、热耗散以及 GO 层中的自热等一系列效应 [51, 54, 104]。这些因素引起的光热变化呈现出一些有趣的特征。首先，在一定的功率范围内，如果光功率不足以导致薄膜发生永久性变化，那么关闭光功率后，这些变化可以恢复。其次，它们的时间响应（通常为 10^{-3} s [51] 量级）远慢于超快三阶非线性光学过程的时间响应（通常为 10^{-15} s [34, 105] 量级）。最后，这些变化对 GO 薄膜中的平均光功率很敏感，因此容易被平均功率较高的连续波（CW）光触发。相比之下，对于峰值功率高但平均功率低的光脉冲，这些变化引起的 PDLL 并不明显 [51, 54]。

图4(b) – **(d)** 对比了 PDLL 引起的额外线性传输损耗

（Δ传播损耗$_{PDLL}$，即扣除**图4(a)**中相应的线性传输损耗后）与混合 GO-Si、GO-Si_3N_4, 和 GO-Hydex 波导中输入连续波光的平均功率之间的关系。对于所有混合波导，Δ传播损耗$_{PDLL}$ 均随 GO 薄膜厚度和平均功率的增加而增大，这反映出较厚的 GO 薄膜中光热变化更显著，尤其是在平均功率较高时。与 GO 层数 相同的 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导相比，GO-Si 波导的Δ传播损耗$_{PDLL}$ 高得多；这同样是因为其 GO 模场重叠更强，使 GO 薄膜中的功率更高。

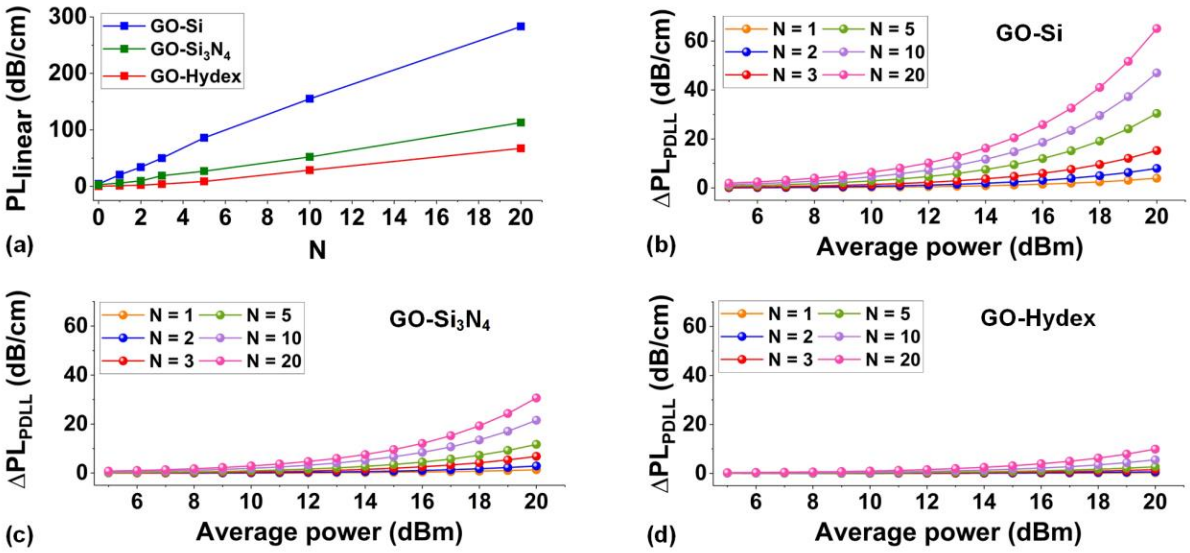

图4。（a）GO-Si、GO-Si_3N_4, 和 GO-Hydex 波导的线性传输损耗（PL_{linear}）随层数 N 的变化。（b）–（d）分别对于涂覆不同数量 GO 层的混合硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导，PDLL 引起的额外线性传输损耗（Δ传播损耗$_{PDLL}$）随输入连续波（CW）光平均功率的变化。

2.2 非线性光学性质

当材料与强度很高、达到原子间电场量级（即 10^5 – 10^8 V/m [106]）的外部光电场相互作用时，可能会表现出非线性光学响应，并伴随新颖现象，例如新频率的产生；或者其折射率 n 和消光系数 k 等线性光学参数会变得依赖于电场 [107]。在过去

十年间，二维材料优异的非线性光学性质得到了广泛研究与认可 [44, 45, 48, 108]。对于氧化石墨烯（GO）而言，其异质结构和可调带隙使其在多种非线性光学过程中表现出独特的非线性光学性质 [51, 52,54, 57]。

通常，材料的非线性光学性质包括二阶、三阶及更高阶响应，可用复数极化率张量 $\chi^{(i)}$ [2, 44] 描述，其中 i =2、3 等表示第i^{th}阶。本文聚焦于氧化石墨烯的三阶光学非线性，重点介绍氧化石墨烯薄膜的片上集成如何增强实部（$\chi^{(3)}$）和虚部（$\chi^{(3)}$）过程。对于二阶光学非线性，近期已有研究报道，氧化石墨烯因其非中心对称原子结构而具有较大的 $\chi^{(2)}$ 值 [109, 110], ，但其在芯片级器件中的应用仍处于起步阶段。因此，我们将在第6节讨论这方面的未来展望。

实部（$\chi^{(3)}$）过程（亦称参量过程 [2, 44]）包括四波混频（FWM）、自相位调制／交叉相位调制（SPM／XPM）和三次谐波产生（THG），在全光信号产生与处理中发挥着重要作用，其时间响应速度可达飞秒量级 [10, 111, 112]。**表1**还比较了相关材料的克尔系数（n_2）。氧化石墨烯的n_2 绝对值约比石墨烯低10倍，但仍远高于MoS_2, WSe_2, 和黑磷。另一方面，氧化石墨烯的n_2 比硅、Si_3N_4, 和Hydex高约4～5个数量级，因此，研究人员有动力将氧化石墨烯片上集成，以构建用于三阶非线性光学应用的混合集成器件。

对于某些过程，例如克尔非线性，由 Im($\chi^{(3)}$) 产生的项涉及

非线性光吸收，例如双光子吸收（TPA）、可饱和吸收（SA）或多光子吸收（MPA）[2, 44]。GO 相对较大的带隙使其在电信波段的 TPA 较低，有助于提高 Re（$\chi^{(3)}$）过程的效率 [2, 3]。与吸收随光强增加的 TPA 过程相反，SA 呈现相反的变化趋势，这是因为激发电子填入导带达到饱和，从而因泡利阻塞而阻止进一步跃迁 [49, 113]。在 **表1** 中，GO 的负 β 是由 SA 引起的，其源于 sp^2 畴的基态漂白 [56,114, 115]。GO 中的 SA 可用于锁模光纤激光器 [116-118] 和全光调制器 [105, 119]等应用。高光强下光吸收的漂白也有利于增强由 Re（$\chi^{(3)}$）产生的过程。与 **第2节.1** 中提到的光热变化相比，SA 是一种由峰值输入光功率决定的超快三阶非线性光学过程，因此更容易被峰值功率较高的光脉冲触发。对于峰值功率较低的高平均功率连续波光，SA 引起的损耗变化并不明显。

如**第2.1节**所述，氧化石墨烯的带隙可通过采用不同的还原方法来改变 [92, 93]。随着还原程度的提高，在氧化石墨烯向完全还原氧化石墨烯转变的过程中，观察到氧化石墨烯薄膜的折射率$_2$ 和 β 均发生符号反转 [55, 56]。 折射率$_2$ 和 β 的大动态可调范围，为调控含氧化石墨烯的非线性集成光子器件的性能提供了很大的灵活性。

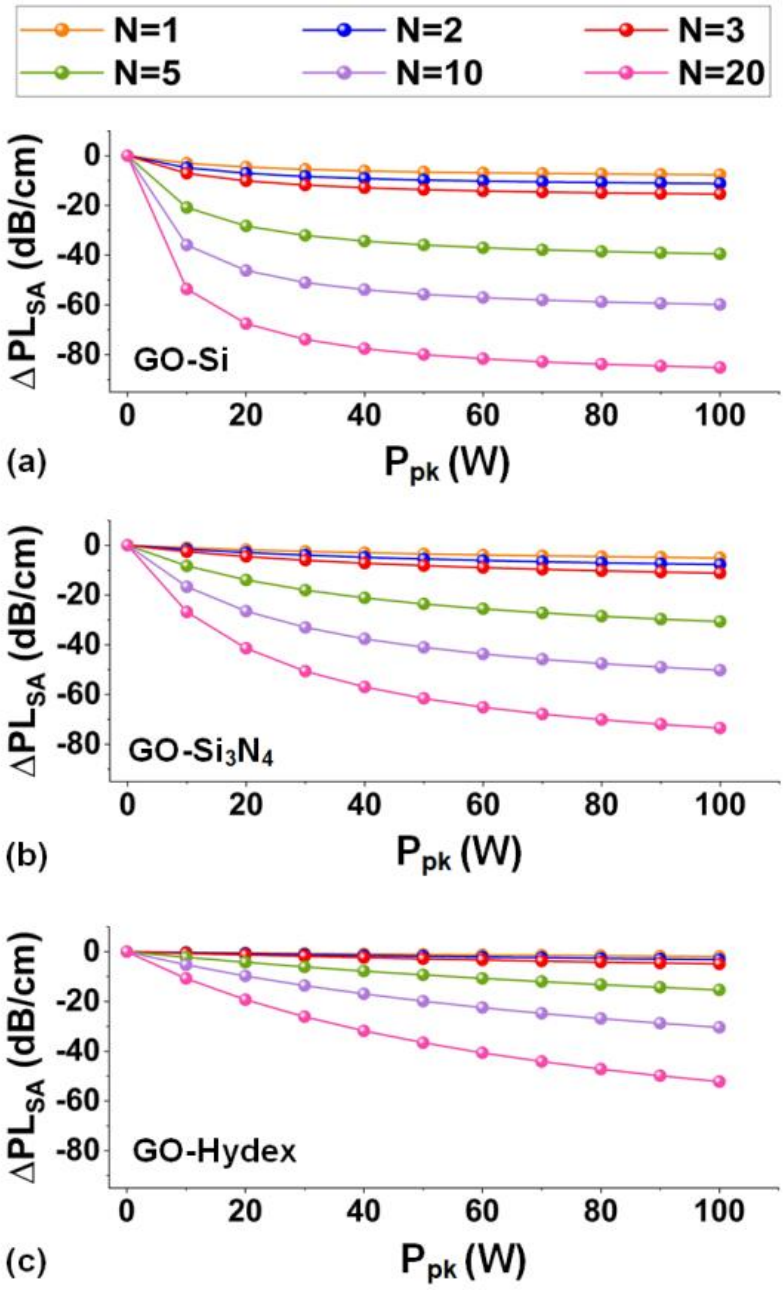

图5. SA 引起的额外传播损耗（ΔPL_{SA}）随输入光脉冲峰值功率（P_{pk}）的变化：（a）硅、（b）Si_3N_4, 和（c）涂覆不同数量 GO 层的 Hydex 波导。

图5(a)– (c)分别比较了混合 GO-Si、GO-Si_3N_4, 和 GO-Hydex 波导中，由氧化石墨烯的可饱和吸收（Δ传播损耗$_{SA}$，即扣除**图4(a)**中相应的线性传输损耗后）引起的额外传输损耗与光脉冲输入峰值功率（ P_{pk} ）之间的关系。对于所有混合波导，随着层数和输入峰值功率的增加，Δ传播损耗$_{SA}$ 变得更加显著，这反映出较厚氧化石墨烯薄膜中的可饱和吸收更加显著，且

在较高峰值功率下。与 **图4**中观察到的趋势类似，对于相同的氧化石墨烯层数，模式重叠较强的 GO-Si 波导的Δ传播损耗$_{SA}$ 高于 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导。

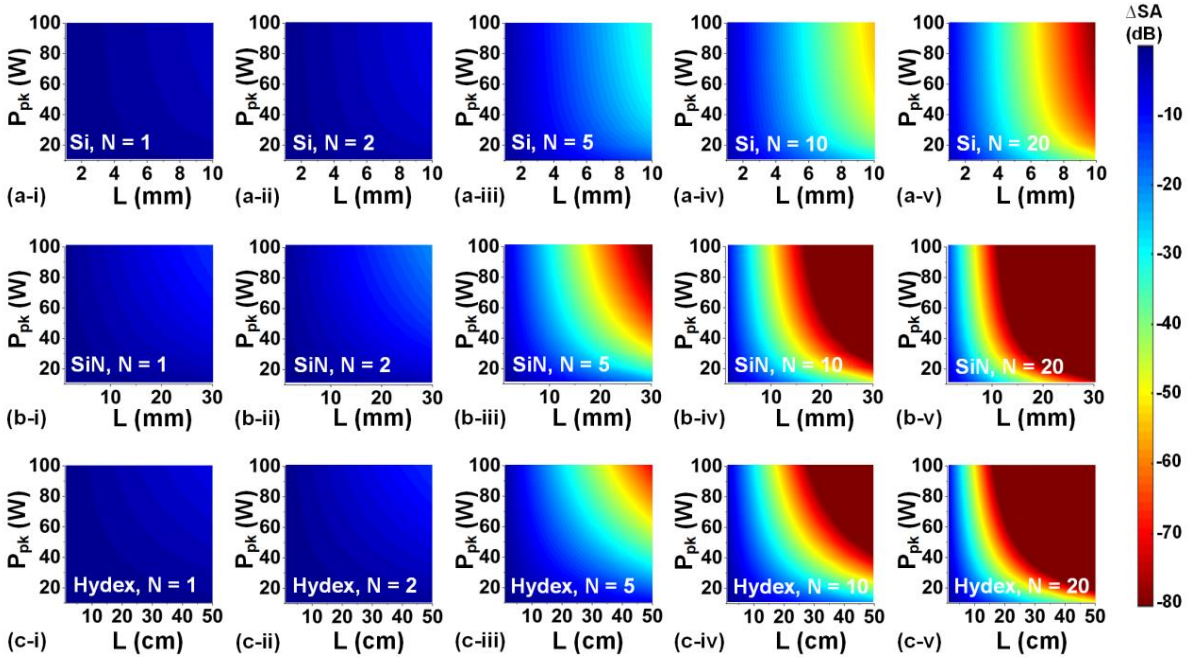

图6. 对均匀涂覆不同层数氧化石墨烯的混合集成（a）硅、（b）硅$_3N_4$, 和（c）Hydex 波导，展示由可饱和吸收（ΔSA）引起的额外插入损耗随输入光脉冲峰值功率（P_{pk}）和波导长度（L）的变化关系。(i)–(v)分别表示层数 N = 1、2、5、10 和 20 时的结果。

图6(a) – **(c)** 分别比较了均匀涂覆的 GO-Si、GO-Si_3N_4, 和 GO-Hydex 波导中，由可饱和吸收（Δ可饱和吸收）引起的总额外插入损耗（已扣除相应的线性插入损耗）随功率$_{pk}$ 和波导长度L的变化。每幅图均给出了 5 种不同 GO 层数的结果。为突出差异，**图6(a)** – **(c)**采用了不同的波导长度范围。可以看出，Δ可饱和吸收随 GO 层数和输入峰值功率的增加而增强，这与**图5**一致。此外，Δ可饱和吸收也随波导长度增加而增强，反映出较长波导中可饱和吸收引起的插入损耗差异更加显著。

3. 氧化石墨烯薄膜的片上集成

GO 独特的材料性质推动了其片上集成，以实现功能性混合集成器件[57, 120-122]。GO 简便的溶液法合成工艺及其与集成器件制造的高度兼容性，使其在实验室之外的工业制造中具备竞争优势；迄今为止，这对大多数二维材料而言仍是一项挑战。本节回顾了在芯片上集成 GO 薄膜的制备技术，分为 GO 合成、芯片上的薄膜涂覆和器件图案化。

3.1 GO合成

材料合成是将氧化石墨烯薄膜集成到芯片上的第一步。与在水中溶解度极低的石墨烯不同，氧化石墨烯可分散于水性溶剂和极性溶剂中，因此能够通过溶液法合成材料。Brodie法 [123] 和 Hummer法 [124] 是两种基本的 GO合成方法，历史悠久，且均在最初提出的方法基础上经过了改进 [58, 125]。**图7(a)** 和 **(b)**展示了这两种方法的示意图。Brodie法通过发烟硝酸（HNO_3）和氯酸钾（$KClO_3$）处理石墨，使含氧官能团附着于石墨（**图7(a)**）；Hummer法则通过高锰酸钾（$KMnO_4$）和硫酸（H_2SO_4）处理石墨来实现氧化（**图7(b)**）。与 Brodie法相比，Hummer法操作更简便，且与 CMOS 制造技术的兼容性更好。**图7(c)** 和 **(d)**展示了另外两种在氧化石墨烯领域广为人知的 GO合成方法： Staudenmaier 法和 Hofmann 法。这两种方法都是 Brodie法的改进，略微

调整了操作流程，旨在制备高度氧化的氧化石墨烯 [126, 127]。前者使用浓发烟 HNO_3 和 H_2SO_4 的混合物，随后加入 $KClO_3$,；后者则将浓 HNO_3 与浓 H_2SO_4 和 $KClO_3$结合使用。此外，研究人员还提出了一些改进的 Hummer法 [58, 128],，通过调整 $KMnO_4$ 和 H_2SO_4的用量来提高氧化效率，进而提升氧化程度。

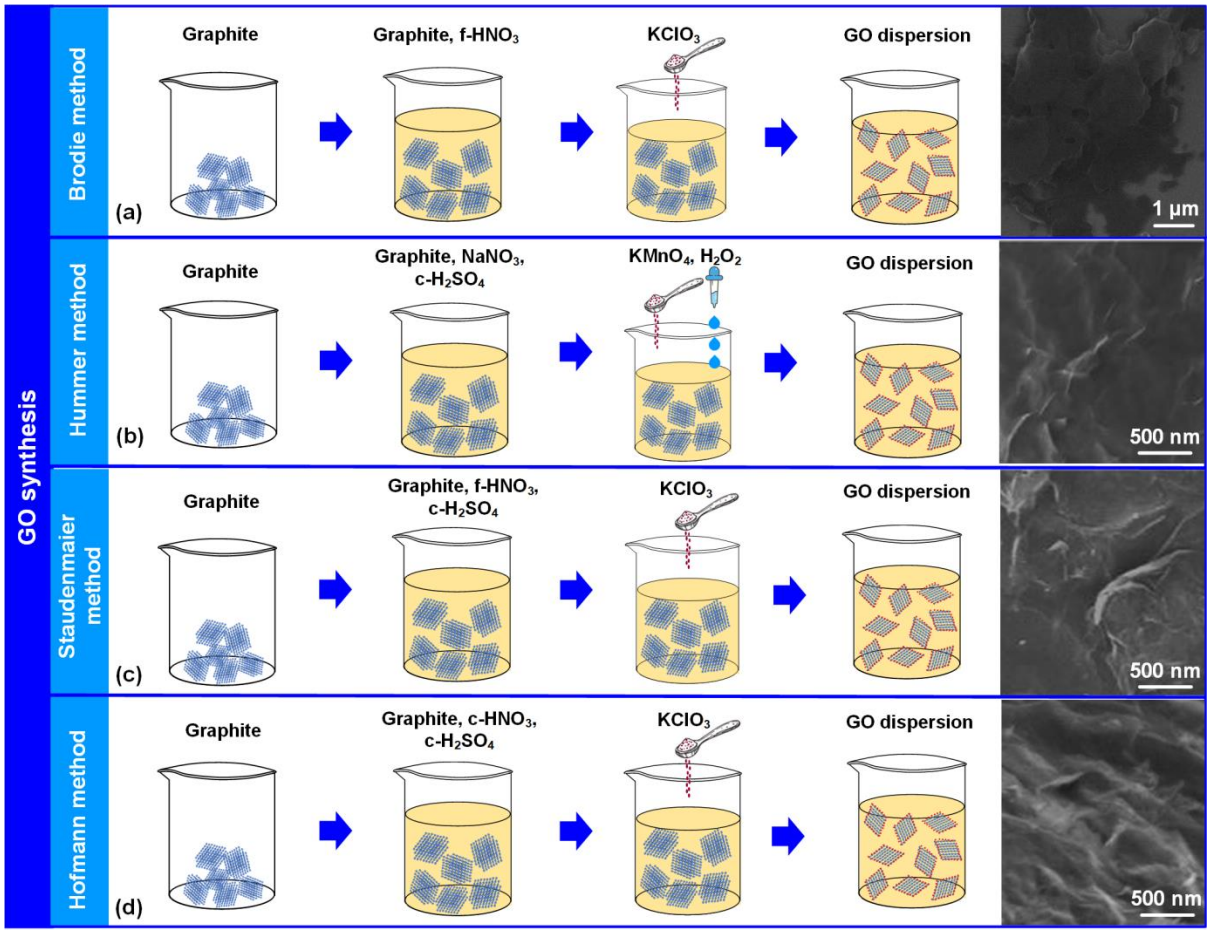

图7。典型氧化石墨烯合成方法示意图：(a) Brodie法，(b) Hummer法，(c) Staudenmaier 法和 (d) Hofmann 法。c-：浓缩。f-：发烟。在 (a)–(d) 中，每行右侧的图展示了制备完成的样品。图 (a) 中的样品图片经许可转载。[125] 版权归 2013 爱思唯尔有限公司所有。图 (b)–(d) 中的样品图片经许可转载。[129]版权归 2014 Wiley-VCH 所有。

上述方法可以大量制备含有高浓度含氧官能团的剥离的氧化石墨烯片层，这些片层很容易解离成更小的片片。氧化石墨烯片的横向尺寸（通常从几十纳米到几十微米不等）和厚度

（通常为纳米量级）可通过改变混合或超声处理参数来控制。由大尺寸（>10 μm）片片组成的氧化石墨烯薄膜，在电导率/热导率以及机械性能/筛分能力方面表现更佳；而由小尺寸片片制成的氧化石墨烯薄膜，则更适合在具有复杂结构的基底上实现共形涂覆，尤其适用于特征尺寸处于微米或纳米尺度的集成器件。

3.2 芯片上的薄膜涂覆

第二步是将氧化石墨烯薄膜涂覆到集成芯片上。与石墨烯和过渡金属二硫族化合物片上集成所采用的复杂薄膜转移工艺不同，氧化石墨烯薄膜可通过溶液法涂覆，无需任何转移工艺。**图 8**展示了两种典型氧化石墨烯薄膜涂覆策略的示意图——溶液滴涂和自组装。这两种方法均适用于Brodie法和Hummer法，也适合大规模制造，但二者仍存在差异，尤其是在薄膜均匀性和厚度方面。

溶液滴加法主要包括滴铸[130] 以及旋涂或喷涂[131, 132], ，能够以简单、快速的方式在大面积范围内直接涂覆氧化石墨烯薄膜。这些方法的主要步骤包括溶液制备、溶液滴加和干燥（**图 8(a)**）。相对较低的薄膜均匀性和较大的薄膜厚度是这些方法的主要局限，这使得难以在集成波导上实现薄膜共形涂覆。由此产生的典型薄膜不均匀性为 > 10 纳米，典型薄膜厚度为> 100 纳米[101, 133]。

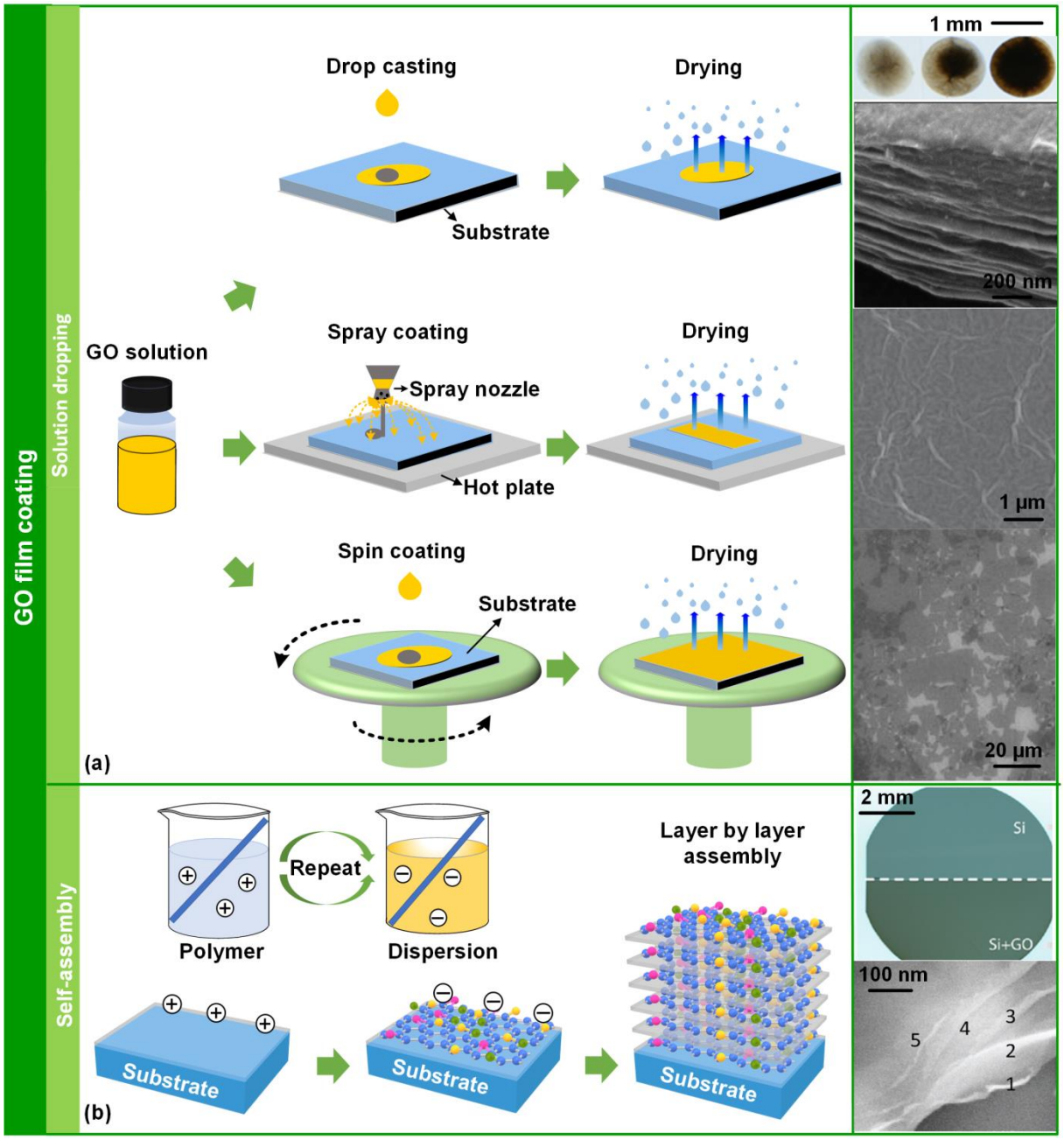

图 8。氧化石墨烯薄膜涂覆典型方法的示意图：(a) 溶液滴涂和 (b) 自组装。在 (a) 和 (b) 中，每行右侧的图像展示了制备完成后的样品。(a) 中的样品图像经许可转载。[101] 版权 2014，OSA 出版社 [134] 版权 2018年，爱思唯尔有限公司，以及 [132] 版权 2010，美国化学会。(b) 中的样品图像经许可转载。[63] 版权 2019 年，美国化学会。

与溶液滴加法相比，自组装方法既能实现较高的薄膜均匀性（< 1 纳米[63]），又能实现较小的薄膜厚度（最低可达二维单层的厚度[57]）。**图 8(b)**展示了自组装的工艺流程。首先，由.....组成的氧化石墨烯溶液

制备通过Brodie法或Hummer法合成的带负电荷的二维氧化石墨烯纳米片。其次，将表面带负电荷的目标集成芯片浸入含有带正电荷的水溶性聚合物的溶液中，得到表面带正电荷的聚合物涂层集成芯片。最后，将该聚合物涂层集成芯片浸入预先配制的氧化石墨烯溶液中，通过静电力在其顶面形成氧化石墨烯单层。重复上述步骤，即可在集成芯片上逐层涂覆氧化石墨烯薄膜，并实现高可扩展性以及对层数或薄膜厚度的精确控制。强静电力还能使薄膜共形涂覆于复杂结构（例如线状波导和光栅）上，并实现较高的薄膜均匀性。此外，与涂覆面积受剥离二维薄膜的横向尺寸限制的薄膜转移方法不同，[135, 136], 自组装方法的薄膜涂覆面积仅受基底和溶液容器尺寸的限制，因此特别适用于大面积薄膜涂覆。通过等离子体氧化，可以轻松去除涂覆在集成器件上的氧化石墨烯薄膜，从而实现集成芯片的回收利用，并重新涂覆新的氧化石墨烯薄膜。

3.2 器件图案化

器件图案化对于先进集成器件功能的设计至关重要。在**图9**中，我们总结了用于氧化石墨烯薄膜图案化的典型方法，包括喷墨打印、激光直写、光刻后剥离、预图案化和纳米压印。所有这些方法都具有应用于工业制造的巨大潜力，且各自在特定应用中具有优势。在**表2**中，我们比较了不同的氧化石墨烯薄膜图案化方法。

喷墨打印是一种简单、快速的氧化石墨烯薄膜图案化方法，可同时实现薄膜涂覆和图案化。它与溶液滴涂法兼容，通常用于在大面积上制备图案，其分辨率相对较低，约为微米量级 [137, 138]。**图9(a)**展示了工艺流程，其中需要在打印前配制专用墨水溶液。打印过程包括形成单个液滴射流、滴铸和液滴干燥，与溶液滴加法类似；图案的形状和位置通常由程序控制。

表2。 各种氧化石墨烯薄膜图案化方法的比较。

技术	分辨率	速度	预制 a)	抗蚀剂	无蚀刻	参考文献
喷墨打印	> 1 μm	Fast	No	No	Yes	[137, 138]
激光直写	> 300 纳米	中等	No	No	Yes	[96, 139]
光刻与剥离 off	— b)	Fast	Yes	Yes	No	[54, 57]
预图案化	> 200 纳米	Fast	Yes	No	Yes	[140]
纳米压印	10 – 100 纳米	中等	Yes	Yes	No	[141]

a)这包括预制掩模、模具和基底。b)图案化分辨率通常为数纳米至数百纳米，具体取决于光刻所用的光波长。

激光直写是一种一步式、非接触、无掩模的薄膜图案化方法，已广泛用于聚合物 [142, 143], 金属表面 [144, 145], 和二维材料 [146, 147]的图案化。**图 9(b)**展示了利用激光直写对氧化石墨烯薄膜进行图案化的工艺流程。激光光源可以是连续波或脉冲激光器，并使用物镜聚焦激光束。激光直写涉及氧化石墨烯还原、热熔融／升华和结构 重组等复杂过程，最终会导致氧化石墨烯薄膜局部减薄或烧蚀

其程度取决于激光功率。激光直写既可用于对通过溶液滴涂沉积的厚膜进行图案化，也可用于对通过自组装制备的薄膜进行图案化。图案化分辨率主要由聚焦激光束的光斑尺寸决定，光斑尺寸通常从几微米到数百纳米不等 [148]。

光刻后进行剥离是另一种广泛使用的氧化石墨烯薄膜图案化方法 [54, 57]。与同时进行图案化和蚀刻的激光写入不同，光刻首先利用集成电路产业中成熟的技术（如光刻和电子束光刻）在光刻胶上形成图案。随后，通过常用于制备集成金属电极的剥离工艺，将图案转移到沉积在光刻胶上的氧化石墨烯薄膜上（图9(c)）。与通过溶液滴涂形成的氧化石墨烯薄膜相比，自组装形成的薄膜与基底之间具有更强的附着力，这得益于静电力，因此剥离效果更好。图案化分辨率由光刻分辨率和薄膜特性共同决定。对于可见光、紫外和深紫外（DUV）光刻，图案化分辨率主要受光刻分辨率限制（通常为 > 300 纳米），远大于剥离氧化石墨烯纳米片的尺寸（通常为 ~50 纳米）。对于图案化分辨率更高的电子束光刻（通常为 ~100 纳米），GO薄膜厚度和片层尺寸的影响会更加显著，尤其是在最小特征尺寸为 < 150 纳米时 [57]。

将氧化石墨烯薄膜直接涂覆到预图案化结构上，或进行预图案化，是一种能够实现大面积氧化石墨烯薄膜图案化的简单方法。该方法依赖于预先加工目标基底以形成图案，并共形涂覆氧化石墨烯薄膜（**图9(d)**），因此适用于自组装氧化石墨烯薄膜 [140]。预图案化通常用于批量生产重复的

图案。与光刻后进行剥离类似，当预图案化结构的最小间隙宽度为 > 300 纳米时，图案化分辨率主要受其限制；当其为 < 150 纳米时，则主要受 GO 薄膜厚度和片层尺寸的限制。

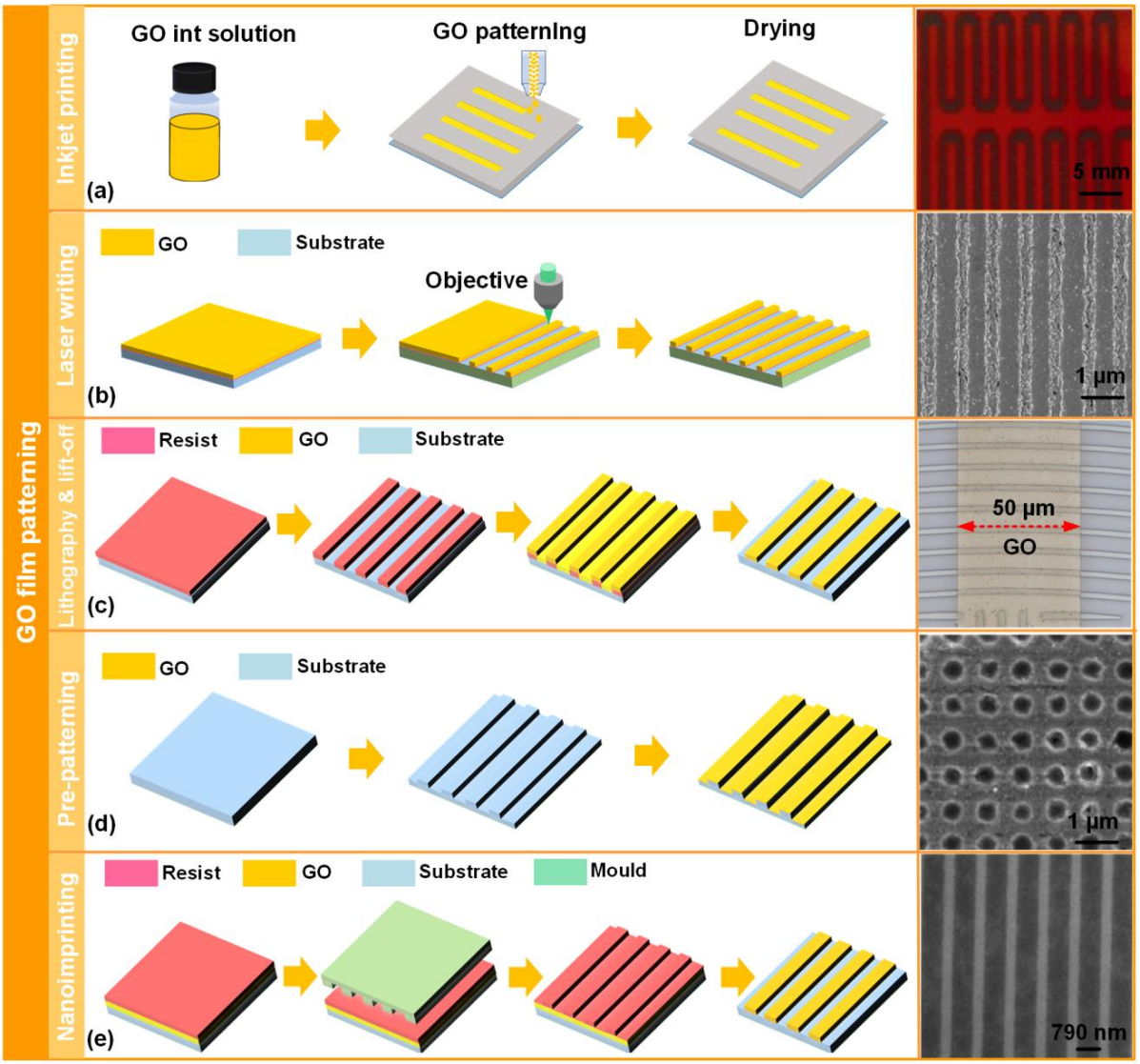

图9。氧化石墨烯薄膜图案化典型方法的示意图：(a) 喷墨打印，(b) 激光直写，(c) 光刻与剥离，(d) 预图案化，以及 (e) 纳米压印。在 (a)–(e) 中，每行右侧的图展示了制备完成后的样品。 (a)–(e) 中的样品图均经许可转载。[149]版权 2011年 施普林格·自然。，[120] 版权 2019年，施普林格·自然，[54] 版权 2020年，Wiley-VCH，[140]版权 2020年，施普林格·自然，以及 [150] 版权 2011年 美国真空学会。

纳米压印是一种薄膜图案化方法，可实现极高的图案化分辨率（例如低至 ~10 纳米 [151]）。与先进行光刻再剥离的方法类似，这种方法也需要先对光刻胶进行图案化，然后再将图案转移到氧化石墨烯薄膜上。它不使用光刻

或电子束光刻，而是采用预制的压印模具对光刻胶进行图案化（**图9(e)**）。要制作不同的图案，需要使用不同的模具，因此这种方法主要用于制作相对简单且重复的图案[141]。

最后值得一提的是，图**7 – 9** 中用于集成氧化石墨烯薄膜的制备技术并不局限于非线性集成光子器件，而是具有普适性，可用于制造其他集成光子器件，例如偏振器[57, 152]，透镜[153, 154]，和传感器[155, 156]，，也可用于制造集成电子器件，例如场效应晶体管[155, 157]，超级电容器[158, 159]，和太阳能电池[160, 161]。对于非线性集成光子器件，自组装方法比溶液滴加法应用更广泛，这主要是因为自组装方法能够实现较高的薄膜均匀性和较小的薄膜厚度，从而降低薄膜损耗；而低薄膜损耗有利于增强四波混频和自相位调制等非线性光学过程。

4. GO混合集成器件中的增强非线性光学

氧化石墨烯具有较强的光学非线性和较低的损耗，加上其 便于实现大规模、高精度片上集成的制备工艺，使许多具有优异非线性光学性能的混合集成器件得以实现[51-54, 110, 162]。本节将概述采用氧化石墨烯的先进非线性集成光子器件。

作为典型的三阶过程，四波混频已广泛应用于全光信号生成、放大和处理[6, 24, 163-165]。首次利用 Hydex 波导展示了 GO混合集成器件中的增强四波混频[53]，：对均匀覆盖 1 – 5 层氧化石墨烯的 1.5 cm 长波导进行了四波混频测量，其中覆盖 2 层氧化石墨烯的器件实现了最高 6.9 分贝的净转换效率（CE）提升

（**图 10(a)**）。

随后，研究人员在带有图案化氧化石墨烯薄膜的 Hydex微环谐振器（MRRs）中实现了增强的四波混频 [54]。得益于微环谐振器中的谐振增强，带有图案化薄膜（含 50 层 GO）的微环谐振器实现了最高 10.3 分贝的转换效率增强（**图 10(b)**）。基于四波混频测量，还分析了氧化石墨烯薄膜的折射率n_2 随层数和光功率的变化，发现其从二维材料向类体材料行为演变的过程中呈现出有趣的趋势。在实验演示之后，文献 [166], 进行了详细的理论分析和优化，结果表明，通过优化微环谐振器的 GO 涂层长度和耦合强度，转换效率增强最高可达 18.6 分贝。

研究人员还在 GO-Si_3N_4 波导中实现了增强的四波混频 [51], ，并对具有不同 GO 薄膜长度和厚度的 GO 涂覆平坦化 Si_3N_4 波导进行了四波混频测量；带有 1.5 毫米长图案化薄膜（含 5 层 GO）的器件实现了最高 9.1 分贝的转换效率提升（ ）（**图 10(c)**）。与未涂覆和均匀涂覆的器件相比，该图案化器件还展现出更宽的转换带宽。文献 [102], 详细分析了 GO 薄膜参数和 Si_3N_4 波导几何结构的影响，结果表明，转换效率增强还可进一步提高至 20.7 分贝，转换带宽最多可提升 4.4 倍。

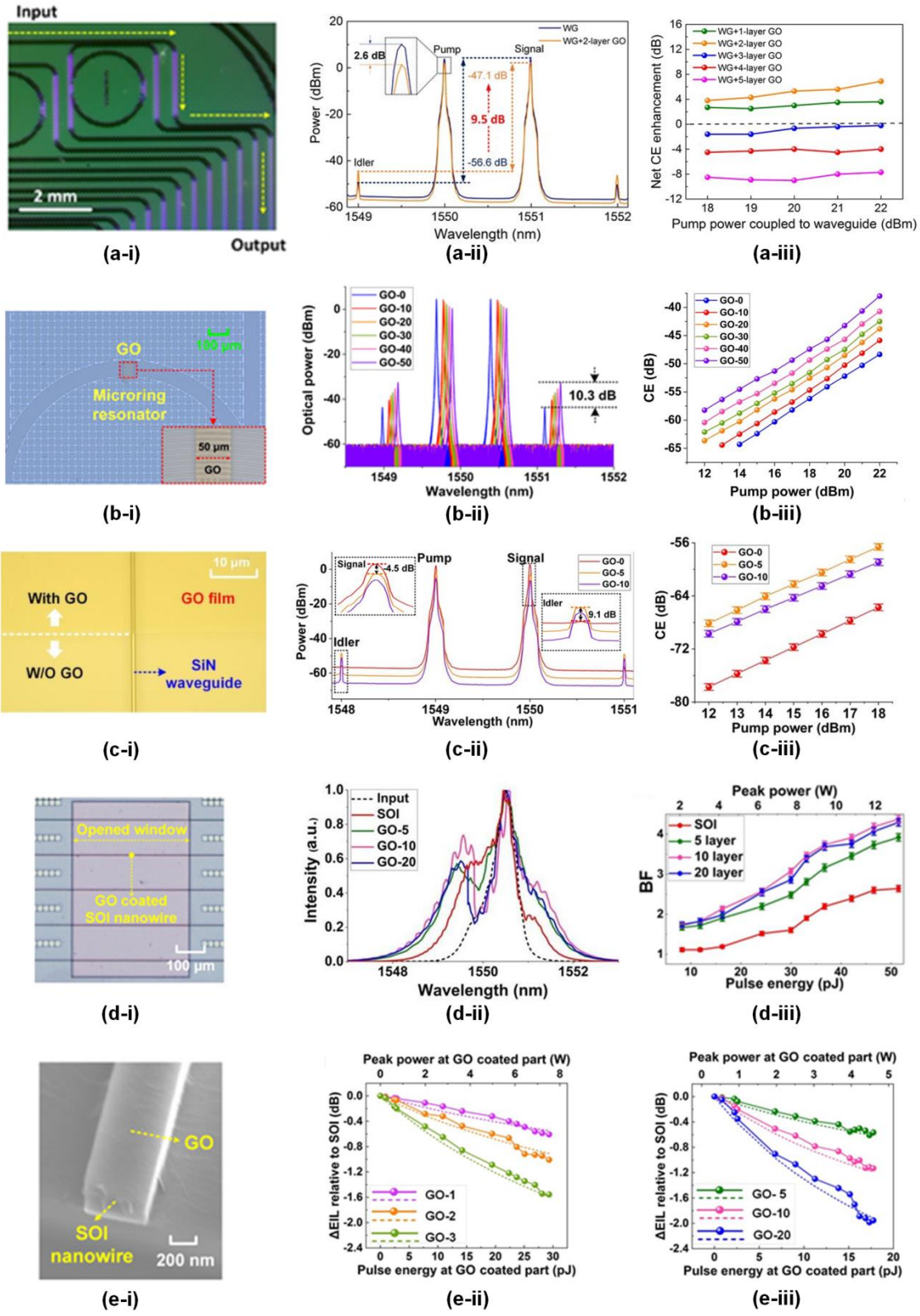

图10。 (a) GO涂层Hydex波导中的增强型四波混频（FWM）。(b) GO涂层Hydex微环谐振器（MRRs）中的增强型四波混频。(c) GO涂层硅$_3$氮$_4$波导中的增强型四波混频。(d) GO涂层硅波导中的增强型自相位调制（SPM）。(e) GO涂层硅波导中的强可饱和吸收（SA）。在(a) – (d)中，(i)显示了集成GO的制备器件的显微图像，(ii)显示了裸器件和GO涂层器件的实测四波混频或自相位调制光谱，(iii)显示了四波混频转换效率（CE）

相对于输入泵浦功率，或对于（ii）中的器件，相对于输入脉冲能量的光谱展宽因子（带宽）。在（e）中，（i）展示了硅波导表面的扫描电子显微镜（SEM）图像，该波导共形涂覆了1层GO。（ii）和（iii）展示了相对于裸硅波导的功率相关额外插入损耗（ΔEIL）随脉冲能量的变化。（a）经许可转载。[53] 版权所有© 2018年，AIP出版社。 （b）经许可转载。[54] 版权所有© 2020年，Wiley-VCH。（c）经许可转载。[51] 版权所有© 2020年，Wiley-VCH。（d）和（e）经许可转载。[52] 版权所有© 2020年，美国化学会。

SPM是另一种基础的三阶过程，广泛应用于宽带光源、脉冲压缩、频率计量和光学相干断层扫描[167, 168]。已有研究报道了氧化石墨烯-硅波导中的增强SPM[52], , 其中针对共形涂覆有不同长度和厚度氧化石墨烯薄膜的硅线波导进行了SPM测量。观察到皮秒光脉冲通过这些波导后发生显著的光谱展宽，涂覆10层GO的器件的最大展宽因子（带宽因子）达到4.34（**图 10(d)**）。与裸硅波导相比，涂覆氧化石墨烯薄膜使混合波导的有效非线性品质因数（FOM）提高了最多20倍。根据基于实验结果的理论计算[103], , 通过优化氧化石墨烯薄膜参数和硅波导几何结构，最大展宽因子可达27.8。除了增强SPM外，还观察到氧化石墨烯包覆硅波导中存在强烈的可饱和吸收（SA），表现为随着脉冲能量增加，测得的相对于裸硅波导的额外插入损耗降低（**图10(e)**）。研究还发现，氧化石墨烯薄膜较厚的混合波导表现出更明显的可饱和吸收，但代价是线性损耗更高。

5. 不同氧化石墨烯集成平台的比较

如第4节所述，集成了GO的硅、硅$_3$氮化物$_4$, 和Hydex器件均实现了增强的非线性光学响应。本节将详细比较这些集成平台的非线性光学性能。我们比较

了氧化石墨烯涂覆硅、硅$_3$氮化物$_4$, 和Hydex波导中利用连续波光进行的四波混频，以及利用光脉冲进行的自相位调制诱导的光谱展宽。我们采用通过实验测量获得的材料参数[51–53]，根据参考文献[169–172], 中的理论计算四波混频和自相位调制性能参数，并考虑了氧化石墨烯薄膜中由光热变化和可饱和吸收引起的损耗变化。此外，还比较了不同氧化石墨烯混合波导的非线性品质因数。

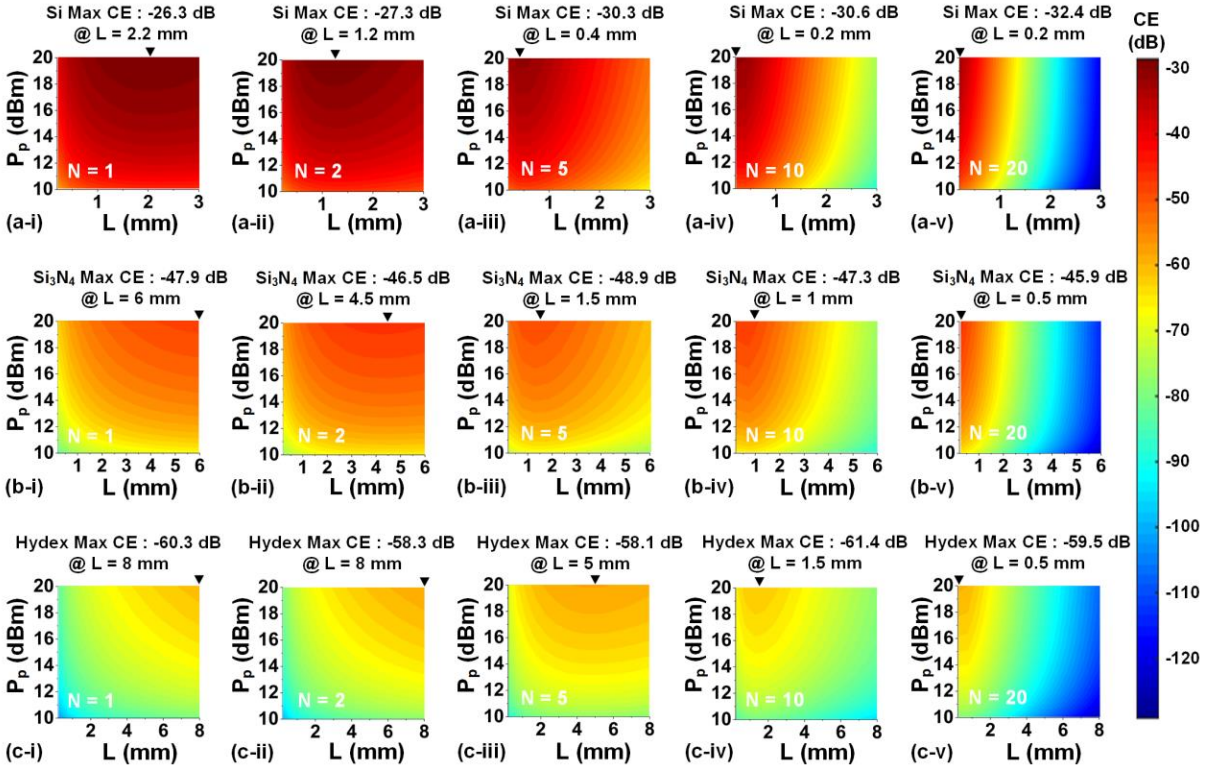

图 11. 均匀覆盖不同数量 GO 层的混合型 (a) 硅、(b) 硅$_3$氮化硅$_4$, 和 (c) Hydex 波导的四波混频转换效率随波导长度 (L) 和泵浦功率 (P_P) 的变化。(i)–(v) 分别显示 N = 1、2、5、10 和 20 层时的结果。

图11 展示了均匀涂覆氧化石墨烯薄膜的混合硅、硅$_3$N$_4$, 和 Hydex 波导中，四波混频转换效率随波导长度 L 和泵浦功率 P_p 的变化关系。与**图6**类似，我们展示了5种不同 GO 层数（即N = 1、2、5、10、20）下的结果。对于每种混合波导，转换效率均随P_P增加；随L变化时，则先增加后减小，并在中等波导长度处达到最大值。随着层

数*N*增加，对应最大转换效率的*L*会减小。这些趋势反映了混合波导中三阶非线性增强与传播损耗增加之间的权衡：当*N*和*L*相对较小时，前者占主导；而随着*N*和*L* 增加，后者的影响会愈发明显。对于*N*相同的波导， GO-Si 波导的转换效率远高于 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导，尽管其波导长度更短。这主要是因为与硅$_3N_4$和 Hydex 相比，硅具有更大的三阶光学非线性。

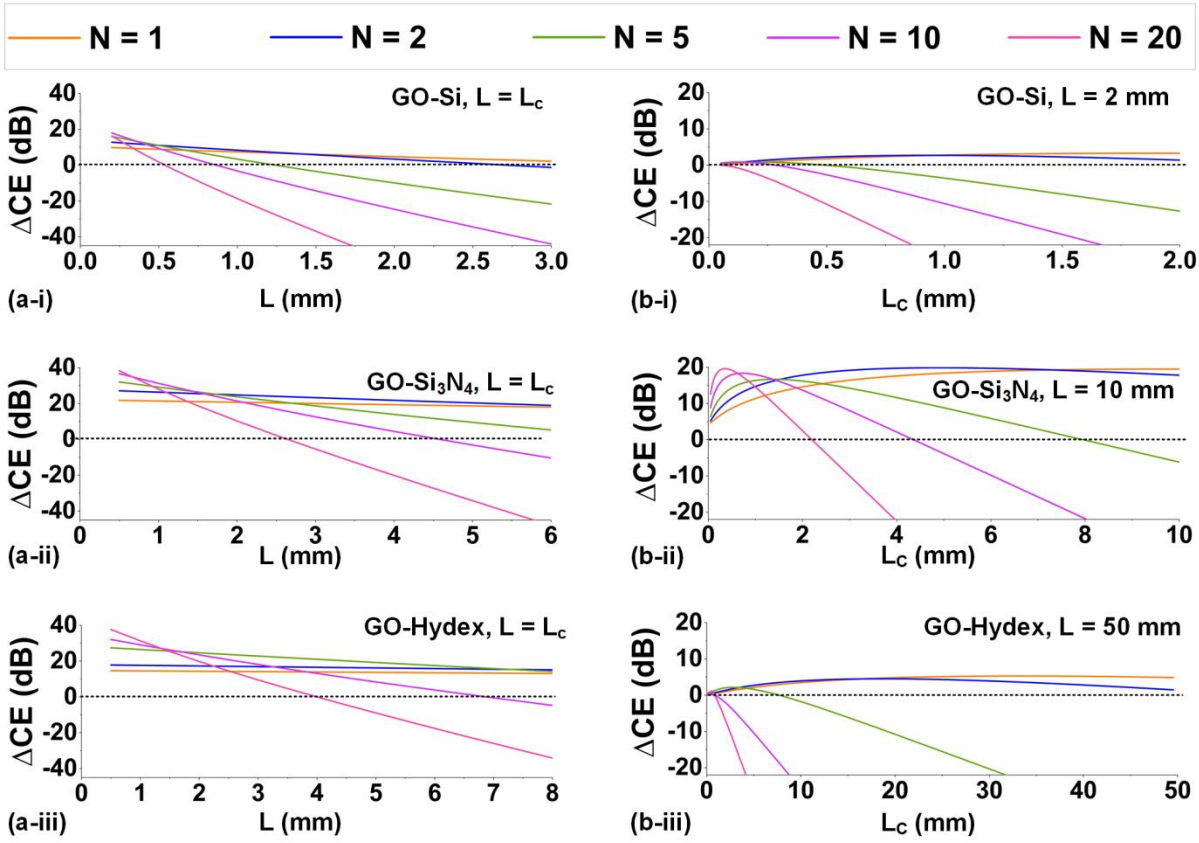

图 12. (a) 均匀涂覆不同层数 GO 层的混合硅、硅$_3$氮$_4$, 和 Hydex 波导的四波混频转换效率增强与波导长度（*L*）的关系。(b) 图案化不同层数 GO 层的混合硅、硅$_3$氮$_4$, 和 Hydex 波导的四波混频转换效率增强与 GO 涂层长度（L_c）的关系。未涂覆的硅、硅$_3$氮$_4$, 和 Hydex 波导的长度分别为*L* = 2 毫米、*L* = 10 毫米和*L* = 50 毫米。假设图案化 GO 薄膜从波导起始处开始涂覆。

Figu图 12 比较了混合波导相对于 th 的转换效率增强（Δ转换效率） e

未涂覆波导。在**图 12(a)**中，我们展示了均匀涂覆

氧化石墨烯薄膜的波导结果。对于所有这些混合波导，转换效率增强会随波导长度 L 增加而降低，这反映了较短的波导长度可带来更高的转换效率增强。对于涂覆较厚氧化石墨烯薄膜的波导，尽管其初始转换效率增强（在 L 较小时）更高，但会随 L 增加而更快降低，因此转换效率增强为正值的 L 范围会缩小。图 12(b) 展示了图案化 GO 薄膜波导的相应结果，其中未涂覆波导的长度固定为 L，而氧化石墨烯薄膜涂覆长度 L_c 从 0 变化到 L。与图 11 中转换效率和 L 的关系类似，转换效率增强在中间某个 L_c 处达到最大值，而对应于最高 Δ转换效率的 L_c 会随 GO 层数 N 增加而减小。这同样是 [illegible] 损耗之间权衡的结果。GO-Si 波导的转换效率增强低于 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导，这与图 11 中 GO-Si 波导实现了更高转换效率的情况相反。这反映了这些 GO 混合集成波导在实现较高相对转换效率增强与较高总体 CE 之间存在有趣的权衡。

图 13 展示了 光脉冲沿着均匀涂覆氧化石墨烯薄膜的混合硅、硅$_3$氮化硅$_4$, 和 Hydex 波导传播时，自相位调制引起的光谱演化。为便于比较，我们展示了不同波导在强度衰减为 -20 dB 时的带宽因子（即 带宽因子$_{-20dB}$）以及对应的传输长度（L_P）。对于每种混合波导，带宽因子$_{-20dB}$随 GO 层数N增加而先增大后减小，在中等薄膜厚度时达到最大光谱展宽。随着N 增加，L_p 减小，光脉冲在更短的传输长度后便消失，这反映出对于长度较长或氧化石墨烯薄膜较厚的波导，损耗增加的影响大幅主导其性能。与**图 11**类似，较大的三阶

硅的光学非线性使 GO-Si 波导即使长度更短，其光谱展宽也远比可比的 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导显著。与 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导中对称的光谱演化不同，GO-Si 波导中的光谱演化略有不对称，这是由硅中的自由载流子效应造成的。

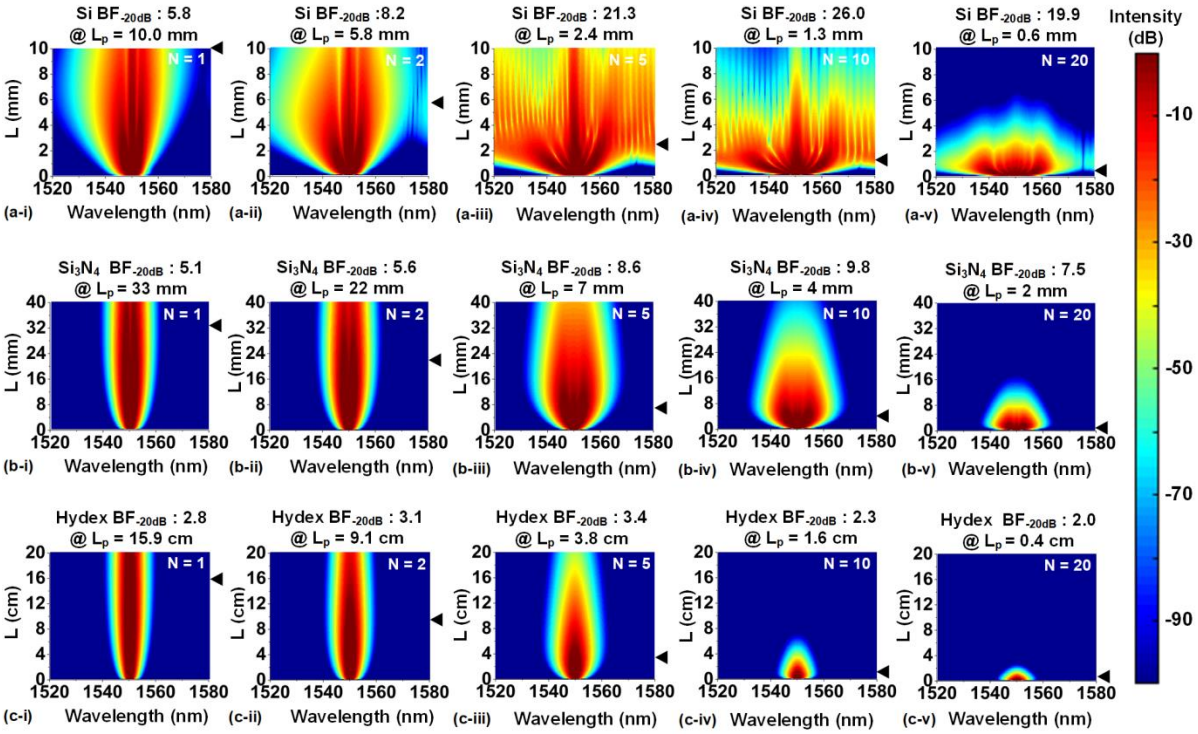

图 13. 不同数量氧化石墨烯层均匀涂覆的混合型 (a) 硅、(b) 硅$_3N_4$, 和 (c) Hydex 波导中，由自相位调制引起的脉冲频谱演变。(i)–(v) 分别显示了 $N = 1$、2、5、10 和 20 时的结果。输入光脉冲的半高全宽 (FWHM) 和峰值功率分别为 3.9 ps 和 30 W。

图 14(a)比较了均匀涂覆氧化石墨烯薄膜的混合硅、硅$_3N_4$, 和 Hydex 波导的相对带宽因子（相对 *BF*）随波导长度（*L*）的变化，其中相对 *BF*定义为混合波导的带宽因子与未涂覆波导的带宽因子之比。请注意，此处的带宽因子对应波导输出端的值，这与带宽因子$_{-20dB}$ 在**图 13**中的定义不同。对于氧化石墨烯薄膜较厚的 GO-Si 和 GO-Si_3N_4 波导（$N \geq 5$），最大相对 *BF*出现在中等*L*处； 而对于这些氧化石墨烯薄膜较薄的波导以及所有

GO-Hydex 波导，相对 *BF*随*L*单调增加。 这与**图 13**中三阶非线性和损耗之间的权衡一致。 **图 14(b)**比较了图案化氧化石墨烯薄膜波导的相对 *BF*随 GO 涂层长度（L_c）的变化，其中未涂覆波导的长度固定为*L*， 而L_c 在 0 到*L*之间变化。与**图 14(a)**中的趋势类似， 当$N \geq 5$时，GO-Si 和 GO-Si_3N_4 波导的最大相对 *BF*也出现在中等L_c 处。与**图 13**中 GO-Si 波导获得的较高带宽因子相反，其相对 *BF*低于 GO-Si_3N_4 波导；这类似于获得较高相对转换效率增强与较高总体 CE 之间的权衡

图 11 和 **12**。

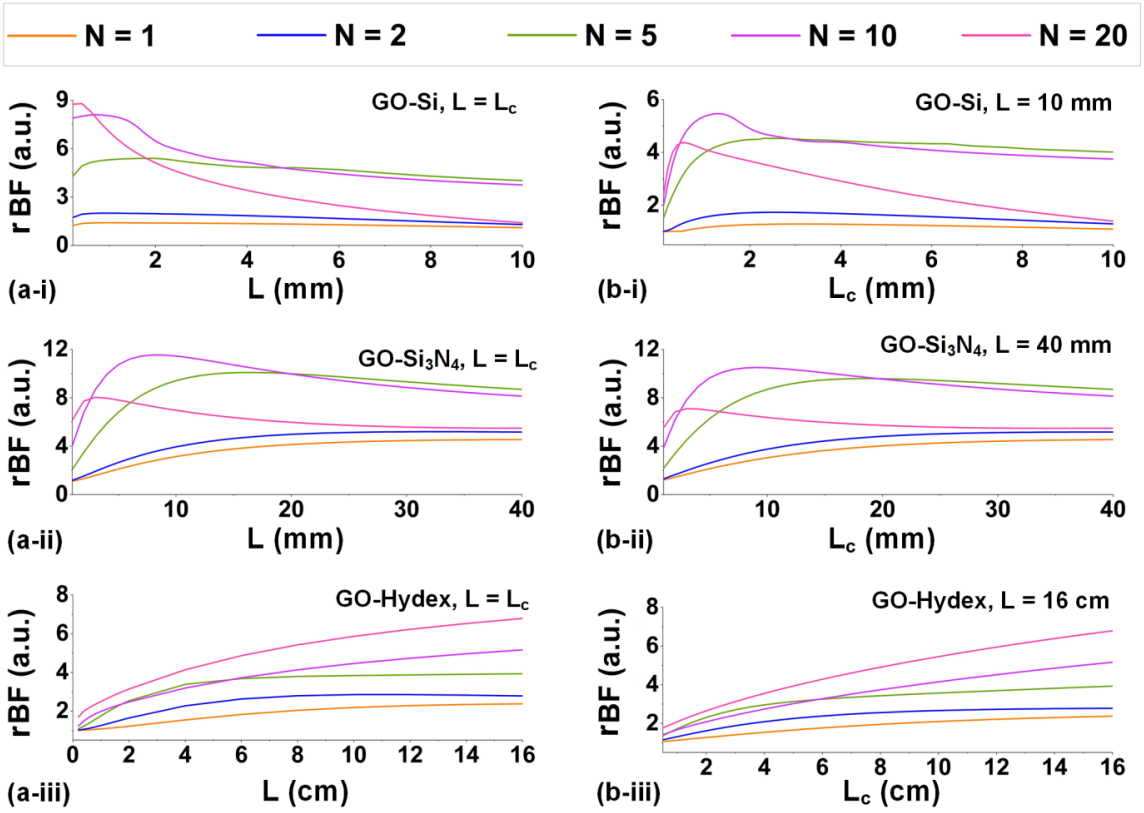

图 14。 (a) 不同 GO 层数均匀涂覆的混合硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导的自相位调制诱导的相对带宽因子（相对 *BF*）随波导长度（*L*）的变化。(b) 不同 GO 层数图案化的混合硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导的相对 *BF*随 GO 涂层长度（L_c）的变化。未涂覆的 Si、Si_3N_4, 和 Hydex 波导的长度分别为$L = 10$ 毫米、$L = 40$ 毫米和$L = 16$ 厘米。假设图案化 GO 薄膜从波导起始处开始涂覆。(a) 和 (b) 中输入光脉冲的参数与图 13 中相同。

在表 3 和图15中，我们定量比较了 GO-Si、GO-Si_3N_4, 和 GO-Hydex 波导的非线性性能，同时给出了相应裸集成波导的结果。我们计算了两个品质因数，即 FOM_1 和 FOM_2, ，它们被广泛用于比较非线性光学性能。FOM_1 根据非线性吸收[2, 3], 定义，相应结果见表 3。它随 GO层数 N 的增加而增大，而 GO-Si 波导的 FOM_1 低于可比的 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导。前者源于三阶光学非线性的增强，后者则是由于硅具有较强的双光子吸收。FOM_2 基于三阶光学非线性与线性损耗 [173]之间的权衡定义。它是波导长度 L 的函数，由 $FOM_2 = \gamma \times L_{eff}$给出，其中 $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_L \times L)]/\alpha_L$ 是有效相互作用长度，γ 和 α_L 分别表示波导非线性参数和线性损耗衰减系数。图 15(a) 和 (b) 分别显示了均匀涂覆 1 层和 10 层 GO 的混合硅、硅$_3N_4$, 和 Hydex 波导中 L_{eff} 和 FOM_2 随 L 的变化。这里选取了不同的 L 范围，同时也展示了裸波导（即 N =0）的结果。对于所有这些混合波导，FOM_2 在 L 较小时首先随 L 快速增大，随后随着 L 进一步增加而逐渐缓慢增大。当 L 较小时，混合波导的 FOM_2 低于相应未涂覆波导的 FOM；而当 L 足够大时，未涂覆波导的 FOM_2 逐渐接近甚至超过混合波导的 FOM。这表明，随着 L 增大，线性损耗增加所带来的负面影响变得更加显著，这与图 11 – 14 中的结果一致。与 FOM_1，相比，GO-Si 波导的 FOM_2 高于可比的 GO-Si_3N_4 和 GO-Hydex 波导，这主要归因于硅较大的三阶光学

非线性及其较强的 GO 模场重叠。

表 3。 不同集成波导中引入 GO 后的非线性光学性能比较。品质因数：品质因数。

集成波导	GO 层序号 a)	波导尺寸（μ米）	γ (钨$^{-1}$m^{-1}) b)	α_L （1/米） c)	PL （分贝/厘米） d)	FOM_1 （任意单位） e)
Si	N = 0	0.50 × 0.22	288.00	99.00	4.30	0.74
	氮 = 1		668.01	571.03	24.80	2.52
	氮 = 10		2905.92	3640.30	158.11	8.90
硅$_3$氮$_4$	氮 = 0	1.60 × 0.66	1.51	69.08	3.00	
	折射率 = 1		13.14	139.30	6.05	>> 1
	折射率 = 10		167.14	1474.56	64.04	
Hydex	折射率 = 0	2.00 × 1.50	0.28	5.53	0.24	
	折射率 = 1		0.61	29.01	1.26	>> 1
	N = 10		7.65	294.26	12.78	

a) N = 0 对应未镀层的硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导的结果，而 N = 1 和 10 分别对应具有 1 层和 10 层氧化石墨烯的混合波导的结果。b) γ 为非线性参数。对于混合波导，γ是基于参考文献 [51, 53]计算得出的有效值。c) α_L 为线性损耗衰减系数。根据参考文献 [51-53]，假设未镀层的硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导的 α_L（即 N = 0）分别为 99.0 m^{-1}、69.1 m^{-1}和 5.5 m^{-1}。d) PL 为线性传输损耗，其计算方式为 PL（分贝/cm）= 10 × log$_{10}$[exp (α_L × 0.01)]。e) 品质因数的定义为 $FOM_1 = n_2 / (\lambda\beta_{TPA})$，与参考文献 [2, 3], 中的定义相同，其中 n_2 和 β_{TPA} 分别表示波导的有效克尔系数和双光子吸收系数，而 λ 表示光波长。Si_3N_4, 和 Hydex 波导的值为>> 1，这是因为在这些波导中观察到的双光子吸收可忽略不计。

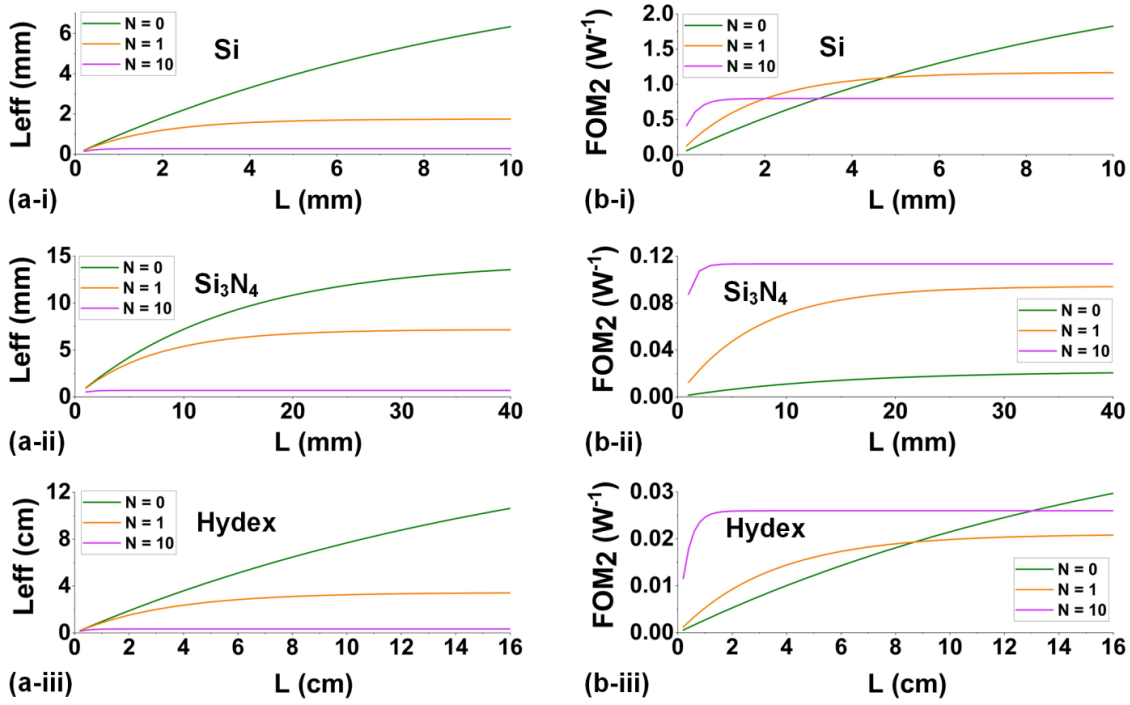

图15。 (a) 有效相互作用长度 (L_{eff}) 随波导长度 (L) 的变化，其中混合硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导分别均匀涂覆了1层和10层氧化石墨烯。(b) 品质因数$_2$ 随波导长度 (L) 的变化，其中混合硅、Si_3N_4, 和 Hydex 波导分别均匀涂覆了1层和10层氧化石墨烯。在(a)和(b)中，也展示了未涂覆波导（$N = 0$）的相应结果以作比较。

6. 挑战与展望

如上所述，氧化石墨烯具有独特的非线性光学性质，并与不同的 集成平台具有出色的兼容性，因此可实现许多高性能混合非线性集成光子器件。然而，尽管目前已取得成功，未来仍有改进空间。本节将讨论如何充分发挥氧化石墨烯在非线性集成光子学领域的巨大潜力，以及面临的挑战与展望。

大多数先进的氧化石墨烯非线性集成光子器件采用氧化石墨烯薄膜，而其性质几乎未经改性或优化。然而，正如**第2节**所述，氧化石墨烯的性质实际上可通过调控含氧官能团而显著改变。这为针对不同非线性光学过程调控其性质提供了很大的灵活性。例如，较大的氧化石墨烯光学带隙有利于四波混频、自相位调制和交叉相位调制过程，因为它可以降低线性损耗以及双光子吸收等非线性损耗。而对于可饱和吸收，通常需要较小的光学带隙，以增强光吸收并提高调制深度。

如**图16**所示，调控GO的材料性质的方法可分为两类——还原和掺杂。基于还原的方法包括热[174], 激光[96, 175], 化学[176, 177], 或微波还原[178]。其中，热还原和激光还原简单且快速，但通常受限于残留含氧官能团和产生的缺陷。而化学还原和微波还原则更能彻底去除含氧官能团，同时良好地保留碳网络，而不会

引入大量缺陷[174, 175]。通过采用湿化学法和微波还原方法[178, 179],，人们已实现合成性质极其接近石墨烯的高质量还原氧化石墨烯。通过GO还原合成类石墨烯材料，可利用GO制备工艺所具备的高产率和高CMOS兼容性等优势，为石墨烯基器件的量产提供可行方案。

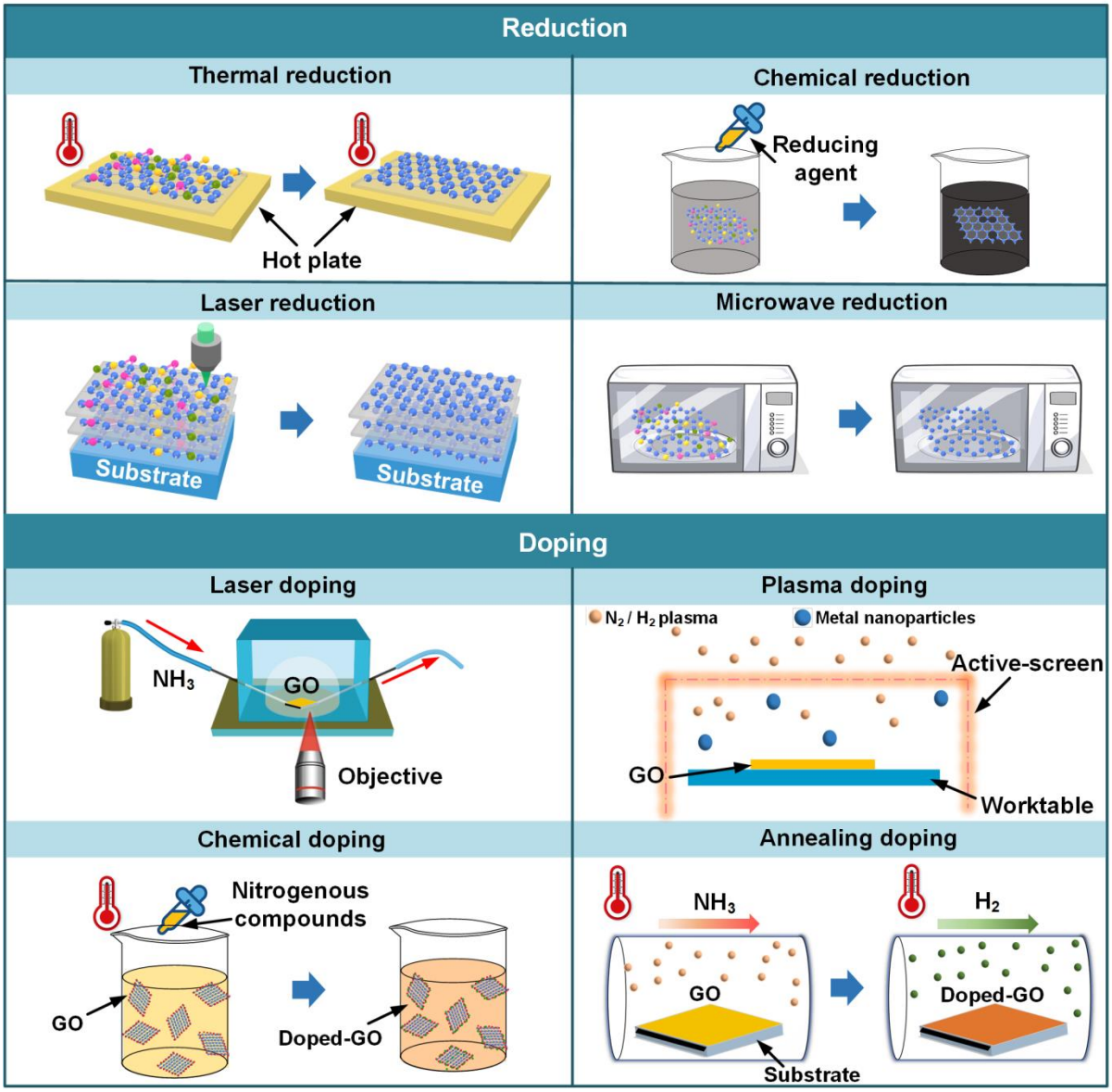

图16。典型氧化石墨烯还原和掺杂方法的示意图。

与 GO 还原过程中含氧官能团的去除不同，掺杂方法会将氮、硼和硫等外来原子引入 GO 的化学结构中，从而赋予材料新的性质。掺杂方法主要包括激光 [180],化学 [181], 等离子体 [182], 和基于退火的掺杂 [183]。激光掺杂能够利用聚焦激光束对掺杂区域进行精确控制和图案化，但要在短时间内对大面积进行图案化往往颇具挑战。相比之下，等离子体、化学和退火掺杂方法已显示出在大面积范围内实现高效 GO 掺杂的强大能力，但代价是图案化精度较低 [181-183]。

尽管采用 GO 薄膜的先进集成波导，其线性传输损耗已经比采用石墨烯的同类器件低 100 多倍，但损耗仍有很大的进一步降低空间。原则上，带隙为 > 2 eV 的 GO 在低于其带隙的能量范围内几乎没有线性吸收，例如在近红外波长下（1550纳米处的光子能量为 ~0.8 eV）。实际 GO 薄膜的光吸收主要由缺陷以及由层间接触不完善和薄膜不均匀性引起的散射损耗所致 [53, 57]。通过改进 GO 合成和薄膜涂覆工艺，例如采用纯度更高、片层尺寸经过优化的 GO 溶液，可以进一步降低这些来源造成的损耗。降低 GO 薄膜的线性损耗 不仅能提升先进 GO 四波混频和自相位调制器件的性能，还能促进超连续谱产生（SCG）[167, 184] 和光学微梳产生[88, 185]等许多新的非线性光学应用。

目前关于氧化石墨烯非线性集成光子器件的研究主要集中于其较大的三阶光学非线性。然而，除此之外，研究还发现了令人惊讶的二阶

光学非线性[109, 110], 这将为未来基于氧化石墨烯器件开展的诸多二阶光学非线性过程研究奠定基础，例如二次谐波产生（SHG）、和频／差频产生（SFG / DFG）、波克尔斯效应和光学整流。不同于存在于所有材料中的三阶光学非线性，二阶光学非线性只能出现在非中心对称材料中，或出现在反演对称性遭到破坏的中心对称材料表面[44, 186, 187]。与具有中心对称原子结构的石墨烯相比，氧化石墨烯具有高度非均匀的原子结构，从而产生较大的二阶光学非线性；通过采用还原或掺杂方法改变氧化石墨烯的原子结构，还可以调控这种非线性。结合其与集成平台的高度兼容性，这将推动功能性二阶非线性集成光子器件的发展，并实现众多应用，例如基于 SHG 的超快信号处理与产生[44], 基于 DFG 的可调谐太赫兹等离激元产生[188],基于波克尔斯效应的高速电光调制器[189], 以及基于光学整流的宽带光探测器[190]。

将氧化石墨烯薄膜用作锁模光纤激光器中的可饱和吸收体已得到验证[4, 44], ，在含氧化石墨烯的集成波导中也观察到了可饱和吸收现象[52]。与石墨烯相比，虽然氧化石墨烯的光学带隙较大、可饱和吸收较弱，但通过调控氧化石墨烯中的缺陷态，或将其还原以获得类石墨烯材料，都可以增强其可饱和吸收能力。预计在不久的将来，具有强可饱和吸收能力的氧化石墨烯或还原氧化石墨烯集成光子器件，将为实现片上锁模激光器[191], 、宽带全光调制器[192], 、脉冲压缩系统[193], 和光子神经网络[194]开辟新的前景。

在**表4**中，我们比较了采用不同类型二维材料、用于非线性光学过程的集成光子器件。与采用其他二维材料的集成波导相比，GO 混合波导的线性传输损耗更低。此外，对薄膜尺寸和厚度进行高精度控制，以及在复杂结构上进行共形涂覆的能力，为优化 GO 混合集成器件的性能提供了独特优势。鉴于氧化石墨烯材料性质具有很强的可调性，其性能优化的潜力更大。未来有关氧化石墨烯非线性集成光子器件的研究中，一些尚未探索的三阶光学非线性过程（如三次谐波产生和交叉相位调制）、各种二阶非线性光学过程，以及采用还原氧化石墨烯和石墨烯的非线性集成光子器件之间的性能比较，都有望成为热门课题；而**表4**中关于采用石墨烯和过渡金属二硫族化合物的集成光子器件的类似研究，可为实验设计和性能比较提供有益参考。

GO混合集成光子器件的整体非线性光学性能取决于许多与GO的材料性质相关的因素，这些因素不仅包括二阶或三阶光学非线性、非线性光吸收等非线性性质，还包括线性损耗和色散等线性性质。GO的材料性质会随光功率和薄膜厚度变化，这类效应使情况更加复杂。与此同时，层状氧化石墨烯薄膜的这些卓越性质还带来了许多新能力，而仅由块体材料制成的传统集成器件无法实现这些能力；这些新能力为设计器件性能和功能性提供了更多自由度。表4. 用于非线性光学（NLO）应用的、采用不同二维材料的集成光子器件比较。G：石墨烯。

2D 材料	器件 [a]	传播损耗 [b] (分贝/毫米)	二维薄膜厚度	二维材料的折射率$_2$ (× 10^{-14} m^2 钨$^{-1}$)	NLO 效应 [c]	NLO 性能 [d]	Ref.
GO	Hydex WG	0.1	4 nm 2 层	1.5	FWM	转换效率提升 高达 6.9 分贝	[53]
GO	Hydex MRR	—	2−100 纳米 1−50 层	1.2 – 2.7	FWM	转换效率提升 最高可达 10.3 分贝	[54]
GO	硅$_3$氮$_4$ WG	0.6	2−20 纳米 1−10 层	1.3 – 1.4	FWM	转换效率提升 高达 9.1 分贝	[51]
GO	Si WG	2.5	2−40 纳米 1−20 层	1.2 – 1.4	SPM & SA	最大带宽因子为 4.34 明显的可饱和吸收	[52]
G	硅光子晶体腔	—	单层	10	FWM	转换效率提升 超过20分贝	[195]
G	硅光子晶体 WG	50	单层	10	FWM	转换效率提升 最高可达 8 分贝	[196]
G	Si MRR	—	单层	15	FWM	转换效率提升 最高可达 6.8 分贝	[197]
G	硅$_3$氮$_4$ WG	50	单层	—	FWM	γ 提升最高可达 约 1000 倍	[198]
G	Si WG	30	单层	100	FWM	转换效率提升 最高可达 4.8 分贝	[173]
G	Si WG	67−111	单层	10	FWM	γ 提升 最高可达 10 倍	[199]
G	Si WG	52	—	—	SPM	Pulse 压缩 ion 从80飞秒到15.7飞秒	[200]
G	Si WG	200	单层	—	SPM	γ 提升幅度从 150到510 $W^{-1}m^{-1}$	[171]
G	硅$_3$N$_4$ WG	12.9	单层	—	SA	对不同脉冲具有强可饱和吸收 宽度（0.2 至 2 ps）	[172]
G	硅槽 WG	940	单层	—	SA	MD 改进 最高可达 7 倍 [e]	[201]
G	Si WG	49	单层	—	SA	调制深度最高达 22.7%	[202]
G	硅$_3$氮$_4$ WG	100	2 层	—	DFG	产生太赫兹等离激元 从 4.7 到 9.4 THz	[188]
MoS_2	Si WG	5.5	3 nm	0.03	FWM	转换效率提升 高达 4 分贝	[68]
MoS_2	Si WG	—	10 纳米	0.01	SPM	提取的 MoS_2 折射率$_2$ 约为硅的 100 倍	[203]
MoS_2	Si WG	—	单层	—	SHG	二次谐波增强 最高可达 5 倍 [f]	[204]
钨石墨烯 [g]	硅$_3$N$_4$ WG	2.5	5.6 纳米	0.20 – 0.22	SPM	γ 从 1.75 提升至 650 W^{-1} m^{-1}	[205]
WS_2	硅$_3$氮化硅$_4$ WG	—	单层	—	SHG	与.....相比，二次谐波产生明显 裸波导中可忽略不计	[206]
GaS	硅$_3$氮化硅$_4$ MRR	—	103 纳米	1.2 × 10^{-4}	XPM	提取的硫化镓折射率$_2$ 约为硅$_3$氮$_4$的10倍	[207]

[a] 波导：波导。微环谐振器：微环谐振器。光子晶体：光子晶体。[b] 传播损耗：薄膜厚度最低的混合波导的线性传输损耗。[c] 差频产生：差频产生。二次谐波产生：二次谐波产生。交叉相位调制：交叉相位调制。

[d] CE：转换效率。BF：展宽因子。γ：非线性参数。MD：调制深度。CE 和 γ 的提升是相对于未涂覆波导而言的。[e] MD 改进是相对于石墨烯-on-硅$_3N_4$ 脊形波导而言的。[f] SHG 增强是相对于二维材料在自由空间中的 SHG 而言的。[g] 本研究展示的是波长约为 800 纳米时的情况。除本研究外，其他所有研究展示的波长均约为 1550纳米。

如**第2节**所述，氧化石墨烯薄膜中存在光热变化，导致实际氧化石墨烯薄膜出现PDLL。与低光功率下可逆的光热变化不同，当功率超过一定阈值时，光热变化引起的损耗增加可能变为永久性。氧化石墨烯的永久性损耗增加限制了其在高功率非线性光学应用中的使用。近期研究发现，通过电化学方法调节氧化石墨烯的氧化程度，[208]，可使其在高功率激光照射下保持较高的三阶光学非线性，同时显著提升（> 100 倍）材料稳定性。未来，通过片上集成这种改性氧化石墨烯，有望制成具有卓越功率承受能力的 GO混合集成光子器件。

在实际的氧化石墨烯薄膜中，光照下多种非线性光学过程会同时存在[209, 210]，它们之间的相互作用可能导致复杂的行为。例如，双光子吸收引起的损耗会降低四波混频和自相位调制的性能，而可饱和吸收带来的损耗降低则可能产生积极影响。此外，不同的非线性光学过程可能具有不同的激发条件。例如，当入射光的光子能量大于材料带隙的一半时，会发生双光子吸收；而当入射光的单光子能量略高于带隙能量时，则可有效激发可饱和吸收。在实际应用中，需要根据具体的非线性光学应用和目标波长区域，对氧化石墨烯中的不同非线性光学过程进行适当调控和平衡

。例如，可以通过还原或掺杂调控氧化石墨烯的带隙，以满足特定波长区域内特定非线性光学应用的需求。

近年来，通过组装不同的二维材料构建范德华异质结构，已取得许多重大突破[211, 212]。GO 易于制备，且其性质具有很高的可调节性，因此为构建基于不同材料的异质结构提供了广阔的可能性。目前，已有研究探讨了若干包含 GO 或 rGO 的异质结构，例如聚合物/氧化石墨烯异质结构 [213]，碳化钛/还原氧化石墨烯异质结构 [214]，以及五氧化二钒/还原氧化石墨烯异质结构 [215]。然而，GO 或 rGO 异质结构的光学非线性，尤其是以集成器件形式实现时，尚待研究，这预示着未来将取得更多重大突破。

相位匹配是实现高效非线性过程（如四波混频、自相位调制、交叉相位调制和三次谐波产生）的前提。对于氧化石墨烯涂层集成波导，可以通过减少或图案化氧化石墨烯薄膜来调控其波导色散，从而减轻相位失配。这将改善四波混频带宽和自相位调制光谱展宽，并为宽带光频梳产生[216, 217] 和超连续谱产生[184, 218]铺平道路。在具有正克尔系数 n_2 的材料（例如硅、硅$_3$氮化物$_4$ 和Hydex玻璃）中，反常色散条件下会发生相位匹配。这要求生长厚膜以在电信波段实现反常色散，而由于应力诱导开裂，这一直是硅$_3$氮化物$_4$ 薄膜面临的重大挑战[25]。最近，已有研究报道了具有负值 n_2 的激光还原氧化石墨烯薄膜[55, 56]。预计未来采用具有负n_2 的还原氧化石墨烯，可以减小正常色散硅$_3$氮化物$_4$ 波导中的相位失配，从而降低正常色散器件实现相位匹配的要求，使其能够在非线性光学应用中发挥更

重要的作用。

槽波导凭借亚波长槽区内的强光约束增强了光与物质相互作用，为充分利用 GO 的材料性质提供了更优的结构 [28, 219]。尽管 GO 在集成线波导的共形涂覆方面已展现出优势 [63], ，但对于宽度为 < 100 纳米、高度为 > 200 纳米的狭窄槽区，共形涂覆仍颇具挑战。这主要受限于用于自组装的氧化石墨烯片尺寸，其典型尺寸为 ~50 μm。通过改进 GO 合成方法并采用更强烈的超声处理，可获得尺寸更小的氧化石墨烯片，有望解决这一问题，并实现非线性光学性能显著提升的氧化石墨烯混合槽波导。除了微环谐振器 [54], ，还可采用其他谐振器件结构，利用谐振增强效应增强光与 GO 的相互作用，例如亚波长光栅 [220]，、光子晶体腔 [195], 和回音壁模式腔 [221, 222]。

尽管已有大量研究探讨氧化石墨烯和还原氧化石墨烯的非线性光学性能，但其中许多研究都采用了半经验方法。更多物理层面的认识仍有待探索，例如光学非线性的各向异性、非线性光学性质对还原／掺杂程度的依赖，以及 Re ($\chi^{(3)}$) 与 Im ($\chi^{(3)}$) 过程之间的相互作用。此前，研究人员曾通过广泛使用的 Z扫描法 [55, 56]，对厚氧化石墨烯薄膜（> 1 μm）的光学非线性进行表征。然而，对于极薄的二维薄膜（< 20 纳米），在 Z扫描测量中，要从背景噪声中准确区分出二维薄膜引起的微弱响应非常困难。此外，超薄二维薄膜很容易被垂直入射的聚焦激光束损坏。用于集成的制备技术

氧化石墨烯薄膜可以实现对厚度和尺寸的精确控制，从而为研究二维氧化石墨烯薄膜的基础物理特性带来新的可能。这也将有助于充分发挥氧化石墨烯在非线性集成光子器件中的巨大潜力。 这种协同效应将产生持久的积极影响，成为持续提升器件性能、拓展应用范围的强大动力。

随着对GO的材料性质的认识与调控不断改进，以及其制备技术不断发展，预计GO非线性集成光子学将迎来许多新突破；事实上，这一领域一直十分活跃。[223-229] 许多光子产业都共同期待能够交付性能显著提升、可批量生产的混合非线性集成光子器件。这将加速二维材料走出实验室并投入应用，也将确保该领域的研究惠及更广泛的群体。这种材料与技术具有广泛的应用前景，包括集成非线性光子芯片、[230-273] 集成微梳、[274-302] 量子光学、[303-311] 光纤通信、[312-314] 神经形态计算、[315-320] 微波光子学、[320-405] 以及许多其他领域。

7. 结论

将氧化石墨烯薄膜片上集成，可获得较强的光学非线性，同时还能灵活调节其性质。这为实现适用于广泛应用的高性能非线性集成光子器件开辟了一个前景广阔的新方向。本文回顾了GO非线性集成光子学的研究进展，总结了GO的光学性质及其片上集成的制备技术，并综述了

适用于不同非线性光学应用的各类GO混合集成器件，并比较了不同集成平台的非线性光学性能。我们还探讨了这一新兴领域面临的挑战与展望。随着这一跨学科领域不断发展，我们相信，基于GO的非线性集成光子学将成为科学研究和工业应用的新范式，助力发掘集成器件与二维材料融合所带来的巨大机遇。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

参考文献

[1] Y. Shen, Rev. Mod. Phys. 1976, 48, 1.[2] J. Leuthold, C. Koos, W. Freude, Nat. Photonics 2010, 4, 535.[3] D. J. Moss, R. Morandotti, A. L. Gaeta, M. Lipson, Nat. Photonics 2013, 7, 597.[4] X. Liu, Q. Guo, J. Qiu, 《先进材料》2017, 29, 1605886.[5] Y. Yang, K. Kelley, E. Sachet, S. Campione, T. S. Luk, J. P. Maria, M. B. Sinclair, I. Brener, Nat. Photonics 2017, 11, 390.[6] M. A. Foster, A. C. Turner, J. E. Sharping, B. S. Schmidt, M. Lipson, A. L. Gaeta, 《自然》2006, 441, 960.[7] K. Ooi, D. Ng, T. Wang, A. Chee, S. Ng, Q. Wang, L. Ang, A. Agarwal, L. Kimerling, D. Tan, Nat. Commun. 2017, 8, 1.[8] F. Li, T. Vo, C. Husko, M. Pelusi, D.-X. Xu, A. Densmore, R. Ma, S. Janz, B. Eggleton, D. Moss, Opt. Express 2011, 19, 20364.[9] X. Yang, X. Hu, H. Yang, Q. Gong, 《纳米光子学》2017, 6, 365.[10] B. Corcoran, C. Monat, C. Grillet, D. J. Moss, B. J. Eggleton, T. P. White, L. O'Faolain, T. F. Krauss, Nat. Photonics 2009, 3, 206.[11] F. Morichetti, A. Canciamilla, C. Ferrari, A. Samarelli, M. Sorel, A. Melloni, Nat. Commun. 2011, 2, 1.[12] P. Trocha, M. Karpov, D. Ganin, M. H. Pfeiffer, A. Kordts, S. Wolf, J. Krockenberger, P. Marin- Palomo, C. Weimann, S. Randel, 《科学》2018, 359, 887.[13] J. Riemensberger, A. Lukashchuk, M. Karpov, W. Weng, E. Lucas, J. Liu, T. J. Kippenberg, 《自然》2020, 581, 164.[14] Q. F. Yang, M. G. Suh, K. Y. Yang, X. Yi, K. J. Vahala, “微谐振器孤子双梳光谱学”，发表于 CLEO：科学与创新，2017.[15] S. Kli mmer, O. Ghaebi, Z. Gan, A. George, A. Turchanin, G. Cerullo, G. Soavi, Nat. Photonics 2021, 15, 837.[16] M. Fridman, A. Farsi, Y. Okawachi, A. L. Gaeta, 《自然》2012, 481, 62.

[17] A. Klein, S. Shahal, G. Masri, H. Duadi, M. Fridman, IEEE 光子学杂志 2017, 9, 1. [18] M. Kues, C. Reimer, P. Roztocki, L. R. Cortés, S. Sciara, B. Wetzel, Y. Zhang, A. Cino, S. T. Chu, B. E. Little, 《自然》2017, 546, 622.[19] C. Reimer, M. Kues, P. Roztocki, B. Wetzel, F. Grazioso, B. E. Little, S. T. Chu, T. Johnston, Y. Bromberg, L. Caspani, 《科学》2016, 351, 1176.[20] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, D. Thomson, Nat. Photonics 2010, 4, 518.[21] W. Zhang, J. Yao, Nat. Commun. 2018, 9, 1. [22] J. Wu, T. Moein, X. Xu, G. Ren, A. Mitchell, D. J. Moss, APL Photonics 2017, 2, 056103.[23] A. G. Griffith, R. K. Lau, J. Cardenas, Y. Okawachi, A. Mohanty, R. Fain, Y. H. D. Lee, M. Yu, C. T. Phare, C. B. Poitras, Nat. Commun. 2015, 6, 1.[24] J. S. Levy, A. Gondarenko, M. A. Foster, A. C. Turner-Foster, A. L. Gaeta, M. Lipson, Nat. Photonics 2010, 4, 37.[25] M. H. Pfeiffer, A. Kordts, V. Brasch, M. Zervas, M. Geiselmann, J. D. Jost, T. J. Kippenberg, Optica 2016, 3, 20.[26] M. Ferrera, L. Razzari, D. Duchesne, R. Morandotti, Z. Yang, M. Liscidini, J. Sipe, S. Chu, B. Little, D. Moss, Nat. Photonics 2008, 2, 737.[27] L. Razzari, D. Duchesne, M. Ferrera, R. Morandotti, S. Chu, B. Little, D. Moss, Nat. Photonics 2010, 4, 41.[28] C. Koos, P. Vorreau, T. Vallaitis, P. Dumon, W. Bogaerts, R. Baets, B. Esembeson, I. Biaggio, T. Michinobu, F. Diederich, Nat. Photonics 2009, 3, 216.[29] J. Leuthold, W. Freude, J.-M. Brosi, R. Baets, P. Dumon, I. Biaggio, M. L. Scimeca, F. Diederich, B. Frank, C. Koos, IEEE 会刊 2009, 97, 1304.[30] K. Chow, S. Yamashita, S. Set, 《光学快报》2010, 35, 2070.[31] Z. Ma, L. Yang, L. Liu, S. Wang, L. M. Peng, ACS Nano 2020, 14, 7191.[32] T. Gu, N. Petrone, J. F. McMillan, A. van der Zande, M. Yu, G. Q. Lo, D. L. Kwong, J. Hone, C. W. Wong, Nat. Photonics 2012, 6, 554.[33] I. A. Calafell, L. A. Rozema, D. A. Iranzo, A. Trenti, P. K. Jenke, J. D. Cox, A. Kumar, H. Bieliaiev, S. Nanot, C. Peng, Nature Nanotechnology 2021, 16, 318. [34] T. Jiang, V. Kravtsov, M. Tokman, A. Belyanin, M. B. Raschke, Nature Nanotechnology 2019, 14, 838.[35] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, 《科学》2004, 306, 666. [36] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A. Ferrari, Nat. Photonics 2010, 4, 611.[37] J. Wu, L. Jia, Y. Zhang, Y. Qu, B. Jia, D. J. Moss, 《先进材料》2020, 33, 2006415.[38] F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam, Nat. Photonics 2014, 8, 899. [39] K. F. Mak, J. Shan, Nat. Photonics 2016, 10, 216.[40] P. C. Debnath, K. Park, Y. W. Song, 小型方法 2018, 2, 1700315.[41] Z. Sun, A. Martinez, F. Wang, Nat. Photonics 2016, 10, 227.[42] Q. Ma, G. Ren, K. Xu, J. Z. Ou, 先进光学材料 2021, 9, 2001313.[43] X. Liu, Q. Guo, J. Qiu, 《先进材料》2017, 29, 1605886.[44] A. Autere, H. Jussila, Y. Dai, Y. Wang, H. Lipsanen, Z. Sun, 《先进材料》2018, 30, 1705963.[45] J. W. You, S. R. Bongu, Q. Bao, N. C. Panoiu, 《纳米光子学》2019, 8, 63.[46] B. Guo, Q. l. Xiao, S. h. Wang, H. Zhang, 激光与光子学评论 2019, 13, 1800327.[47] G. Wang, A. A. Baker-Murray, W. J. Blau, 激光与光子学评论 2019, 13, 1800282.[48] S. Yamashita, APL Photonics 2018, 4, 034301.

[49] B. Zhang, J. Liu, C. Wang, K. Yang, C. Lee, H. Zhang, J. He, 激光与光子学评论 2020, 14, 1900240.[50] W. Liu, M. Liu, X. Liu, X. Wang, H. X. Deng, M. Lei, Z. Wei, Z. Wei, 先进光学材料 2020, 8, 1901631.[51] Y. Qu, J. Wu, Y. Yang, Y. Zhang, Y. Liang, H. El Dirani, R. Crochemore, P. Demongodin, C. Sciancalepore, C. Grillet, C. Monat, B. Jia, D. J. Moss, 先进光学材料 2020, n/a, 2001048.[52] Y. Zhang, J. Wu, Y. Yang, Y. Qu, L. Jia, T. Moein, B. Jia, D. J. Moss, ACS 应用材料与界面 2020, 12, 33094.[53] Y. Yang, J. Wu, X. Xu, Y. Liang, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, B. Jia, D. J. Moss, APL Photonics 2018, 3, 120803.[54] J. Wu, Y. Yang, Y. Qu, L. Jia, Y. Zhang, X. Xu, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, B. Jia, D. J. Moss, Small 2020, 16, 1906563.[55] X. Xu, X. Zheng, F. He, Z. Wang, H. Subbaraman, Y. Wang, B. Jia, R. T. Chen, 《科学报告》2017, 7, 9646.[56] X. Zheng, B. Jia, X. Chen, M. Gu, 《先进材料》2014, 26, 2699.[57] J. Wu, Y. Yang, Y. Qu, X. Xu, Y. Liang, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, B. Jia, D. J. Moss, 激光与光子学评论 2019, 13, 1900056.[58] D. C. Marcano, D. V. Kosynkin, J. M. Berlin, A. Sinitskii, Z. Sun, A. Slesarev, L. B. Alemany, W. Lu, J. M. Tour, ACS Nano 2010, 4, 4806.[59] K. P. Loh, Q. Bao, G. Eda, M. Chhowalla, Nat. Chem. 2010, 2, 1015.[60] G.-K. Lim, Z.-L. Chen, J. Clark, R. G. S. Goh, W.-H. Ng, H.-W. Tan, R. H. Friend, P. K. H. Ho, L.-L. Chua, 《自然·光子学》2011, 5, 554.[61] X. Zheng, H. Lin, T. Yang, B. Jia, Journal of Physics D: Applied Physics 2017, 50, 074003.[62] N. Ghofraniha, C. Conti, 《光学杂志》2019, 21, 053001.[63] Y. Yang, H. Lin, B. Y. Zhang, Y. Zhang, X. Zheng, A. Yu, M. Hong, B. Jia, ACS光子学 2019, 6, 1033.[64] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim, 《科学》2008, 320, 1308.[65] K. I. Bolotin, K. J. Sikes, J. Hone, H. L. Stormer, P. Kim, Phys. Rev. Lett. 2008, 101, 096802.[66] C. H. Lui, K. F. Mak, J. Shan, T. F. Heinz, Phys. Rev. Lett. 2010, 105, 127404.[67] G. Demetriou, H. T. Bookey, F. Biancalana, E. Abraham, Y. Wang, W. Ji, A. K. Kar, Opt. Express 2016, 24, 13033.[68] Y. Zhang, L. Tao, D. Yi, J. B. Xu, H. K. Tsang, 《光学杂志》2020, 22, 025503.[69] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis, Nature Nanotechnology 2011, 6, 147.[70] H. Nan, Z. Wang, W. Wang, Z. Liang, Y. Lu, Q. Chen, D. He, P. Tan, F. Miao, X. Wang, J. Wang, Z. Ni, ACS Nano 2014, 8, 5738.[71] G. A. Ermolaev, Y. V. Stebunov, A. A. Vyshnevyy, D. E. Tatarkin, D. I. Yakubovsky, S. M. Novikov, D. G. Baranov, T. Shegai, A. Y. Nikitin, A. V. Arsenin, V. S. Volkov, npj 二维 Mater. Appl. 2020, 4, 21.[72] S. Bikorimana, P. Lama, A. Walser, R. Dorsinville, S. Anghel, A. Mitioglu, A. Micu, L. Kulyuk, Opt. Express 2016, 24, 20685.[73] H. Fang, S. Chuang, T. C. Chang, K. Takei, T. Takahashi, A. Javey, 《纳米快报》2012, 12, 3788.[74] N. Dong, Y. Li, S. Zhang, N. McEvoy, X. Zhang, Y. Cui, L. Zhang, G. S. Duesberg, J. Wang, 《光学快报》2016, 41, 3936.

[75] H. Kim, H. Ahn Geun, J. Cho, M. Amani, P. Mastandrea James, K. Groschner Catherine, D.-H. Lien, Y. Zhao, W. Ager Joel, C. Scott Mary, C. Chrzan Daryl, A. Javey, Science Advances, 5, eaau4728.[76] H. Gu, B. Song, M. Fang, Y. Hong, X. Chen, H. Jiang, W. Ren, S. Liu, Nanoscale 2019, 11, 22762.[77] L. Li, Y. Yu, G. J. Ye, Q. Ge, X. Ou, H. Wu, D. Feng, X. H. Chen, Y. Zhang, Nature Nanotechnology 2014, 9, 372.[78] L. Li, J. Kim, C. Jin, G. J. Ye, D. Y. Qiu, F. H. da Jornada, Z. Shi, L. Chen, Z. Zhang, F. Yang, K. Watanabe, T. Taniguchi, W. Ren, S. G. Louie, X. H. Chen, Y. Zhang, F. Wang, Nature Nanotechnology 2017, 12, 21.[79] R. Tian, R. Fei, S. Hu, T. Li, B. Zheng, Y. Shi, J. Zhao, L. Zhang, X. Gan, X. Wang, Physical Review B 2020, 101, 235407.[80] X. Wang, S. Lan, Advances in Optics and Photonics 2016, 8, 618.[81] X. Zheng, R. Chen, G. Shi, J. Zhang, Z. Xu, X. a. Cheng, T. Jiang, 《光学快报》2015, 40, 3480.[82] S. Xiao, H. Wang, Y. Qin, X. Li, H. Xin, G. Wang, L. Hu, Y. Wang, Y. Li, W. Qi, J. He, Physica B：凝聚态物质 2020, 594, 412364.[83] K. Wang, B. M. Szydłowska, G. Wang, X. Zhang, J. J. Wang, J. J. Magan, L. Zhang, J. N. Coleman, J. Wang, W. J. Blau, ACS Nano 2016, 10, 6923.[84] L. Yin, G. P. Agrawal, 《光学快报》2007, 32, 2031.[85] D. Tahir, H. L. Kwon, H. C. Shin, S. K. Oh, H. J. Kang, S. Heo, J. G. Chung, J. C. Lee, S. Tougaard, Journal of Physics D: Applied Physics 2010, 43, 255301.[86] J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz, 《光学快报》2000, 25, 796.[87] J. Bauer, physica status solidi (a) 1977, 39, 411.[88] L. Razzari, D. Duchesne, M. Ferrera, R. Morandotti, S. Chu, B. E. Little, D. J. Moss, 《自然·光子学》2010, 4, 41.[89] M. Ferrera, L. Razzari, D. Duchesne, R. Morandotti, Z. Yang, M. Liscidini, J. E. Sipe, S. Chu, B. E. Little, D. J. Moss, 《自然·光子学》2008, 2, 737.[90] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A. C. Ferrari, 《自然·光子学》2010, 4, 611.[91] L. Guo, R. Q. Shao, Y. L. Zhang, H.-B. Jiang, X. B. Li, S. Y. Xie, B. B. Xu, Q.-D. Chen, J. F. Song, H. B. Sun, 《物理化学杂志C》2012, 116, 3594.[92] Y. L. Zhang, L. Guo, H. Xia, Q. D. Chen, J. Feng, H. B. Sun, 先进光学材料 2014, 2, 10.[93] L. Guo, Y. L. Zhang, D. D. Han, H. B. Jiang, D. Wang, X. B. Li, H. Xia, J. Feng, Q. D. Chen, H. B. Sun, 先进光学材料 2014, 2, 120.[94] O. C. Compton, S. T. Nguyen, Small 2010, 6, 711.[95] Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J. W. Suk, J. R. Potts, R. S. Ruoff, 《先进材料》2010, 22, 3906.[96] X. Zheng, B. Jia, H. Lin, L. Qiu, D. Li, M. Gu, Nat. Commun. 2015, 6, 8433.[97] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, D. J. Thomson, 《自然·光子学》2010, 4, 518.[98] Q. Bao, H. Zhang, B. Wang, Z. Ni, C. H. Y. X. Lim, Y. Wang, D. Y. Tang, K. P. Loh, 《自然·光子学》2011, 5, 411.[99] H. Lin, Y. Song, Y. Huang, D. Kita, S. Deckoff-Jones, K. Wang, L. Li, J. Li, H. Zheng, Z. Luo, H. Wang, S. Novak, A. Yadav, C. C. Huang, R. J. Shiue, D. Englund, T. Gu, D. Hewak, K. Richardson, J. Kong, J. Hu, 《自然·光子学》2017, 11, 798.[100] Y. Tan, R. He, C. Cheng, D. Wang, Y. Chen, F. Chen, 《科学报告》2014, 4, 7523.[101] W. H. Lim, Y. K. Yap, W. Y. Chong, C. H. Pua, N. M. Huang, R. M. De La Rue, H. Ahmad, Opt. Express 2014, 22, 11090.

[102] Y. Qu, J. Wu, Y. Zhang, L. Jia, Y. Liang, B. Jia, D. J. Moss, 《光波技术杂志》2021, 39, 2902.[103] Y. Zhang, J. Wu, Y. Qu, L. Jia, B. Jia, D. J. Moss, 《光波技术杂志》2021, 1.[104] W. Y. Chong, W. H. Lim, Y. K. Yap, C. K. Lai, R. M. De La Rue, H. Ahmad, 《科学报告》2016, 6, 23813.[105] W. Li, B. Chen, C. Meng, W. Fang, Y. Xiao, X. Li, Z. Hu, Y. Xu, L. Tong, H. Wang, W. Liu, J. Bao, Y. R. Shen, 《纳米快报》2014, 14, 955.[106] J. W. You, S. R. Bongu, Q. Bao, N. C. Panoiu, 《纳米光子学》2018, 8, 63.[107] R. W. Boyd, 非线性光学, Academic Press, 2020.[108] P. Yin, X. Jiang, R. Huang, X. Wang, Y. Ge, C. Ma, H. Zhang, 《先进材料界面》2021, 8, 2100367.[109] I. Russier-Antoine, H. Fakhouri, S. Basu, F. Bertorelle, P. Dugourd, P. F. Brevet, P. Velayudhan, S. Thomas, N. Kalarikkal, R. Antoine, 《化学通讯》2020, 56, 3859.[110] G. E. Fernandes, J. H. Kim, R. Osgood, J. Xu, 纳米技术2018, 29, 105201.[111] C. Monat, C. Grillet, M. Collins, A. Clark, J. Schroeder, C. Xiong, J. Li, L. O'Faolain, T. F. Krauss, B. J. Eggleton, D. J. Moss, Nat. Commun. 2014, 5, 3246.[112] B. Corcoran, C. Monat, M. Pelusi, C. Grillet, T. P. White, L. O'Faolain, T. F. Krauss, B. J. Eggleton, D. J. Moss, Opt. Express 2010, 18, 7770.[113] V. Kumar, 《电子材料杂志》2021, 50, 3773.[114] D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, R. S. Ruoff, 《化学学会评论》2010, 39, 228.[115] G. Eda, Y. Y. Lin, C. Mattevi, H. Yamaguchi, H. A. Chen, I. S. Chen, C. W. Chen, M. Chhowalla, 《先进材料》2010, 22, 505.[116] X. Li, Y. Tang, Z. Yan, Y. Wang, B. Meng, G. Liang, H. Sun, X. Yu, Y. Zhang, X. Cheng, Q. J. Wang, 《IEEE量子电子学精选主题期刊》2014, 20, 441.[117] A. Harith Bin, S. Soroush, T. Kavintheran, Y. Mohammad, 光学工程2018, 57, 1.[118] X. Zhao, Z. B. Liu, W.-B. Yan, Y. Wu, X. L. Zhang, Y. Chen, J. G. Tian, 《应用物理快报》2011, 98, 121905.[119] S. Yu, X. Wu, K. Chen, B. Chen, X. Guo, D. Dai, L. Tong, W. Liu, Y. Ron Shen, Optica 2016, 3, 541.[120] H. Lin, B. C. P. Sturmberg, K. T. Lin, Y. Yang, X. Zheng, T. K. Chong, C. M. de Sterke, B. Jia, 《自然·光子学》2019, 13, 270.[121] H. C. Leo Tsui, O. Alsalman, B. Mao, A. Alodhayb, H. Albrithen, A. P. Knights, M. P. Halsall, I. F. Crowe, 《科学报告》2020, 10, 9592.[122] X. Li, H. Ren, X. Chen, J. Liu, Q. Li, C. Li, G. Xue, J. Jia, L. Cao, A. Sahu, B. Hu, Y. Wang, G. Jin, M. Gu, Nat. Commun. 2015, 6, 6984.[123] B. Brodie, 《化学与物理年鉴》1860, 59, 466.[124] W. S. Hummers, R. E. Offeman, 《美国化学会志》1958, 80, 1339.[125] C. Botas, P. Álvarez, P. Blanco, M. Granda, C. Blanco, R. Santamaría, L. J. Romasanta, R. Verdejo, M. A. López-Manchado, R. Menéndez, 《碳》2013, 65, 156.[126] R. K. Singh, R. Kumar, D. P. Singh, 《英国皇家化学会进展》2016, 6, 64993.[127] T. Le Ba, O. Mahian, S. Wongwises, I. M. Szilágyi, 《热分析与量热学杂志》2020, 142, 1145.[128] S. N. Alam, N. Sharma, L. Kumar, 石墨烯2017, 6, 1.[129] J. G. S. Moo, B. Khezri, R. D. Webster, M. Pumera, ChemPhysChem 2014, 15, 2922.[130] J. Hong, K. Lee, B. Son, S. Park, D. Park, J.-Y. Park, S. Lee, Y. Ahn, Opt. Express 2013, 21, 7633.[131] A. Furio, G. Landi, C. Altavilla, D. Sofia, S. Iannace, A. Sorrentino, H. Neitzert, 纳米技术

2016, 28, 054003.[132] Y. Guo, C. Di, H. Liu, J. Zheng, L. Zhang, G. Yu, Y. Liu, ACS Nano 2010, 4, 5749.[133] W. Chong, S. Gan, C. Lai, W. Chong, D. Choi, S. Madden, R. De La Rue, H. Ahmad, IEEE 光子学技术快报2020, 32, 627.[134] A. F. M. Ibrahim, Y. S. Lin, 化学工程科学2018, 190, 312.[135] K. Kim, M. Yankowitz, B. Fallahazad, S. Kang, H. C. Movva, S. Huang, S. Larentis, C. M. Corbet, T. Taniguchi, K. Watanabe, 《纳米快报》2016, 16, 1989.[136] N. Flöry, P. Ma, Y. Salamin, A. Emboras, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Leuthold, L. Novotny, Nature Nanotechnology 2020, 15, 118.[137] V. Dua, S. P. Surwade, S. Ammu, S. R. Agnihotra, S. Jain, K. E. Roberts, S. Park, R. S. Ruoff, S. K. Manohar, 应用化学国际版2010, 49, 2154.[138] L. T. Le, M. H. Ervin, H. Qiu, B. E. Fuchs, W. Y. Lee, 电化学通讯2011, 13, 355.[139] G. Cao, H. Lin, S. Fraser, X. Zheng, B. Del Rosal, Z. Gan, S. Wei, X. Gan, B. Jia, ACS 应用材料与界面2019, 11, 20298.[140] K.-T. Lin, H. Lin, T. Yang, B. Jia, Nat. Commun. 2020, 11, 1389.[141] Y. Y. Lee, K. S. Chong, S. H. Goh, A. M. Ng, M. V. Kunnavakkam, C. L. Hee, Y. Xu, H. Tantang, C. Y. Su, L. J. Li,《真空科学与技术杂志B辑》2011, 29, 011023.[142] R. R. Gattass, E. Mazur, 《自然·光子学》2008, 2, 219.[143] S. Rekštytė, A. Žukauskas, V. Purlys, Y. Gordienko, M. Malinauskas, 应用表面科学2013, 270, 382.[144] H. Hidai, H. Tokura, 应用表面科学2001, 174, 118.[145] E. Stratakis, V. Zorba, M. Barberoglou, C. Fotakis, G. A. Shafeev, 应用表面科学2009, 255, 5346.[146] Y. Zhang, L. Guo, S. Wei, Y. He, H. Xia, Q. Chen, H. B. Sun, F. S. Xiao, 今日纳米2010, 5, 15.[147] M. F. El-Kady, R. B. Kaner, ACS Nano 2014, 8, 8725.[148] P. S. Kollipara, J. Li, Y. Zheng, 研究2020, 2020.[149] L. Huang, Y. Huang, J. Liang, X. Wan, Y. Chen, 纳米研究2011, 4, 675.[150] Y. Y. Lee, K. S. L. Chong, S. H. Goh, A. M. H. Ng, M. V. Kunnavakkam, C. L. Hee, Y. Xu, H. Tantang, C. Y. Su, L. J. Li, 真空科学与技术杂志B辑2011, 29, 011023.[151] X. Liang, Y. S. Jung, S. Wu, A. Ismach, D. L. Olynick, S. Cabrini, J. Bokor, 《纳米快报》2010, 10, 2454.[152] S. Ghosh, D. Mandal, A. Chandra, S. N. Bhaktha, 《光波技术杂志》2019, 37, 2380.[153] S. Wei, G. Cao, H. Lin, X. Yuan, M. Somekh, B. Jia, ACS Nano 2021, 15, 4769.[154] X. Zheng, B. Jia, H. Lin, L. Qiu, D. Li, M. Gu, Nat. Commun. 2015, 6, 1.[155] T. Q. Trung, N. T. Tien, D. Kim, M. Jang, O. J. Yoon, N. E. Lee, 先进功能材料2014, 24, 117.[156] S. Li, C. Zhao, S. Zhou, Y. Zhang, P. Zhu, J. Yu, 化学工程杂志2020, 385, 123397.[157] R. Furlan de Oliveira, P. A. Livio, V. Montes-García, S. Ippolito, M. Eredia, P. Fanjul-Bolado, M. B. Gonzalez Garcia, S. Casalini, P. Samorì, 先进功能材料2019, 29, 1905375.[158] L. J. Liu, X. Wang, J. B. Liu, C. F. Liu, X. Li, F. S. Liu, F. M. Wu, S. Wang, G. Y. Zhang, 应用电化学杂志2018, 48, 1213.[159] Z. S. Wu, K. Parvez, X. Feng, K. Müllen, Nat. Commun. 2013, 4, 1.[160] S. S. Li, K. H. Tu, C. C. Lin, C. W. Chen, M. Chhowalla, ACS Nano 2010, 4, 3169.[161] L. V. Thekkekara, B. Jia, Y. Zhang, L. Qiu, D. Li, M. Gu, 《应用物理快报》2015, 107, 031105.

[162] J. Lee, J. Koo, P. Debnath, Y. W. Song, J. H. Lee, 《激光物理快报》2013年，10，035103。[163] C. Koos, P. Vorreau, T. Vallaitis, P. Dumon, W. Bogaerts, R. Baets, B. Esembeson, I. Biaggio, T. Michinobu, F. Diederich, W. Freude, J. Leuthold, 《自然·光子学》2009，3，216。[164] M. A. Foster, R. Salem, D. F. Geraghty, A. C. Turner-Foster, M. Lipson, A. L. Gaeta, 《自然》2008，456，81。[165] A. Pasquazi, M. Peccianti, Y. Park, B. E. Little, S. T. Chu, R. Morandotti, J. Azaña, D. J. Moss, 《自然·光子学》2011年，5，618。[166] Y. Zhang, J. Wu, Y. Qu, L. Jia, B. Jia, D. J. Moss, 《光波技术杂志》2021年，39，6553。[167] H. Guo, C. Herkommer, A. Billat, D. Grassani, C. Zhang, M. H. P. Pfeiffer, W. Weng, C.-S. Brès, T. J. Kippenberg, 《自然·光子学》2018年，12，330。[168] J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen，Rev. Mod. Phys. 2006，78，1135。[169] Q. Lin, J. Zhang, P. M. Fauchet, G. P. Agrawal，Opt. Express 2006，14，4786。[170] Q. Liu, S. Gao, Z. Li, Y. Xie, S. He，《应用光学》2011年，50，1260。[171] Q. Feng, H. Cong, B. Zhang, W. Wei, Y. Liang, S. Fang, T. Wang, J. Zhang, 《应用物理快报》2019年，114，071104。[172] P. Demongodin, H. El Dirani, J. Lhuillier, R. Crochemore, M. Kemiche, T. Wood, S. Callard, P. Rojo-Romeo, C. Sciancalepore, C. Grillet, C. Monat，APL Photonics 2019，4，076102。[173] Y. Yang, Z. Xu, X. Jiang, Y. He, X. Guo, Y. Zhang, C. Qiu, Y. Su, 《光子学研究》2018年，6，965。[174] H. Park, S. Lim, D. D. Nguyen, J. W. Suk，纳米材料2019年，9，1387。[175] X. Li, S. Wei, G. Cao, H. Lin, Y. Zhao, B. Jia, 《光子学研究》2020年，8，1316。[176] A. Gusev, O. Zakharova, D. S. Muratov, N. S. Vorobeva, M. Sarker, I. Rybkin, D. Bratashov, E. Kolesnikov, A. Lapanje, D. V. Kuznetsov，纳米材料2019年，9，1454。[177] C. K. Chua, M. Pumera, 《化学通讯》2016年，52，72。[178] D. Voiry, J. Yang, J. Kupferberg, R. Fullon, C. Lee, H. Y. Jeong, H. S. Shin, M. Chhowalla, 《科学》2016年，353，1413。[179] S. Eigler, M. Enzelberger-Heim, S. Grimm, P. Hofmann, W. Kroener, A. Geworski, C. Dotzer, M. Röckert, J. Xiao, C. Papp, 《先进材料》2013年，25，3583。[180] L. Guo, Y. L. Zhang, D. D. Han, H. B. Jiang, D. Wang, X. B. Li, H. Xia, J. Feng, Q. D. Chen, H. B. Sun，先进光学材料2014，2，120。[181] D. Long, W. Li, L. Ling, J. Miyawaki, I. Mochida, S. H. Yoon, 《朗缪尔》2010年，26，16096。[182] Z. Jing, S. Qi, X. Tao, H. Yu, W. Zhang, Y. Qiao, X. Li, H. Dong, 《材料科学杂志》2021年，56，3296。[183] X. Li, H. Wang, J. T. Robinson, H. Sanchez, G. Diankov, H. Dai, 《美国化学会志》2009年，131，15939。[184] N. Singh, D. D. Hudson, Y. Yu, C. Grillet, S. D. Jackson, A. Casas-Bedoya, A. Read, P. Atanackovic, S. G. Duvall, S. Palomba, B. Luther-Davies, S. Madden, D. J. Moss, B. J. Eggleton，Optica 2015，2，797。[185] J. Wu, X. Xu, T. G. Nguyen, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, A. Mitchell, D. J. Moss, 《IEEE量子电子学精选主题期刊》2018年，24，1。[186] X. Zhang, Q. T. Cao, Z. Wang, Y.-x. Liu, C. W. Qiu, L. Yang, Q. Gong, Y.-F. Xiao, 《自然·光子学》2019年，13，21。[187] M. Cazzanelli, F. Bianco, E. Borga, G. Pucker, M. Ghulinyan, E. Degoli, E. Luppi, V. Véniard, S. Ossicini, D. Modotto, 《自然·材料》2012年，11，148。[188] B. Yao, Y. Liu, S. W. Huang, C. Choi, Z. Xie, J. Flor Flores, Y. Wu, M. Yu, D.-L. Kwong, Y. Huang, Y. Rao, X. Duan, C. W. Wong, 《自然·光子学》2018年，12，22。

[189] B. Chmielak, M. Waldow, C. Matheisen, C. Ripperda, J. Bolten, T. Wahlbrink, M. Nagel, F. Merget, H. Kurz，Opt. Express 2011，19，17212。[190] T. Baehr-Jones, M. Hochberg, G. Wang, R. Lawson, Y. Liao, P. A. Sullivan, L. Dalton, A. Y. Jen, A. Scherer，Opt. Express 2005，13，5216。[191] H. Bao, A. Cooper, M. Rowley, L. Di Lauro, J. S. Totero Gongora, S. T. Chu, B. E. Little, G.-L. Oppo, R. Morandotti, D. J. Moss, B. Wetzel, M. Peccianti, A. Pasquazi，《自然·光子学》2019年，13，384。[192] S. Yu, X. Wu, K. Chen, B. Chen, X. Guo, D. Dai, L. Tong, W. Liu, Y. R. Shen，Optica 2016，3，541。[193] U. Gurudas, E. Brooks, D. M. Bubb, S. Heiroth, T. Lippert, A. Wokaun，《应用物理学杂志》2008年，104，073107。[194] Y. Shen, N. C. Harris, S. Skirlo, M. Prabhu, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, X. Sun, S. Zhao, H. Larochelle, D. Englund，《自然·光子学》2017年，11，441。[195] T. Gu, N. Petrone, J. F. McMillan, A. van der Zande, M. Yu, G. Q. Lo, D. L. Kwong, J. Hone, C. W. Wong，《自然·光子学》2012年，6，554。[196] H. Zhou, T. Gu, J. F. McMillan, N. Petrone, A. van der Zande, J. C. Hone, M. Yu, G. Lo, D.-L. Kwong, G. Feng, S. Zhou, C. W. Wong，《应用物理快报》2014年，105，091111。[197] M. Ji, H. Cai, L. Deng, Y. Huang, Q. Huang, J. Xia, Z. Li, J. Yu, Y. Wang，Opt. Express 2015，23，18679。[198] K. Alexander, N. A. Savostianova, S. A. Mikhailov, B. Kuyken, D. Van Thourhout，《ACS光子学》2017年，4，3039。[199] Y. Yonezu, R. Kou, H. Nishi, T. Tsuchizawa, K. Yamada, T. Aoki, A. Ishizawa, N. Matsuda，Opt. Express 2019，27，30262。[200] A. Ishizawa, R. Kou, T. Goto, T. Tsuchizawa, N. Matsuda, K. Hitachi, T. Nishikawa, K. Yamada, T. Sogawa, H. Gotoh，《科学报告》2017年，7，45520。[201] J. Wang, L. Zhang, Y. Chen, Y. Geng, X. Hong, X. Li, Z. Cheng,《应用物理快报》2019年，12，032003。[202] H. Wang, N. Yang, L. Chang, C. Zhou, S. Li, M. Deng, Z. Li, Q. Liu, C. Zhang, Z. Li, Y. Wang，《光子学研究》2020年，8，468。[203] L. Liu, K. Xu, X. Wan, J. Xu, C. Y. Wong, H. K. Tsang，《光子学研究》2015年，3，206。[204] H. Chen, V. Corboliou, A. S. Solntsev, D. Y. Choi, M. A. Vincenti, D. de Ceglia, C. de Angelis, Y. Lu, D. N. Neshev，《光：科学与应用》2017年，6，e17060。[205] Y. Wang, V. Pelgrin, S. Gyger, G. M. Uddin, X. Bai, C. Lafforgue, L. Vivien, K. D. Jöns, E. Cassan, Z. Sun，《ACS光子学》2021年，8，2713。[206] N. Liu, X. Yang, Z. Zhu, F. Chen, Y. Zhou, J. Xu, K. Liu，Nanoscale 2021。[207] S. Deckoff-Jones, V. Pelgrin, J. Zhang, C. Lafforgue, L. Deniel, S. Guerber, R. Ribeiro-Palau, F. Boeuf, C. Alonso-Ramos, L. Vivien, J. Hu, S. Serna，《光学杂志》2021年，23，025802。[208] J. Ren, X. Zheng, Z. Tian, D. Li, P. Wang, B. Jia，《应用物理快报》2016年，109，221105。[209] X. L. Zhang, Z. B. Liu, X. C. Li, Q. Ma, X.-D. Chen, J. G. Tian, Y. F. Xu, Y. S. Chen, Opt. Express 2013，21，7511。[210] X. F. Jiang, L. Polavarapu, S. T. Neo, T. Venkatesan, Q. H. Xu，《物理化学快报》2012年，3，785。[211] K. Novoselov，《科学》2016年，353，6298。[212] Y. Cao, V. Fatemi, A. Demir, S. Fang, S. L. Tomarken, J. Y. Luo, J. D. Sanchez-Yamagishi, K.

Watanabe、T. Taniguchi、E. Kaxiras，《自然》2018，556，80。[213] X. Wang、Y. Yin、M. Song、H. Zhang、Z. Liu、Y. Wu、Y. Chen、M. Eginligil、S. Zhang、J. Liu，ACS 应用材料与界面 2020，12，51729。[214] A. M. Navarro-Suárez、K. Maleski、T. Makaryan、J. Yan、B. Anasori、Y. Gogotsi，《电池与超级电容器》2018，1，33。[215] D. H. Nagaraju、Q. Wang、P. Beaujuge、H. N. Alshareef，《材料化学A》2014，2，17146。[216] B. Kuyken、T. Ideguchi、S. Holzner、M. Yan、T. W. Hänsch、J. Van Campenhout、P. Verheyen、S. Coen、F. Leo、R. Baets，Nat. Commun. 2015，6，1。[217] K. Luke、Y. Okawachi、M. R. Lamont、A. L. Gaeta、M. Lipson，《光学快报》2015，40，4823。[218] R. Halir、Y. Okawachi、J. Levy、M. Foster、M. Lipson、A. Gaeta，《光学快报》2012，37，1685。[219] S. Koeber、R. Palmer、M. Lauermann、W. Heni、D. L. Elder、D. Korn、M. Woessner、L. Alloatti、S. Koenig、P. C. Schindler，《光：科学与应用》2015，4，e255。[220] P. Cheben、R. Halir、J. H. Schmid、H. A. Atwater、D. R. Smith，《自然》2018，560，565。[221] K. Y. Yang、D. Y. Oh、S. H. Lee、Q.-F. Yang、X. Yi、B. Shen、H. Wang、K. Vahala，《自然·光子学》2018，12，297。[222] T. Tan、Z. Yuan、H. Zhang、G. Yan、S. Zhou、N. An、B. Peng、G. Soavi、Y. Rao、B. Yao，Nat. Commun. 2021，12，1。[223] Jiayang Wu、H. Lin、D. J. Moss、T. K. Loh、Baohua Jia，《氧化石墨烯在电子学、光子学和光电子学中的应用》，《自然综述：化学》7（2023）。doi.org/10.1038/s41570-022-00458-7。[224] Yuning Zhang、Jiayang Wu、Yang Qu、Yunyi Yang、Linnan Jia、Baohua Jia 和 David J. Moss，《涂覆氧化石墨烯薄膜的氮化硅波导中增强的超连续谱产生》，《先进材料技术》8（1）（2023）。DOI：10.1002/admt.202201796。[225] L. Jia 等，《二维 $NbTe_2$ 薄膜中的超快载流子动力学》，《ACS应用纳米材料》5（12），17348–17355（2022）。DOI：10.1021/acsanm.2c04333。[226] Yang Qu、Jiayang Wu、Yuning Zhang、Yunyi Yang、Linnan Jia、Baohua Jia 和 David J. Moss，《氧化石墨烯涂层集成波导中的光热调谐》，《微型机械》13，1194（2022）。[227] Yuning Zhang、Jiayang Wu、Yunyi Yang、Yang Qu、Houssein El Dirani、Romain Crochemore、Corrado Sciancalepore、Pierre–Demongodin、Christian Grillet、Christelle Monat、Baohua Jia 和 David J. Moss，《集成二维氧化石墨烯薄膜的氮化硅波导中增强的自相位调制》，《IEEE量子电子学精选主题期刊》28，Early Access（2022）。DOI：10.1109/JSTQE.2022.3177385[228] Yuning Zhang、Jiayang Wu、Yunyi Yang、Yang Qu、Linnan Jia、Baohua Jia 和 David J. Moss，《集成二维氧化石墨烯薄膜的硅纳米线中飞秒光脉冲的光谱展宽增强》，《微型机械》13，756（2022）。DOI：10.3390/mi13050756（2022）。

[229] Linnan Jia、Jiayang Wu、Yuning Zhang，Yang Qu、Baohua Jia、Zhigang Chen 和 David J. Moss，“二维材料片上集成的制备技术”，***Small: Methods*** **6**2101435（2022）。

[230] S. Radic，和 D. J. Moss、B. J. Eggleton，〈通信中的非线性光学：从严重干扰到超快工具〉，第 20 章，第 759–828 页，载于《光纤通信 V：组件与子系统》，Ivan P. Kaminow、Tingye Li 和 Alan E. Willner 编，Academic Press，英国牛津（2008）。

[231] J. Leuthold、C. Koos 和 W. Freude，〈非线性硅光子学〉，《自然·光子学》，第 4 卷，第 8 期，535–544（2010）。

[232] L. Li 等，〈多通道信号的全光再生器〉，《自然·通讯》，第 8 卷，文章编号：884（2017）。

[233] F. Li 等，〈通过硅纳米线中的四波混频实现用于 40 Gb/s DPSK信号的全光异或逻辑门〉，《光学快报》，第 19 卷，第 21 期，20364–20371（2011）。DOI：10.1364/OE.19.020364。

[234] F. Li 等，“通过硅纳米线中的四波混频实现 160Gb/s 无误码全光解复用”，《光学快报》，第 18 卷，第 4 期，第 3905–3910 页（2010 年）。DOI：10.1364/OE.18.003905。

[235] H. Ji 等，“使用硅波导对 OTDM DPSK 数据信号进行 1.28Tb/s 解复用”，Photonics Technology Letters，第 22 卷，第 23 期，第 1762–1764 页（2010 年）。

[236] C. Monat 等，“使用傅里叶光学研究硅慢光子晶体波导中三次谐波产生的相位匹配”，《光学快报》，第 18 卷，第 7 期，第 6831–6840 页（2010 年）。DOI：10.1364/OE.18.006831。

[237] B. Corcoran 等，《利用慢光在硅芯片上实现 640Gb/s 光信号处理》，《光学快报》，第 18 卷，第 8 期，第 7770-7781 页（2010）。DOI：10.1364/OE.18.007770。[238] V. G. Ta’eed 等，《硫系波导中的集成全光脉冲再生器》，Optics Letters，第 30 卷，第 21 期，第 2900-2902 页（2005）。[239] M. Rochette 等，《2R光再生器对误码率的改善》，IEEE 光子学技术快报，第 17 卷，第 4 期，第 908-910 页（2005）。[240] M. Ferrera 等，《兼容CMOS的集成全光射频频谱分析仪》，《光学快报》，第 22 卷，第 18 期，第 21488–21498 页（2014）。DOI：10.1364/OE.22.021488。

[241] C. Monat 等，《基于硅光子晶体波导中三次谐波产生的集成光学自相关器》，《自然·通讯》，第 5 卷，文章编号：3246（2014）。doi：10.1038/ncomms4246。[242] F. Li 等，《硅环形谐振腔中 10 Gb/s DPSK信号的全光波长转换》，《光学快报》，第 19 卷，第 23 期，第 22410-22416 页（2011）。[243] T. D. Vo 等，《基于硅芯片的 640 Gbit/s DPSK信号实时色散监测》，IEEE《光波技术杂志》，第 29 卷，第 12 期，第 1790-1796 页（2011）。[244] M. Ferrera 等，《芯片上的全光1st 和2nd 阶积分》，《光学快报》，第 19 卷，第 23 期，第 23153-23161 页，2011。[245] B. Corcoran 等，《基于硅纳米线的射频频谱分析仪》，《光学快报》，第 18 卷，第 19 期，第 20190-20200 页（2010）。DOI：10.1364/OE.18.020190。[246] B. Corcoran 等，《通过光子晶体波导中的慢光增强三次谐波产生实现硅中的绿光发射》，《自然·光子学》，第 3 卷，第 4 期，第 206-210 页（2009）。doi：10.1038/nphoton.2009.28。[247] D. J. Moss、H. M. van Driel 和 J. E. Sipe，《硅中光学三次谐波产生各向异性的色散》，《光学快报》，第 14 卷，第 1 期，第 57-59 页（1989）。

[248] J. E. Sipe、D. J. Moss 和 H. M. van Driel，《立方中心对称晶体中光学二次和三次谐波产生的唯象理论》，Physical Review B，第 35 卷，第 3 期，第 1129–1141 页（1987 年）。

[249] D. J. Moss、E. Ghahramani、J. E. Sipe 和 H. M. van Driel，《用于 Si、Ge 和 GaAs 三次谐波产生的χ→(3)色散与各向异性的能带结构计算》，Physical Review B，第 41 卷，第 3 期，第 1542-1560 页（1990）。[250] D. J. Moss、H. M. van Driel 和 J. E. Sipe，《三次谐波产生作为离子注入非晶硅与晶体硅的结构诊断方法》，《应用物理快报》，第 48 卷，第 17 期，第 1150 页（1986）。[251] D. J. Moss 等，《通过硅-绝缘体波导中的双光子吸收实现超快全光调制》，Electronics Letters，第 41 卷，第 6 期，第 320-321 页（2005）。DOI:10.1049/el:20058051[252] M. R. E. Lamont 等，《双光子吸收对基于自相位调制的2R光再生的影响》，Photonics Technology Letters，第 18 卷，第 10 期，第 1185-1187 页（2006）。DOI:10.1109/LPT.2006.874718。

[253] A. Tuniz、G. Brawley、D. J. Moss 和 B. J. Eggleton，《双光子吸收对单模 As2Se3 硫系玻璃光纤中拉曼增益的影响》，《光学快报》，第 16 卷，第 22 期，第 18524-18534 页（2008）。DOI: 10.1364/OE.16.018524。[254] M. D. Pelusi、F. Luan、E. Magi、M. R. E. Lamont、D. J. Moss、B. J. Eggleton、J. S. Sanghera、L. B. Shaw 和 I. D. Aggarwal，《光纤光子线中的高速率全光信号处理》，《光学快报》第 16 卷，第 11506-11512 页（2008）。[255] M. Lee 等，《硫系光子晶体波导的光敏后调谐》，《光学快报》，第 15 卷，第 3 期，第 1277-1285 页（2007）。DOI:10.1364/OE.15.001277[256] S. Tomljenovic-Hanic、M. J. Steel、C. M. d. Sterke 和 D. J. Moss，《光敏光子晶体中的高Q腔》，Optics Letters，第 32 卷，第 5 期，第 542-544 页（2007）。[257] C. Grillet 等，《纳米线与光子晶体纳米腔耦合以实现单光子源》，《光学快报》，第 15 卷，第 3 期，第 1267-1276 页（2007）。DOI:10.1364/OE.15.001267[258] V. G. Ta’eed 等，《超快全光硫系玻璃光子电路》，《光学快报》，第 15 卷，第 15 期，第 9205-9221 页（2007）。[259] D. Freeman 等，《硫系玻璃光子晶体器件》，《光子与电磁晶体结构》，《光子学与纳米结构：基础与应用》，Science Direct Elsevier Publishing，第 6 卷，第 1 期，第 3-11 页（2008）。doi:10.1016/j.photonics.2007.11.001。[260] C. Grillet 等，《硫系光子晶体膜中 Fano共振的表征与建模》，《光学快报》，第 14 卷，第 1 期，第 369-376 页（2006）。[261] V. G. Ta’eed 等，《硫系波导中基于自相位调制的集成光再生》，《IEEE量子电子学精选主题期刊》，第 12 卷，第 3 期，第 360-370 页（2006）。[262] M. Shokooh-Saremi 等，《利用改进型萨格纳克干涉仪写入硫系脊形波导的高性能布拉格光栅：实验与建模》，Journal of the Optical Society of America B（JOSA B），第 23 卷，第 7 期，第 1323-1331 页（2006）。[263] M. R. E. Lamont 等，《在 5 cm 长的 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导中通过交叉相位调制实现无误差波长转换》，Electronics Letters，第 43 卷，第 945-947 页（2007）。

[264] K. Ikeda、R. E. Saperstein、N. Alic 和 Y. Fainman，“热学和克尔非线性性质 o f

等离子体沉积氮化硅/二氧化硅波导”，《光学快报》，第 16 卷，页码 12987–1299（ 4 2008）。[265] A. Pasquazi 等，“芯片上的亚皮秒相位敏感光脉冲表征”，《自然·光子学》，第 5 卷，第 10 期，页码 618-623（2011）。DOI：10.1038/nphoton.2011.199。[266] D. Duchesne、M. Peccianti、M. R. E. Lamont 等，“高折射率掺杂二氧化硅玻璃螺旋波导中的超连续谱产生”，《光学快报》，第 18 卷，第 2 期，页码 923-930（2010）。[267] M. Ferrera 等，“片上兼容CMOS的全光积分器”，《自然·通讯》，第 1 卷，文章编号 29（2010）。[268] A. Pasquazi 等，“集成环形谐振器中的全光波长转换”，《光学快报》，第 18 卷，第 4 期，页码 3858-3863 （ 2010 ）。[269] A. Pasquazi 、 Y. Park 、 J. Azana 等，“ 通过高折射率掺杂二氧化硅波导中的四波混频实现高效波长转换和净参量增益”，《光学快报》，第 18 卷，第 8 期，页码 7634-7641（2010）。[270] M. Peccianti、M. Ferrera、L. Razzari 等，“通过集成非线性啁啾器实现亚皮秒光脉冲压缩”，《光学快报》，第 18 卷，第 8 期，页码 7625-7633（2010）。[271] D. Duchesne、M. Ferrera、L. Razzari 等，“低损耗、高折射率掺杂二氧化硅玻璃集成波导中的高效自相位调制”，《光学快报》，第 17 卷，第 3 期，页码 1865-1870（2009）。[272] C. Grillet 等，“具有创纪录高非线性、品质因数和光学稳定性的非晶硅纳米线”，《光学快报》，第 20 卷，第 20 期，页码 22609-22615（ 2012）。[273] J. W. Choi、B. Sohn、G. F. R. Chen、D. K. T. Ng 和 D. T. H. Tan，“兼容CMOS的超富硅氮化物波导中的孤子效应光脉冲压缩”，APL Photonics，HIBSP2019，页码 110804（2020）。[274] D. J. Moss、R. Morandotti、A. L. Gaeta 等，“基于氮化硅和 Hydex 的新型兼容CMOS平台：用于非线性光学”，《自然·光子学》，第 7 卷，第 8 期，页码 597-607 （ 2013 ）。[275] A. Pasquazi 、 M. Peccianti 、 L. Razzari 、 D. J. Moss 、 S. Coen、M. Erkintalo、Y. K. Chembo、T. Hansson、S. Wabnitz、P. Del'Haye、X. X. Xue、A. M. Weiner 和 R. Morandotti，“微梳：新一代光源”，Physics Reports，第 729 卷，页码 1-81（2018）。

[276] P. Del’Haye、A. Schliesser、O. Arcizet、T. Wilken、R. Holzwarth 和 T. J. Kippenberg，“单片微谐振器产生光学频率梳”，《自然》，第 450 卷，页码 1214–1217（2007）。[277] M. Peccianti 等，“超快非线性微腔锁模激光器的演示”，《自然·通讯》，第 3 卷，页码 765（2012）。[278] M. Kues 等，“具有超窄光谱宽度的被动锁模激光器”，《自然·光子学》，第 11 卷，第 3 期，页码 159（2017）。DOI：10.1038/nphoton.2016.271[279] A. Pasquazi、L. Caspani、M. Peccianti 等，“兼容CMOS的微环谐振器中的自锁定光学参量振荡：实现片上稳健光学频率梳产生的途径”，《光学快报》，第 21 卷，第 11 期，页码 13333-13341（2013）。[280] A. Pasquazi、M. Peccianti、B. E. Little 等，“基于微环谐振器的稳定双模高重复频率锁模激光器”，《光学快报》，第 20 卷，第 24 期，页码 27355-27362（2012）。[281] D. T. Spencer 等，“采用集成光子学的光学频率合成器”，《自然》，第 557 卷，第 7703 期，页码 81-85，2018。[282] T. J. Kippenberg、A. L. Gaeta、M. Lipson 和 M. L. Gorodetsky，“光学微谐振器中的耗散克尔孤子”，《科学》，第 361 卷，第 6402 期，2018。[283] A. L. Gaeta、M. Lipson 和 T. J. Kippenberg，“基于光子芯片的频率梳”，《自然·光子学》，第 13 卷，第 3 期，页码 158-169，2019 年 3 月。[284] P. Del’Haye、T. Herr、E. Gavartin、M. L. Gorodetsky、R. Holzwarth 和 T. J. Kippenberg，“来自微谐振器的跨倍频程可调谐频率梳”，《物理评论快报》，第 107 卷，第 6 期，页码 063901，2011。[285] T. J. Kippenberg、R. Holzwarth、S. A. Diddams，“基于微谐振器的光学频率梳”，《科学》，第 332 卷，第 6029 期，页码 555-559，2011年。[286] T. Herr、V. Brasch、J. D. Jost、C. Y. Wang、N. M. Kondratiev、M. L. Gorodetsky 等，“光学微谐振器中的时间孤子”，《自然·光子学》，第 8 卷，第 2 期，页码 145-152，2014。[287] F. Ferdous、H. Miao、D. E. Leaird、K. Srinivasan、J. Wang、L. Chen、L. T. Varghese 和 A. M. Weiner，“片上微谐振器频率梳的逐谱线脉冲整形”，《自然·光子学》，第 5 卷，第 12 期，页码 770，2011。

[288] X. Xue、P. H. Wang、Y. Xuan、M. Qi 和 A. M. Weiner，《高转换效率的微谐振器克尔频率梳》，《激光与光子学评论》，第 11 卷，第 1 期，2017年。[289] X. Xue、M. Qi 和 A. M. Weiner，《正常色散微谐振器克尔频率梳》，《纳米光子学》，第 5 卷，第 2 期，第 244–262 页，2016。[290] D. C. Cole、E. S. Lamb、P. Del'Haye、S. A. Diddams 和 S. B. Papp，《克尔谐振腔中的孤子晶体》，《自然·光子学》，第 11 卷，第 10 期，第 671–676 页，2017年10月。[291] W. Wang、Z. Lu、W. Zhang、S. T. Chu、B. E. Little、L. Wang、X. Xie、M. Liu、Q. Yang、L. Wang、J. Zhao、G. Wang、Q. Sun、Y. Liu、Y. Wang 和 W. Zhao，《热控微腔中的稳健孤子晶体》，《光学快报》，第 43 卷，第 9 期，第 2002–2005 页，2018 年。[292] B. Stern 、 X. Ji 、 Y. Okawachi 、 A. L. Gaeta 和 M. Lipson，《电池供电的集成频率梳发生器》，《自然》，第 562 卷，第 7727 期，第 401 页，2018年。[293] X. Xue 等，《正常色散微谐振器中的锁模暗脉冲克尔频率梳》，《自然·光子学》，第 9 卷，第 9 期，第 594 页。（2015年）。[294] H. Bao 等，《激光腔孤子微梳》，《自然·光子学》，第 13 卷，第 6 期，第 384–389 页（2019年）。[295] Maxwell Rowley、Pierre-Henry Hanzard、Antonio Cutrona、Hualong Bao、Sai T. Chu、Brent E. Little、Roberto Morandotti、David J. Moss、Gian-Luca Oppo、Juan Sebastian Totero Gongora、Marco Peccianti 和 Alessia Pasquazi，“微腔中稳健孤子的自发涌现”，《自然》**608**（7922）303 – 309（2022年）。[296] Antonio Cutrona、Maxwell Rowley、Debayan Das、Luana Olivieri、Luke Peters、Sai T. Chu、Brent L. Little、Roberto Morandotti、David J. Moss、Juan Sebastian Totero Gongora、Marco Peccianti、Alessia Pasquazi，《激光腔孤子微梳中的高转换效率》，《光学快报》第 30 卷，第 22 期，第 39816–39825 页（2022年）。[297] X. Xue、X. Zheng 和 B. Zhou，《相互耦合光学腔中的超高效时间孤子》，《自然·光子学》，2019年5月。[298] H. Zhou 等，《辅助微腔中的孤子突发与确定性耗散克尔孤子生成》，《光：科学与应用》，第 8 卷，第 1 期，第 50 页，2019年。[299] H. Bao 等，《嵌套微谐振腔光纤激光器中的图灵斑图：稳健且可控的微梳生成》，《物理评论研究》，第 2 卷，第 023395 页（2020年）。

[300] L. D. Lauro、J. Li、D. J. Moss、R. Morandotti、S. T. Chu、M. Peccianti 和 A. Pasquazi，《微腔中热自脉动的参量控制》，《光学快报》第 42 卷，第 17 期，第 3407–3410 页，2017年8月。[301] H. Bao 等，《滤波器驱动的四波混频激光器中的 II 型微梳生成》，《光子学研究》，第 6 卷，第 5 期，第 B67–B73 页（2018年）。[302] B. Shen、Chang, L.、Liu, J. 等，《集成式交钥匙孤子微梳》，《自然》，第 582 卷，第 365–369 页，2020年。[303] C. Reimer、L. Caspani、M. Clerici 等，《预示单光子的集成频率梳光源》，《光学快报》，第 22 卷，第 6 期，第 6535–6546 页（2014年）。[304] C. Reimer 等，《片上交叉偏振光子对生成与双波长泵浦光学参量振荡》，《自然·通讯》，第 6 卷，文章编号 8236（2015年）。DOI：10.1038/ncomms9236[305] L. Caspani、C. Reimer、M. Kues 等，《片上量子关联光子对多频光源：迈向集成量子频率梳》，《纳米光子学》，第 5 卷，第 2 期，第 351–362 页（2016年）。[306] C. Reimer、M. Kues、P. Roztocki、B. Wetzel、F. Grazioso、B. E. Little、S. T. Chu、T. Johnston、Y. Bromberg、L. Caspani、D. J. Moss 和 R. Morandotti，《利用集成频率梳生成多光子纠缠量子态》，《科学》，第 351 卷，第 6278 期，第 1176–1180 页（2016年）。[307] M. Kues 等，《片上生成高维纠缠量子态及其相干控制》，《自然》，第 546 卷，第 7660 期，第 622–626 页（2017年）。[308] P. Roztocki、M. Kues、C. Reimer、B. Wetzel、S. Sciara、Y. Zhang、A. Cino、B. E. Little、S. T. Chu、D. J. Moss 和 R. Morandotti，《生成脉冲量子频率梳的实用系统》，《光学快报》，第 25 卷，第 16 期，第 18940–18949 页（2017年）。[309] Y. Zhang 等，《集成腔中两个四波混频过程叠加所诱导的光子关联》，《激光与光子学评论》，第 14 卷，第 7 期，2000128（2020年）。DOI：10.1002/lpor.202000128[310] M. Kues、C. Reimer、A. Weiner、J. Lukens、W. Munro、D. J. Moss 和 R. Morandotti，《量子光学微梳》，《自然·光子学》，第 13 卷，第 3 期，第 170–179 页（2019年）。

[311] C. Reimer 等，“基于 d 能级簇态实现的高维单向量子处理”，《自然·物理》，第 15 卷，第 2 期，第 148–153 页（2019年）。[312] P. Marin-Palomo 等，“基于微谐振器的孤子实现大规模并行相干光通信”，《自然》，第 546 卷，第 7657 期，第 274 页（2017）。[313] J. Pfeifle、V. Brasch、M. Lauermann、Y. Yu、D. Wegner、T. Herr、K. Hartinger 等，“利用微腔克尔频率梳实现相干太比特通信”，《自然·光子学》，第 8 卷，第 5 期，第 375–380 页，2014。

[314] B. Corcoran 等，“利用单芯片光源通过标准光纤进行超密集光数据传输”，《自然·通讯》，第 11 卷，文章编号：2568（2020年）。DOI：10.1038/s41467-020- 16265-x。

[315] X.,Xu 等，《基于克尔微梳的光子感知器，用于可扩展高速光神经网络》，《激光与光子学评论》，第 14 卷，第 8 期，2000070（2020年）。DOI:10.1002/lpor.202000070。

[316] X.. Xu 等，《用于深度学习卷积光神经网络的 11 TeraFLOPs 光子卷积加速器》，《自然》，第 589 卷（7840），44-51（2021年）。

[317] J. Feldmann 等，《并行卷积处理技术，采用集成光子

[318] Yunping Bai、Xingyuan Xu,1、Mengxi Tan、Yang Sun、Yang Li、Jiayang Wu、Roberto Morandotti、Arnan Mitchell、Kun Xu 和 David J. Moss，“用于神经形态计算的光子复用技术”，《纳米光子学》11（2022年）。DOI：10.1515/nanoph-2022-0485。

[319] Xingyuan Xu、Weiwei Han、Mengxi Tan、Yang Sun、Yang Li、Jiayang Wu、Roberto Morandotti、Arnan Mitchell、Kun Xu 和 David J. Moss，“基于波分复用的神经形态计算”，《IEEE量子电子学精选主题期刊》**29**第2期，文章编号7400112（2023年）。DOI：10.1109/JSTQE.2022.3203159。

[320] Yang Sun、Jiayang Wu、Mengxi Tan、Xingyuan Xu、Yang Li、Roberto Morandotti、Arnan Mitchell 和 David Moss，“光学微梳的应用”，《光学与光子学进展》第14卷第4期（2022年）。https://doi.org/10.1364/AOP.470264。

[321] J. Capmany 和 D. Novak，《微波光子学融合两个世界》，《自然·光子学》，第 1 卷，第 6 期，第 319-330 页，2007。

[322] J. P. Yao，《微波光子学》，《光波技术杂志》，第 27 卷，第 1-4 期，第 314-335 页，2009 年 1-2 月。[323] D. Marpaung、J. Yao 和 J. Capmany，《集成微波光子学》，《自然·光子学》，第 13 卷，第 2 期，第 80-90 页，2019 年 2 月。[324] J. Azaña，《基于光纤光栅器件的超快模拟全光信号处理器》，《IEEE 光子学杂志》，第 2 卷，第 3 期，第 359-386 页，2010。[325] J. Capmany、B. Ortega 和 D. Pastor，《微波光子滤波器教程》，《光波技术杂志》，第 24 卷，第 1 期，第 201-229 页，2006。[326] V. R. Supradeepa 等，《具有快速可调性和高选择性的基于梳状谱的射频光子滤波器》，《自然·光子学》，第 6 卷，第 3 期，第 186-194 页，2012 年 3 月。[327] J. Wu、X. Xu、T. G. Nguyen、S. T. Chu、B. E. Little、R. Morandotti、A. Mitchell 和 D. J. Moss，《射频光子学：光学微梳视角》，《IEEE量子电子学精选主题期刊》，第 24 卷，第 4 期，6101020（2018）。DOI：10.1109/JSTQE.2018.2805814。[328] V. Torres-Company 和 A. M. Weiner，《用于超宽带射频光子学的光学频率梳技术》，Laser Photonics Rev，第 8 卷，第 3 期，第 368-393 页，2014 年 5 月。[329] Z. Jiang、C. B. Huang、D. E. Leaird 和 A. M. Weiner，《对 100 多个光谱梳齿进行光学任意波形处理》，《自然·光子学》，第 1 卷，第 8 期，第 463-467 页，2007 年 8 月。[330] Y. Liu、J. Hotten、A. Choudhary、B. J. Eggleton 和 D. Marpaung，《全优化集成射频光子陷波滤波器》，《光学快报》，第 42 卷，第 22 期，第 4631-4634 页，2017 年 11 月 15 日。[331] Y. Liu、D. Marpaung、A. Choudhary、J. Hotten 和 B. J. Eggleton，《芯片级氮化硅微波光子滤波器的链路性能优化》，《光波技术杂志》，第 36 卷，第 19 期，第 4361-4370 页，2018。[332] Y. Liu、Y. Yu、S. X. Yuan、X. B. Xu 和 X. L. Zhang，《基于二氧化硅微球腔的可调兆赫兹带宽微波光子陷波滤波器》，《光学快报》，第 41 卷，第 21 期，第 5078-5081 页，2016 年 11 月 1 日。[333] A. Choudhary、B. Morrison、I. Aryanfar、S. Shahnia、M. Pagani、Y. Liu、K. Vu、S. Madden、D. Marpaung 和 B. J. Eggleton，《利用芯片上巨大布里渊增益实现先进的集成微波信号处理》，《光波技术杂志》，第 35 卷，第 4 期，第 846-854 页，2017 年 2 月 15 日。

[334] X. Q. Zhu、F. Y. Chen、H. F. Peng 和 Z. Y. Chen，“具有任意滤波形状和线性相位的新型可编程微波光子滤波器”，Opt. Express，第25卷，第8期，第9232-9243页，2017年4月17日。[335] E. Hamidi、D. E. Leaird 和 A. M. Weiner，“基于光学频率梳的可调谐可编程微波光子滤波器”，IEEE Journal of Microwave Theory，第58卷，第11期，第3269-3278页，2010年11月。[336] R. Wu 等，“利用由定制射频波形驱动的级联强度和相位调制器，从连续波激光器产生极平坦的光学频率梳”，《光学快报》，第35卷，第19期，第3234-3236页，2010年。[337] S. Mansoori 和 A. Mitchell，“使用声光可调谐滤波器的射频横向滤波器”，IEEE Photonic Tech L，第16卷，第3期，第879-881页，2004年。[338] W. Z. Li 和 J. P. Yao，“基于使用两个马赫-曾德调制器和非对称马赫-曾德干涉仪重复移频的光学频率梳产生”，Opt. Express，第17卷，第26期，第23712-23718页，2009年12月21日。[339] C. H. Chen、C. He、D. Zhu、R. H. Guo、F. Z. Zhang 和 S. L. Pan，“基于级联偏振调制器和相位调制器产生平坦光学频率梳”，《光学快报》，第38卷，第16期，第3137-3139页，2013年8月15日。[340] T. Saitoh、M. Kourogi 和 M. Ohtsu，“使用波导型光学频率梳发生器在1.5微米波长处实现的光频率合成器”，IEEE Photonic Tech L，第8卷，第11期，第1543-1545页，1996年11月。[341] T. G. Nguyen 等，“基于集成频率梳光源的希尔伯特变换器，用于宽带微波光子相位分析”，Opt. Express，第23卷，第17期，第22087-22097页（2015）。[342] X. Xue 等，“基于微环中克尔光频梳的可编程单带通光子射频滤波器”，《光波技术杂志》，第32卷，第20期，第3557-3565页，2014年10月。[343] X. Xu、J. Wu、M. Shoeiby、T. G. Nguyen、S. T. Chu、B. E. Little、R. Morandotti、A. Mitchell 和 D. J. Moss，“基于集成光学频率梳源的可重构宽带微波光子强度微分器”，APL Photonics，第2卷，第9期，096104（2017年）。

[344] X. Xu、M. Tan、J. Wu、R. Morandotti、A. Mitchell 和 D. J. Moss，“基于微梳的光子射频信号处理”，IEEE 光子学技术快报，第31卷，第23期，第1854-1857页（2019年）。[345] X. Xu 等，“基于集成光学频率梳源的高级射频与微波功能”，Opt. Express，第26卷，第3期，第2569-2583页（2018年）。[346] X. Xue 等，“用于微波波束成形并实现任意波束图控制的基于微梳的真时延网络”，《光波技术杂志》，第36卷，第12期，第2312-2321页，2018年六月。[347] X. Xu 等，“基于集成光学频率克尔梳源的宽带射频信道化器”，《光波技术杂志》，第36卷，第19期，第4519-4526页（2018年）。[348] X. Xu 等，“基于微环谐振器的连续可调正交偏振射频光学单边带发生器”，《光学杂志》，第20卷，第11期，115701（2018年）。[349] X. Xu 等，“基于集成微环谐振器的正交偏振射频光学单边带生成与双通道均衡”，《光波技术杂志》，第36卷，第20期，第4808-4818页（2018年）。[350] X. Xu 等，“使用49 GHz自由光谱范围集成光学微梳源为相控阵天线提供光子微波真时延”，《光子学研究》，第6卷，第5期，第B30-B36页（2018年）。[351] X. Xu 等，“基于集成光学微梳源、具有80个抽头的高级自适应光子射频滤波器”，《光波技术杂志》，第37卷，第4期，第1288-1295页（2019年）。[352] W. Liang 等，“高光谱纯度克尔频率梳射频光子振荡器”，《自然·通讯》，第6卷，第7957页，2015年。[353] J. Liu 等，“使用集成孤子微梳在X波段和K波段产生光子微波”，《自然·光子学》，第14卷，第1-6页，2020年。[354] X. Xu 等，“基于集成光学微梳源的宽带微波频率转换”，《光波技术杂志》，第38卷，第2期，第332-338页（2020年）。[355] M. Tan 等，“基于49 GHz和200 GHz克尔微梳的光子射频与微波滤波器”，《光学通讯》，第465卷，文章编号：125563，2月22日（2020年）。

[356] X. Xu 等人，“基于孤子晶体微梳、具有 90 个信道的宽带光子射频信道化器”，《光波技术杂志》，第 38 卷，第 18 期，第 5116–5121 页（2020年）。doi: 10.1109/JLT.2020.2997699。[357] X. Xu 等人，“基于孤子晶体微梳的光子射频与微波积分器”，IEEE《电路与系统汇刊 II：简报》，第 67 卷（第 12 期），第 3582–3586 页（2020年）。[358] X. Xu 等人，“基于微梳光源的光子射频相位编码信号生成”，《光波技术杂志》，第 38 卷，第 7 期，第 1722–1727 页（2020年）。[359] X. Xu 等人，“利用带宽扩展和克尔微梳实现高性能射频滤波器”，APL Photonics，第 4 卷，第 2 期，第 026102 页（2019年）。[360] M. Tan 等人，“基于 50 GHz 克尔微梳的微波与射频光子分数阶希尔伯特变换器”，《光波技术杂志》，第 37 卷，第 24 期，第 6097–6104 页（2019年）。[361] M. Tan 等人，“基于光子学的射频与微波分数阶微分器”，IEEE《电路与系统汇刊：简报》，第 67 卷，第 11 期，第 2767–2771 页（2020年）。[362] M. Tan 等人，“基于孤子晶体微梳光源的光子射频任意波形发生器”，《光波技术杂志》，第 38 卷，第 22 期，第 6221–6226 页，10月22日（2020年）。DOI：10.1109/JLT.2020.3009655。[363] M. Tan、X. Xu、J. Wu、R. Morandotti、A. Mitchell 和 D. J. Moss，“基于克尔微梳的射频与微波高带宽信号处理”，《物理学进展 X》，第 6 卷，第 1 期，1838946（2020年）。DOI: 10.1080/23746149.2020.1838946。[364] J. P. Yao，“微波光子学”，《光波技术杂志》，第 27 卷，第 1–4 期，第 314–335 页，2009年1月。[365] S. L. Pan 和 J. P. Yao，“基于光子学的宽带微波测量”，《光波技术杂志》，第 35 卷，第 16 期，第 3498–3513 页，2017。[366] J. Azana、C. Madsen、K. Takiguchi 和 G. Cincotti，“客座编者按——光信号处理”，《光波技术杂志》，第 24 卷，第 7 期，第 2484–2486 页，2006年7月。[367] R. A. Minasian，“微波信号的超宽带自适应光子信号处理”，IEEE《量子电子学杂志》，第 52 卷，第 1 期，2016。[368] X. H. Zou、B. Lu、W. Pan、L. S. Yan、A. Stohr 和 J. P. Yao，“用于微波测量的光子学”，《激光与光子学评论》，第 10 卷，第 5 期，第 711–734 页，2016年9月。

[369] K. Xu、R. X. Wang、Y. T. Dai、F. F. Yin、J. Q. Li、Y. F. Ji 和 J. T. Lin，“微波光子学：光纤无线电链路、系统与应用”，《光子学研究》，第 2 卷，第 4 期，第 B54–B63 页，2014年8月。[370] S. L. Pan、D. Zhu、S. F. Liu、K. Xu、Y. T. Dai、T. L. Wang、J. G. Liu、N. H. Zhu、Y. Xue 和 N. J. Liu，“卫星有效载荷的效益”，《IEEE微波杂志》，第 16 卷，第 8 期，第 61–73 页，2015年9月。[371] H. W. Chen、R. Y. Li、C. Lei、Y. Yu、M. H. Chen、S. G. Yang 和 S. Z. Xie，“采用奈奎斯特带宽检测的光子辅助串行信道化射频测量系统”，IEEE Photonics J.，第 6 卷，第 6 期，2014年12月。[372] X. J. Xie、Y. T. Dai、Y. Ji、K. Xu、Y. Li、J. Wu 和 J. T. Lin，“基于 39 GHz光频梳的宽带光子射频信道化”，IEEE Photonic Tech. L.，第 24 卷，第 8 期，第 661–663 页，2012年4月。[373] W. S. Wang、R. L. Davis、T. J. Jung、R. Lodenkamper、L. J. Lembo、J. C. Brock 和 M. C. Wu，“基于衍射光栅的相干光学射频信道化器的表征”，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第 49 卷，第 10 期，第 1996–2001 页，2001年10月。[374] W. T. Rhodes，“声光信号处理：卷积与相关”，IEEE 会刊，第 69 卷，第 1 期，第 65–79 页，1981年1月。[375] S. T. Winnall、A. C. Lindsay、M. W. Austin、J. Canning 和 A. Mitchell，“基于集成光学布拉格光栅法布里-珀罗腔和集成混合菲涅耳透镜系统的微波信道化器与光谱仪”，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第 54 卷，第 2 期，第 868–872 页，2006年2月。[376] W. Y. Xu、D. Zhu 和 S. L. Pan，“ 基于双相干光频梳和受激布里渊散射的相干光子射频信道化 ”，《光学工程》，第 55 卷，第 4 期，2016年4月。[377] X. H. Zou、W. Z. Li、W. Pan、L. S. Yan 和 J. P. Yao，“基于频谱控制的受激布里渊散射、具有改进信道特性的光子辅助微波信道化器”，《IEEE微波理论与技术汇刊》，第 61 卷，第 9 期，第 3470–3478 页，2013年9月。[378] Choudhary、B. Morrison、I. Aryanfar、S. Shahnia、M. Pagani、Y. Liu、K. Vu、S. Madden、D. Marpaung 和 B. J. Eggleton，“基于片上巨大布里渊增益的先进集成微波信号处理”，《光波技术杂志》，第 35 卷，第 4 期，第 846–854 页（2017年）。

[379] S. Bres、S. Zlatanovic、A. O. J. Wiberg、J. R. Adleman、C. K. Huynh、E. W. Jacobs、J. M. Kvavle 和 S. Radic，《参量光子信道化射频接收机》，IEEE Photonic Tech. L.，第 23 卷，第 6 期，第 344-346 页，2011年3月。[380] O. J. Wiberg、D. J. Esman、L. Liu、J. R. Adleman、S. Zlatanovic、V. Ataie、E. Myslivets、B. P. P. Kuo、N. Alic、E. W. Jacobs 和 S. Radic，《基于宽带参量混频器的相干无滤波宽带微波/毫米波信道化器》，《光波技术杂志》，第 32 卷，第 20 期，第 3609-3617 页，2014年10月。

[381] X. H. Zou、W. Pan、B. Luo 和 L. S. Yan，“利用光谱切片非相干光源进行多频分量测量的光子学方法”，《光学快报》，第 35 卷，第 3 期，第 438–440 页，2010 年 2 月。

[382] F.Volkening，“采用密集波分复用的光子信道化射频接收机”，美国专利 724 583 3B1，2007 年。

[383] X. J. Xie、Y. T. Dai、K. Xu、J. Niu、R. X. Wang、L. Yan 和 J. T. Lin，“基于相干光频梳和 I/Q解调器的宽带光子射频信道化”，IEEE Photonics J.，第 4 卷，第 4 期，第 1196–1202 页，2012 年 8 月。

[384] Z. Li、X. M. Zhang、H. Chi、S. L. Zheng、X. F. Jin 和 J. P. Yao，《基于光频梳、采用密集波分复用的可重构微波光子信道化接收机》，Opt. Commun.，第 285 卷，第 9 期，第 2311-2315 页，2012年。

[385] R. Y. Li、H. W. Chen、Y. Yu、M. H. Chen、S. G. Yang 和 S. Z. Xie，《多 -频率基于采用光波长扫描的串行光子信道化的测量》，《光学快报》，第 38 卷，第 22 期，第 4781-4784 页，2013 年 11 月。

[386] W. H. Hao、Y. T. Dai、F. F. Yin、Y. Zhou、J. Q. Li、J. Dai、W. Z. Li 和 K. Xu，《通过锁模激光器和色散实现的基于啁啾脉冲的宽带射频信道化》，《光学快报》，第 42 卷，第 24 期，第 5234-5237 页，2017 年 12 月。

[387] T. Herr, K. Hartinger, J. Riemensberger, C. Y. Wang, E. Gavartin, R. Holzwarth, M. L. Gorodetsky 和 T. J. Kippenberg，《微谐振器中克尔频率梳的普适形成动力学与噪声》，《自然·光子学》，第 6 卷，第 7 期，480–487 页（2012年）。

[388] L. Caspani、C. Xiong、B. Eggleton、D. Bajoni、M. Liscidini、M. Galli、R. Morandotti、David J. Moss，《片上量子关联与纠缠光子源》，《自然：光：科学与应用》，第 6 卷，e17100（2017）；doi：10.1038/lsa.2017.100。

[389] F. Da Ros、E. P. da Silva、D. Zibar、S. T. Chu、B. E. Little、R. Morandotti、M. Galili、D. J. Moss 和 L. K. Oxenlowe，《低损耗兼容CMOS螺旋波导中的 QAM 信号波长转换》，APL Photonics，第 2 卷，第 4 期（2017）。[390] X. X. Xue 和 A. M. Weiner，《与微谐振器频率梳相连的微波光子学》，Front. Optoelectron.，第 9 卷，第 2 期，第 238–248 页，六月 2016。[391] S. Coen、H. G. Randle、T. Sylvestre 和 M. Erkintalo，《使用广义平均场卢加托-勒费弗模型对跨倍频程克尔频率梳进行建模》，《光学快报》，第 38 卷，第 1 期，第 37–39 页，2013 年 1 月。[392] Y. K. Chembo 和 C. R. Menyuk，《回音壁模式谐振器中克尔频率梳生成的时空卢加托-勒费弗形式体系》，Phys. Rev. A.，第 87 卷，第 5 期，2013 年 5 月。[393] H. Guo、M. Karpov 等，《光学微谐振器中耗散克尔孤子的普适动力学与确定性切换》，Nat. Phys.，第 13 卷，第 1 期，第 94–102 页，2017 年 1 月。[394] X. Xue、Y. Xuan、C. Wang、P.-H. Wang、Y. Liu、B. Niu、D. E. Leaird、M. Qi 和 A. M. Weiner，《氮化硅微环谐振器中克尔频率梳的热调谐》，Opt. Express，第 24 卷，第 1 期，第 687–698 页，2016 年 1 月。[395] B. Bernhardt、A. Ozawa、P. Jacquet、M. Jacquey、Y. Kobayashi、T. Udem、R. Holzwarth、G. Guelachvili、T. W. Hansch 和 N. Picque，《腔增强双梳光谱》，《自然·光子学》，第 4 卷，第 1 期，第 55–57 页，2010 年 1 月。[396] T. Ideguchi 等，《自适应实时双梳光谱》，Nat. Commun.，第 5 卷，3375，2014。[397] G. Millot、S. Pitois、M. Yan、T. Hovhannisyan、A. Bendahmane、T. W. Hansch 和 N. Picque，《频率灵活双梳光谱》，《自然·光子学》，第 10 卷，第 1 期，第 27–37 页，2016 年 1 月。[398] M. G. Suh、Q. F. Yang、K. Y. Yang、X. Yi 和 K. J. Vahala，《微谐振器孤子双梳光谱》，《科学》，第 354 卷，第 6312 期，第 600–603 页，2016 年 11 月。[399] N. G. Pavlov、G. Lihachev、S. Koptyaev、E. Lucas、M. Karpov、N. M. Kondratiev、I. A. Bilenko、T. J. Kippenberg 和 M. L. Gorodetsky，《晶体微谐振器中的孤子双频率梳》，[400] T. C. Briles、T. Drake、D. Spencer、J. R. Stone、C. Fredrick、Q. Li、D. Westly、B. R. Ilic、X. Yi、K. Y. Yang、K. Vahala、K. Srinivasan、S. Diddams 和 S. Papp，《光学频率合成

使用双克尔微谐振器频　　梳”，载于激光与电光学会议　　—光学，美国光学学会技术文摘（在线版）（美国光学学会，2017），论文编号 SW4N.3。

[401]　B. E. Little、S. T. Chu、P. P. Absil、J. V. Hryniewicz、F. G. Johnson、F. Seiferth、D. Gill、V. Van、O. King 和 M. Trakalo，“用于波分复用应用的超高阶微环谐振器滤波器”，IEEE 光子学技术快报，第 16 卷，第 10 期，2263–2265 页。2004年。

[402] Mengxi Tan、Xingyuan Xu、Jiayang Wu、Thach G. Nguyen、Sai T. Chu、Brent E. Little, Roberto Morandotti、Arnan Mitchell 和 David J. Moss，《基于克尔微梳和集成微环谐振器的光子射频信道化器》，JOSarXiv.202010.0002。

[403]　Mengxi Tan、Xingyuan Xu、Jiayang Wu、Thach G. Nguyen、Sai T. Chu、Brent E. Littl、Arnan Mitchell、Roberto Morandotti 和 David J. Moss，《利用集成环形谐振器实现正交偏振射频光学单边带生成》，JOSarXiv.202010.0001。

[404]　Mengxi Tan、Xingyuan Xu、Jiayang Wu、Thach G. Nguyen、Sai T. Chu、Brent E. Littl、Arnan Mitchell、Roberto Morandotti 和 David J. Moss，《利用集成环形谐振器实现正交偏振射频光学单边带生成》，IOP《半导体学报》42 (4), 041305 (2021)。DOI：10.1088/1674-4926/42/4/041305。2021。

[405]　Mengxi Tan、X. Xu、J. Wu、T. G. Nguyen、S. T. Chu、B. E. Little、R. Morandotti、A. Mitchell 和 David J. Moss，“基于克尔光学微梳的光子射频信道化器”，IOP《半导体学报》**42**（4），041302（2021年）。DOI：10.1088/1674-4926/42/4/041302。