arXiv:2304.00748v1 [physics.optics] 3 Apr 2023

集成光子学应用的夹层混合波导平台

预印本

Rahul K Dash
纳米科学与工程中心
印度科学研究所
班加罗尔，560012
rahuld@iisc.ac.in

Shankar Kumar Selvaraja
纳米科学与工程中心
印度科学研究所
班加罗尔，560012
shankarks@iisc.ac.in

2023年4月4日

摘要

我们提出并展示了一种采用层状非晶硅和氮化硅的混合波导平台。该波导为设计具有所需光限制、有效折射率和偏振双折射特性的波导提供了更多自由度。与采用单一芯层材料的波导不同，所提出的波导具有设计灵活性，且各层中的光限制取决于偏振。我们详细介绍了波导设计，并分析了高效光纤芯片光栅耦合器；对于 TE 和 TM 偏振，其耦合效率分别为-3.27 dB和-8 dB。该耦合器的3 dB带宽为100纳米。此外，我们利用环形谐振器的热光特性，展示了如何借助偏振相关的光限制激发横电和横磁模式。

关键词 光波导 · 光栅耦合器 · 环形谐振器 · 非晶材料

1 引言

光子集成电路（PIC）为芯片上操控光提供了灵活的平台，可用于各种线性和非线性光信号处理。光波导是光子电路的重要组成部分，光信号通过它进行传输。此外，波导也是各种波导器件的基础。传统波导结构（如线型/条形波导、脊形波导和槽型波导）采用由单一均匀折射率材料构成的芯层，其特性由该材料决定[1, 2]。均匀折射率芯层会限制波导特性，制约其有效折射率和偏振双折射。这些限制可以



(a) 三维视图　　(b) 横截面视图

图 1：混合夹层波导示意图：(a) 三维视图和 (b) 横截面视图，展示了波导的各种设计参数。

通过适当设计芯层的折射率分布加以解决。据报道，渐变折射率波导在中红外（MIR）区域具有宽带响应，同时能将损耗降至最低 [3]。另一种已报道的结构是增强型低折射率波导（ALIG），其在高折射率材料上沉积低折射率材料，旨在将光限制在低折射率介质中 [4]。然而，ALIG 的芯层存在固有的不对称性，可能导致波导锥形结构中出现不理想的模式转换 [5, 6]。Triplex 是另一种波导平台，具有低光学损耗，并能实现理想的电路元件 [7]。因此，具有非均匀折射率分布的波导具备一定优势和独特特性，值得进一步研究。

在本研究中，我们提出并展示了一种对称堆叠结构，其中一种高折射率材料夹在两种中折射率材料之间。高折射率材料选用非晶硅（a-Si），中折射率材料选用氮化硅（SiN）。$a-Si$ 和 SiN 均可通过标准沉积技术进行沉积，是用于光子集成电路（ [8, 9, 10]）的理想材料。图 1a 和 1b 分别展示了所提出结构的示意图及其横截面视图中的几何参数。该结构有三个可调节的几何参数，可用于调节波导特性。高度（“H”）和宽度（“W”）与线型波导中的相应参数类似。但该结构还具有一个额外参数，即高折射率材料相对于总高度的相对厚度。这使波导特性具有很强的可调性。高折射率材料和中折射率材料的相对厚度可以用单个变量表示，从而简化分析。下文将高折射率材料的相对厚度称为分数（“*f*”）。分数参数定义为*f* = 高折射率材料厚度/总高度（“H”）。参数“*f*”以单个变量取代两个厚度变量，为分析该系统提供了一种有效方法。本文详细讨论了该分数对空气包层和氧化物包层波导特性的影响，随后展示了所提出结构中用于光纤到芯片耦合的 TE 和 TM 光栅。测得的耦合效率为

TE 光栅的每个耦合器为 -3.27 分贝，而 TM 光栅的每个耦合器为 -8 分贝。最后，通过基于环形谐振器光谱响应的热光测量，确认了特定模式（横电/横磁）的激发。

2 波导设计

通过适当选择宽度和高度，可以针对特定应用设计线型波导。通过改变分数，还可以进一步调谐所提出的波导。这一独特参数为有效折射率调谐、不同材料中的限制以及偏振双折射控制提供了灵活性，而这些在均匀折射率波导中受到限制。我们研究了顶部包层为空气和氧化物的波导设计。所提出波导的高度固定为 500 纳米，以确保整个工作过程中的模式限制。

2.1 空气包层中的波导设计

波导设计采用数值模式求解器完成。硅的折射率取 1.89，非晶硅的折射率取 3.54，工作波长为 1550 纳米。通过仿真研究分数（*f*）对波导特性的影响。计算了不同*f*下有效模式折射率随宽度的变化，其中部分结果如图 2 所示。图 2 中，单模区域以阴影标出。对于较大的分数*f*，我们观察到有高于单模工作区中*f*模式折射率的 TM_0 传播。

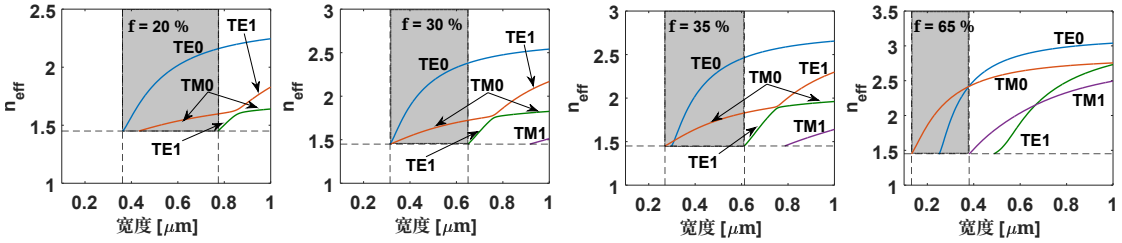


图 2：不同分数下的有效折射率，展示空气包层结构中的基模和高阶模。阴影区域表示单模工作区。

d

有效折射率是决定各种波导器件功能特性的基本属性。宽度和分数的变化会导致有效折射率发生变化，进而使器件性能未达最优。图 3a 显示了单模工作区内不同分数下的 $max(dn_{eff}/dW)f$。可以清楚地看出，与横电模式相比，TE 模式对宽度变化和*f* 变化更为敏感。这表明，与 TE 相比，TM 模式对层厚度和宽度变化的容忍度更高。

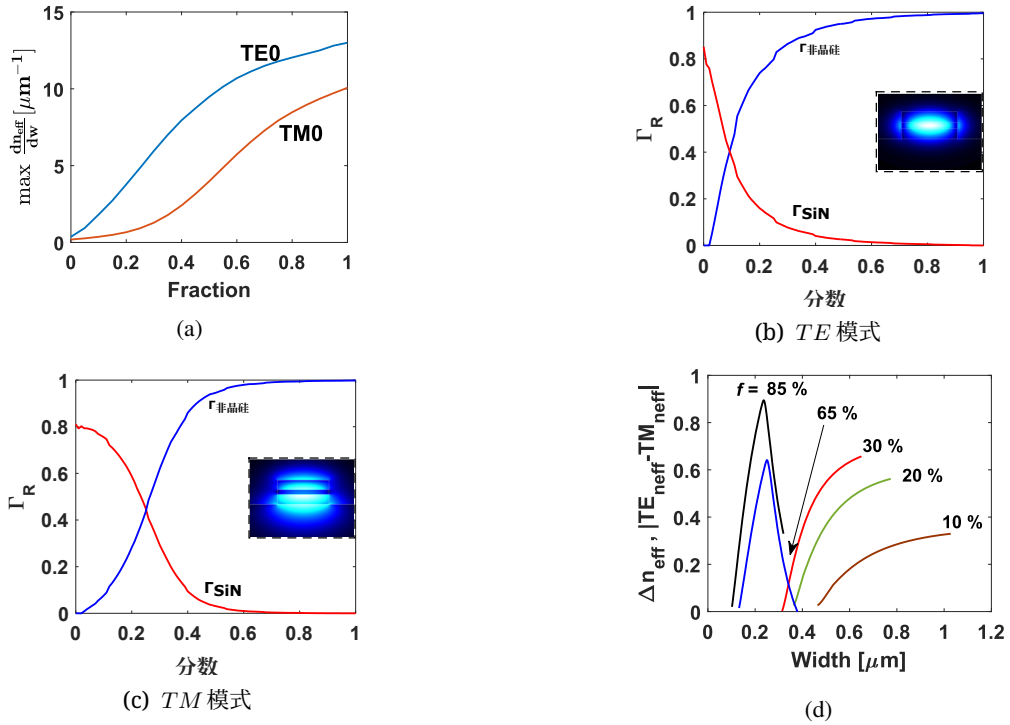


图 3：空气包层波导分析。(a) 有效折射率最大斜率随宽度的变化，作为分数的函数。(b) TE 模式和 (c) TM 模式在 $a-Si$ 层和 SiN 层中的限制随分数的变化。插图显示了 f = 20% 时的场分布。(d) 偏振双折射随宽度的变化，作为分数的函数。

需要注意的是，由于波导具有混合结构，光在 $a-Si$ 和 SiN 中均受到限制。下文将该波导称为混合波导。波导的混合特性要求分别计算 $a-Si$ 和 SiN 区域的限制。区域 R 中的约束因子定义为 [11]:

$$\Gamma_R = \frac{\iint_R ((I(x,y))^2\,dx\,dy}{\iint_\infty (I(x,y))^2\,dx\,dy} \tag{1}$$

波导中的限制取决于偏振。图 3b 和 3c 显示，对于宽 700 nm 的波导，在较宽的分数取值范围内，宽度均处于单模区域，此时光在 $a-Si$层和 SiN 层中的限制情况。可以清楚地看出，对于 TE 模式，当f > 10% 时，光在 $a-Si$ 层中的限制更强；对于 TM 模式，当f > 25 % 时，光在该层中的限制更强。因此，可以调节因子f，使光在任一材料中达到所需的限制，从而更好地满足各种应用需求。一个有趣的发现是，对于给定几何结构，光在 $a-Si$ 层和 SiN 层中的限制取决于偏振。采用 TE 模式时，光可以限制在较高折射率的材料中；采用 TM 模式时，则可以限制在中等折射率的材料中。从图 3b 和 3c 可以得出，分数为 20% 时，最适合采用 TE 模式将光限制在 $a-Si$ 中，并采用 TM 模式将光限制在 SiN 中。这种典型行为可以用麦克斯韦方程的边界条件来解释。电位移的法向分量应保持连续，因此对于 TM 模式， SiN 层中的电场

$$E_{SiN} = (\frac{n_{a-Si}}{n_{SiN}})^2 \times E_{a-Si} \tag{2}$$

在某些应用中，例如波分复用（WDM），需要较低的偏振敏感性 [12] 。然而，在某些情况下，高偏振消光比可用于实现偏振选择性相位延迟[13]。因此，灵活地控制双折射（$dn_{eff} = TEn_{eff} - TMn_{eff}$）非常理想。在混合平台中，可通过调整“f”来控制双折射。图 3d 显示了单模区域内不同分数对应的双折射。双折射随宽度变化的斜率会随着分数的增加而继续增大。因此，这一趋势似乎会使双折射增大。不过，研究发现，在 f = 35 % 到 f = 65 % 之间存在一个拐点，此处双折射变得可以忽略不计。这一特性可用于满足特定应用的需求。

2.2 氧化物包层中的波导设计

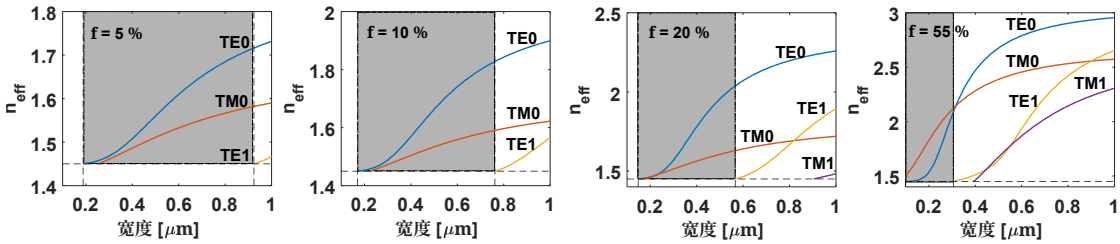
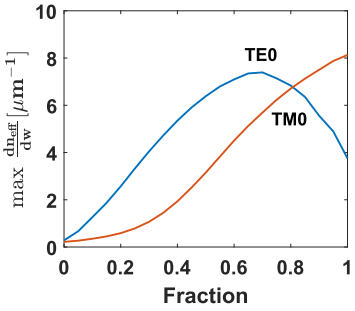
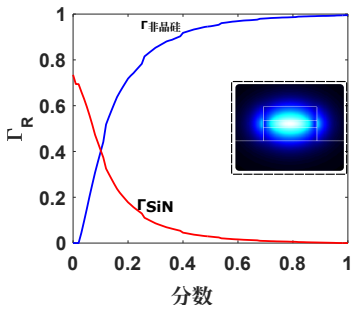


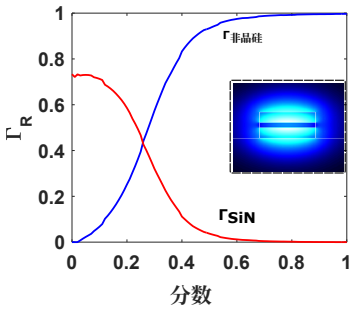
图 4：不同分数 f 下氧化物包层中基模和高阶模式的有效折射率。阴影区域表示单模工作区。



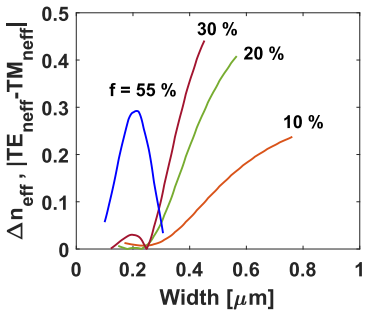
(a)



(b) TE 模式



(c) TM 模式



(d)

图 5：氧化物包层波导分析。(a) 有效折射率最大斜率随宽度的变化与分数的关系。(b) TE 模式和 (c) TM 模在 $a-Si$ 和 SiN 层中的限制随分数的变化。插图显示了 f = 20% 时 TE 模式的场。(d) 偏振双折射随宽度的变化与分数的关系。

对带氧化物包层的夹层波导进行仿真，以研究分数f对波导特性的影响。折射率对比度降低会使单模工作区向较小的波导宽度方向移动（图 4）。对于空气包层，可以观察到不同阶模式之间存在反交叉，这表明存在一种可能导致不理想模式转换的混合模。由于折射率对比度降低，$max\left(dn_{eff}/dW\right)$ 也随之降低，这意味着与空气包层波导不同，此类波导能够容忍尺寸变化。

约束因子的计算方法与空气包层的相同。图 5b 和图 5c 显示了氧化物包层中 TE和 TM模式的约束因子。宽度固定为 500 纳米。其变化趋势与空气包层非常相似。在空气包层和氧化物包层中，20 % 的分数都适用于光限制。图 5d 显示了氧化物包层的双折射。氧化物包层对偏振的敏感性低于空气包层。分数较大时，与空气包层相比，峰值更平坦，因此双折射对宽度变化的容差更高。

3 光纤芯片耦合

3.1 TE 和 TM 表面光栅耦合器的设计与制造

表面光栅光纤芯片耦合器是一种用途广泛的光纤芯片耦合方案 [14]。为展示所提出的波导在 1550纳米波段中的性能，设计并开发了适用于TE_0 和 TM_0 的光栅光纤芯片耦合器。所有设计中的高度均设为 500 纳米，且f 设为 20 %。顶层和底部SiN 层的厚度均为 200 纳米， $a-Si$ 为 100 纳米。为高效耦合至 TE 模式，需要刻蚀 $a-Si$ 层；而对于 TM 模式，则需刻蚀整个层叠结构以形成光栅。设计旨在实现最佳衍射，以便耦合至指定模式。通过执行二维有限差分时域（FDTD）仿真，改变周期、角度、占空比、刻蚀深度（仅针对 TE 模式）和底部氧化层厚度，对耦合效率（CE）进行优化。由于参数数量较多，采用粒子群优化（PSO）来优化耦合效率，而非进行参数扫描[15]。各参数的影响将在结果部分详细讨论。仿真结果汇总于表 1。

表 1：最优光栅耦合器设计的性能汇总。

参数 [单位]	TE	TM
n_{eff}	1.94	1.58
光栅刻蚀层	$a-Si$ 层	全刻蚀
耦合效率 [分贝]	-2.52	-3.9
1 dB 带宽 [纳米]	57.6	54.4
3 dB 带宽 [纳米]	98	94

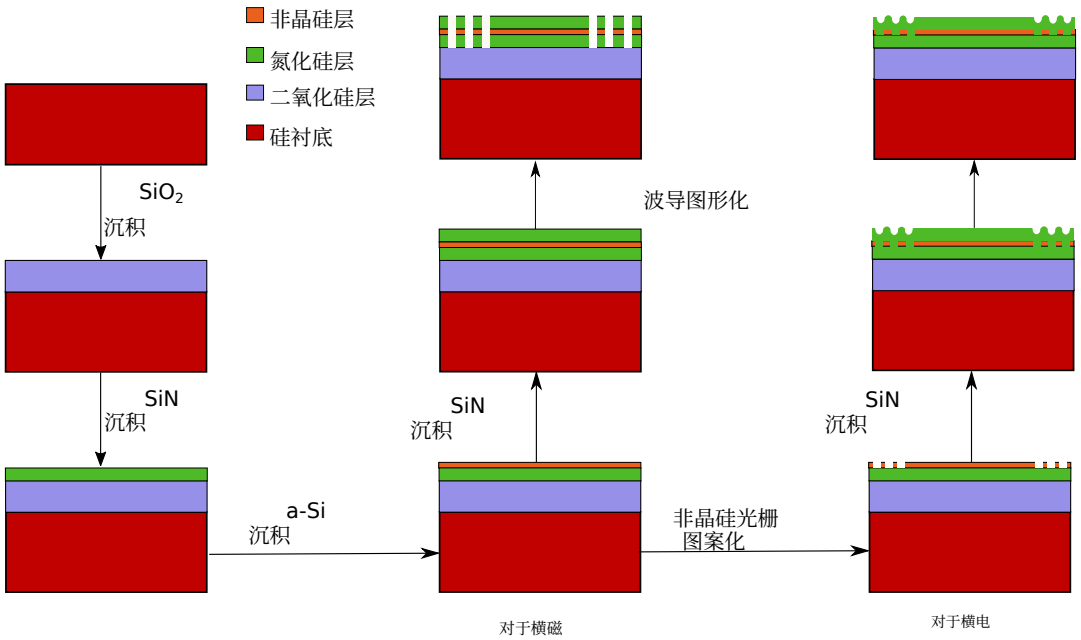
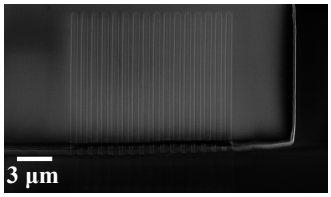
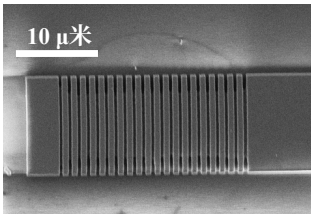


图 6： TE 和 TM 光栅与波导制造工艺流程概览。

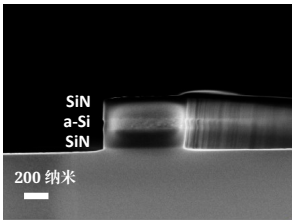
光栅设计在所需的层堆叠中制备。该层叠结构通过等离子体增强化学气相沉积工艺依次沉积 SiO_2、 $a-Si$ 和 SiN 而成。光栅图案化和波导图形化采用电子束光刻工艺完成。图 6 展示了 TE 和 TM 光栅及波导的制备工艺流程。对于 TM 模式，先沉积整个层叠结构，再进行光刻，并通过刻蚀完成光栅和波导的图形转移。对于 TE 模式，先在 $a-Si$ 层中进行光栅图案化，随后沉积 SiN。之后，在完整的层叠结构上进行波导图形化。图 7a 和图 7b 分别展示了TE 和 TM 光栅的俯视图。图 7c 展示了具有三层结构的宽 700 nm 的波导的横截面。



(a) TE 光栅

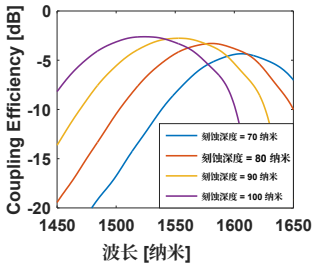


(b) TM 光栅

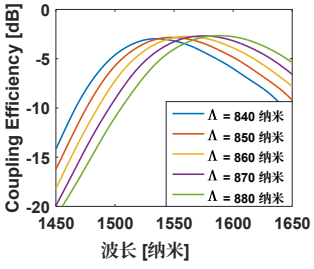


(c) 波导横截面

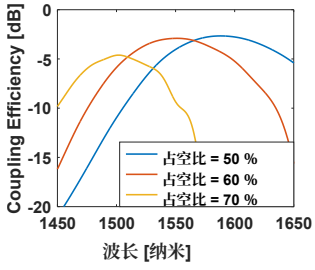
图 7：制造的扫描电子显微镜图像：(a) 在 $a-Si$ 层中的 TE 光栅，(b) 刻蚀了 TM 光栅的完整堆叠结构俯视图，以及 (c) 制造的波导横截面，其宽度为 700 纳米、分数为 20%，并显示了三层结构。



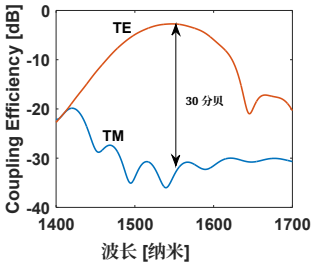
(a) 耦合效率与刻蚀深度的关系（模拟）



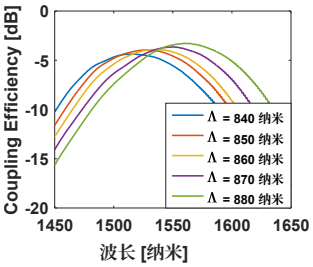
(b) 耦合效率与周期的关系（仿真）



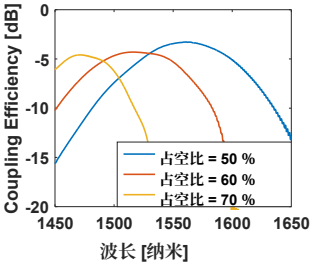
(c) 耦合效率与占空比的关系（仿真）



(d) TE和 TM消光比（仿真）



(e) 耦合效率与周期的关系（测量）



(f) 耦合效率与占空比的关系（测量）

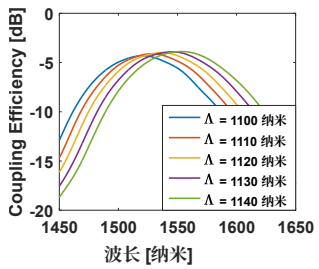
图 8： TE 光栅耦合器的仿真与测量总结。仿真得到的TE光栅的耦合效率（CE）与以下参数的关系：(a) 100 纳米 $a-Si$中的刻蚀深度，(b) 光栅周期，以及 (c) 光栅占空比。(d) TM和 TE的 TE光栅的消光比。(e) TE光栅的实测光谱响应随刻蚀深度的变化。(f) TE 光栅的实测光谱响应随占空比的变化。

TE 光栅和 TM 光栅在不同批次中制备，共用同一氧化物层。沉积的氧化物厚度为 1570 纳米。TE 光栅的氮化硅层沉积厚度为 220 纳米，TM 光栅的氮化硅层沉积厚度为 214 纳米。TE 光栅的非晶硅层沉积厚度为 98 纳米，TM 光栅的非晶硅层沉积厚度为 115 纳米。氮化硅层采用CHF_3 和 O_2 进行刻蚀，非晶硅采用 SF_6 和 CHF_3进行刻蚀。

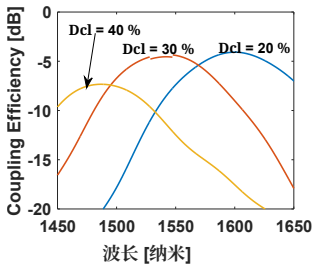
光栅测试结构制作在宽度为 12 μm、具有多个周期的波导上。使用超辐射发光二极管（SLED）作为光源，并通过光谱分析仪对制备器件进行表征。输入偏振由偏振控制桨控制。耦合效率通过将透射率归一化至光源光谱来计算。

3.2 结果与分析

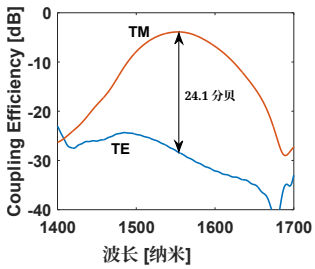
图 8 展示了 TE 光栅耦合器的仿真结果及测得的光谱响应汇总。图 8a、8b 和 8c 分别显示了刻蚀深度（ED）、周期和占空比对 TE 光栅耦合器耦合效率的影响。众所周知，一维光栅对偏振敏感，图 8d 展示了 TE光栅中TE与 TM输入之间仿真的消光比。图 8e 和 8f 展示了实验验证结果，即测得的 TE 光栅在不同周期和占空比下的光谱响应。可使用布拉格定律验证耦合器



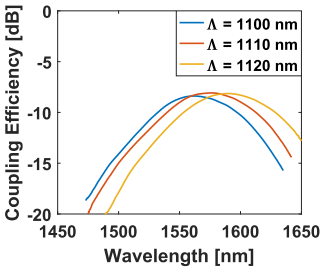
（a）耦合效率与周期的关系（仿真横磁）



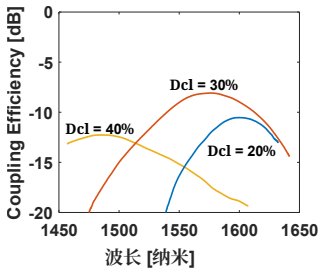
（b）耦合效率与占空比的关系（仿真横磁）



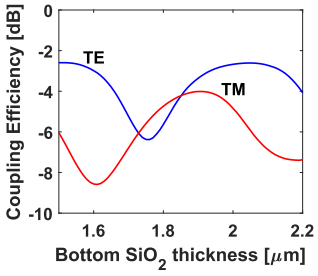
（c） TE 和 TM 的消光比（仿真）



（d）耦合效率与周期的关系（测量横磁）



（e）耦合效率与占空比的关系（测量横磁）



(f)

图9： TM 光栅耦合器的仿真与测量总结。仿真得到的 TM 光栅的耦合效率（CE）与（a）光栅周期和（b）占空比的关系。（c） TM 光栅的 TM 和 TE 的消光比。测量得到的 TM 光栅的耦合效率与（d）刻蚀深度和（e）占空比的关系。（f）底部氧化层厚度对 TE 和 TM 光栅耦合效率的影响。

特性。光栅周期与耦合波长（λ）、光纤角度（θ）和有效折射率（n_{eff}）有关，如下所示：

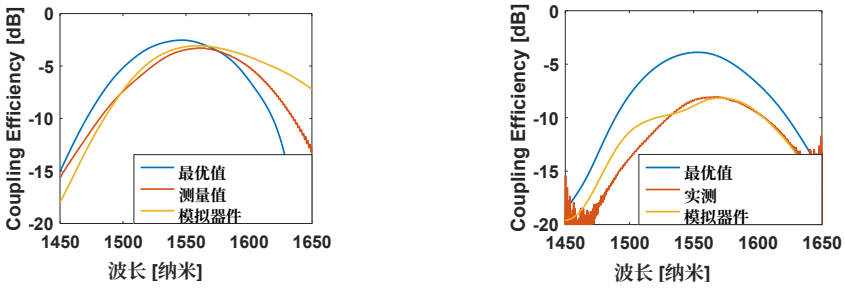
$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_{eff} - n_c \sin(\theta).} \tag{3}$$

在仿真和实验中，我们都观察到，随着周期增大，光谱发生红移。这可以用公式（3）解释，其中中心波长与周期成正比。随着占空比增大，仿真和实验测量中的光谱均发生蓝移，这也可由公式（3）验证。占空比增大会降低有效折射率，从而导致蓝移。刻蚀深度增加也会因有效折射率降低而导致蓝移。对于 TM 偏振光，相对于TE偏振光， TE模式光栅的消光比约为 30 分贝。

对 TM 模式光栅也进行了类似分析。图9a 和图9b 显示了仿真得到的TM光栅光谱响应随周期和占空比的变化。图9c 显示了TM光栅上 TE与 TM输入之间消光比的仿真结果。图9d 和图9e 显示了测量得到的 TM 光栅光谱响应随周期和占空比的变化。

TE 光栅的最佳测量耦合效率为 -3.27 分贝/耦合器， TM 光栅的最佳测量耦合效率为每个耦合器 -8 分贝。图10a和图10b分别展示了针对 TE和 TM模式的最优设计器件、制备器件与测量器件的光谱响应对比。表2总结了光栅性能的测量结果和仿真结果。

TE 光栅耦合器的耦合效率接近最优设计。不过，光谱响应相较于优化值出现红移，这是因为刻蚀深度略低于预期。 TM 模式的耦合效率比最优值低 ≈4分贝。这可能是由于二氧化硅$_2$ 厚度变化所致，如图9f [16]所示。采用底部布拉格反射器[17]可进一步提高能量耦合效率。



(a) TE 光栅　　(b) TM 光栅

图 10： (a) TE 和 (b) TM 光栅耦合器的最佳设计及实测耦合效率。

表2：实测与优化后的光栅响应对比

	TE				TM			
Data	CE [dB]	λ_P[纳米]	1 dB BW [nm]	3 dB BW [nm]	CE [dB]	λ_P[纳米]	1 dB BW [nm]	3 dB BW [nm]
最佳刻蚀深度-sign	-2.52	1547	57.6	98	-3.9	1553	54.4	94
制备/已测量的	-3.27	1561	56.8	100	-8	1572	51	92
已制备器件的仿真tion	-3.06	1560	70	127	-8.16	1570	50	113

4 TE 和 TM 模式的确认

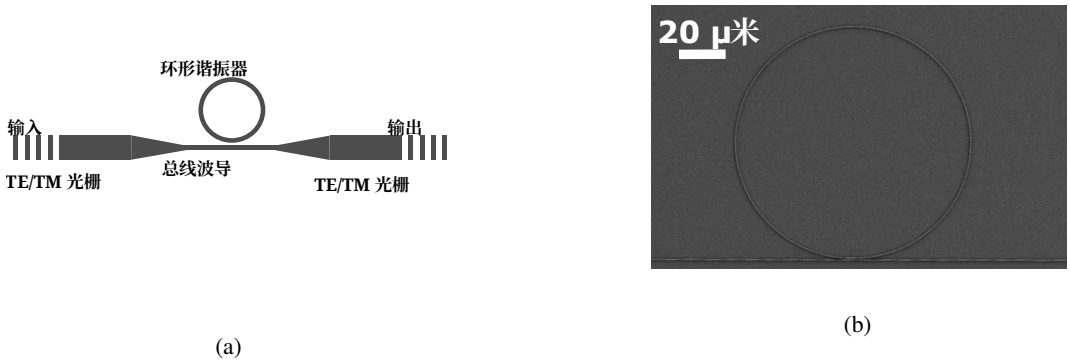
4.1 混合平台中的环形谐振器

可使用环形谐振器等波长选择器件来表征目标模式在波导中的传播。环形谐振器的光谱特性取决于谐振腔中谐振模式的群折射率。通过根据自由光谱范围（FSR）计算群折射率，可以确定谐振腔模式的偏振 [18]。上述层叠结构用于制造直径为 100 μ米的环形谐振器。波导宽度保持为700 纳米，以兼容 TE_0 和 TM_0 （图2）。对于 TE 和 TM 环，分别采用250 纳米和350 纳米的总线波导与环之间的间隙。图11a展示了器件的示意图和扫描电子显微镜图像。采用长度为 250 μ米的波导锥形段，将700 纳米单模波导连接到在宽度为 12 μ米的波导上制备的光栅光纤耦合器。输入和输出耦合器设计为 TE 或 TM，以选择性地激发波导中的单一偏振。

图 12a 和 12b 分别显示了 TE 和 TM 环形谐振器的归一化光谱响应。在 TE 和 TM 谐振器中测得的自由光谱范围（FSR）分别为 2.23 纳米和 3.31 纳米。相应计算得到的群折射率分别为 3.38 和 2.18，而 TE和 TM的预期值分别为 3.48 和 2.33。这表明，光栅耦合器激发相应偏振的结果与预期高度吻合，得到了验证。此外，我们测得TE环形谐振器的品质因数为 3400，TM环形谐振器的品质因数为 4000。由于刻蚀侧壁的散射较低，TM谐振表现出更高的品质因数。损耗主要源于夹层之间的界面。TM环形谐振器的插入损耗约为 -1 分贝，而 TE环形谐振器的插入损耗为 -2.2 分贝，这进一步证实了这一点。

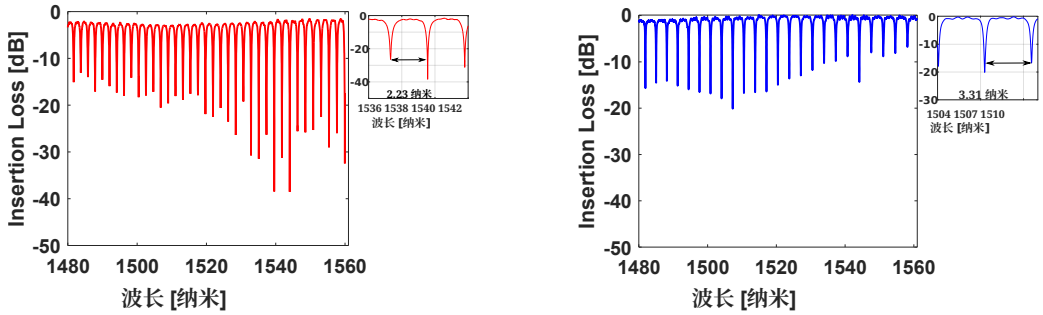
4.2 热响应与模式限制。

与单一材料实心芯层不同，混合波导中的模式分布取决于偏振 TE andTM。如第 2 节所述，TE_0模式主要限制在 $a-Si$中，而 TM_0则分布于两个 SiN 层之间。由于模式限制是混合的，可以通过两种模式的热光响应 [19, 20, 21]来确认这种限制。上述环形谐振器的热光响应通过使用珀尔帖元件和温度控制器加热衬底来表征。温度从 29 ℃ 调节至 51
以℃为步进，步长为 2 ℃。图13a和图13b显示了谐振波长随温度的变化。谐振波长偏移



(a) (b)

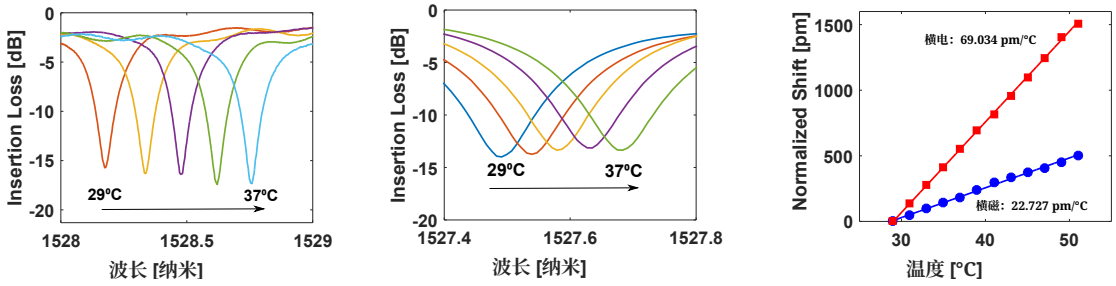
图11：(a) 测试结构示意图和 (b) 所制备环形谐振器的扫描电子显微镜图 r



(a) TE 环 (b) TM 环

图12：(a) TE 和 (b) TM 环形谐振器的归一化光谱响应。

如图13c所示， TE 环和 TM 环的谐振波长偏移分别为69 pm/°C和23 pm/°C。通过推导各材料的热光系数（TOC），确认激发模式和限制。



(a) (b) (c)

图13：混合波导的热光响应。(a) TE 偏振和 (b) TM 偏振下光谱漂移随温度的变化。(c) TE 和 TM 的线性热光响应漂移。

有效热光系数由光谱漂移（dλ_R/dT）计算得出，如 [19] 所示。

$$\frac{dn_{eff}}{dT} = \frac{d\lambda_R}{dT} \times \frac{n_g}{\lambda_R} \tag{4}$$

夹层波导的有效热光系数是各层热光系数与给定模式下特定层中的电场限制（Γ）的叠加，如 [20] 所示。

$$\frac{dn_eff}{dT} = \Sigma_i \Gamma_i \frac{dn_i}{dT} = \Gamma_{SiN}\frac{dn_{SiN}}{dT} + \Gamma_{a-Si}\frac{dn_{a-Si}}{dT} \tag{5}$$

电场　　第 i 层中的电场限制（Γ_i）通过获取电场分布 [22] 进行计算。

$$\Gamma_i = \frac{\int_i |E(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E(x)|^2 dx} \tag{6}$$

同时对 TE 和 TM 偏振求解方程 5，以确定 $a-Si$ 和 SiN 的热光系数（TOC）。计算结果汇总于表 3 中。$a-Si$ 的热光系数为 2.05×10^{-4}，SiN 2.67×10^{-5} 的热光系数为 [23, 24]，这两个值与文献中的数值接近，从而证实了该分析。

表 3：热光系数计算汇总

参数 [单位]	TE 模式	TM 模式
测得的 $d\lambda_R/dT[pm/^\circ C]$	69.034	22.727
$dn_{eff}/dT[K^{-1}]$	1.528×10^{-4}	3.468×10^{-5}
Γ_{a-Si}	0.685	0.076
Γ_{SiN}	0.46	0.718
n_g	3.38	2.18

5 结论

我们展示了一种混合波导平台，其高折射率材料夹在两层中折射率材料之间。所提出的波导结构提供了一个灵活的平台，可用于调节有效折射率、限制和偏振特性。我们展示了用于耦合至 TE 和 TM 模式的光栅光纤芯片耦合器，每个耦合器的耦合效率分别为 -3.27 分贝和 -8 分贝，3 dB带宽为 100 纳米。通过热光响应，我们确认了波导中高折射率层和中折射率层内偏振相关的模式限制。我们认为，所提出的波导结构有助于实现单一材料实芯波导平台所无法实现的有趣功能。

6 致谢

我们感谢 DST-SERB 为本研究提供经费。我们还感谢 MHRD、MeitY 和 DST 为印度科学研究所纳米科学与工程中心（CeNSE）的设施提供支持。

参考文献

[1] W. Bogaerts, S. K. Selvaraja, 《采用绝热弯曲段的紧凑型单模硅混合肋条/条形波导》, IEEE Photonics Journal 3 (3) (2011) 422–432。doi:10.1109/JPHOT.2011.2142931。[2] V. R. Almeida, Q. Xu, C. A. Barrios, M. Lipson, 《在空隙纳米结构中引导和限制光》, 《光学快报》(2004)。doi:10.1364/ol.29.001209。[3] M. Brun, P. Labeye, G. Grand, J.-M. Hartmann, F. Boulila, M. Carras, S. Nicoletti, 《适用于中红外应用的低损耗 SiGe 渐变折射率波导》, 《光学快报》22 (1) (2014) 508。doi:10.1364/OE.22.000508。网址 https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-1-508[4] M. Z. Alam, X. Sun, M. Mojahedi, J. S. Aitchison, 《用于在低折射率介质中限制光的增强型低折射率波导》, 《激光与光子学评论》(2017)。doi:10.1002/lpor.201500224。[5] D. Dai, Y. Tang, J. E. Bowers, 《渐缩亚微米硅脊形光波导中的模式转换》, 《光学快报》(2012)。doi:10.1364/OE.20.013425。

[6] D. Vermeulen, K. Van Acoleyen, S. Ghosh, S. Selvaraja, W. A. D. De Cort, N. A. Yebo, E. Hallynck, K. De Vos, P. P. P. Debackere, P. Dumon, W. Bogaerts, G. Roelkens, D. Van Thourhout, R. Baets, 《非对称波导中向基模准 TM 模式的高效渐缩》, 欧洲集成光学会议(2010)。[7] C. G. H. Roeloffzen, M. Hoekman, E. J. Klein, L. S. Wevers, R. B. Timens, D. Marchenko, D. Geskus, R. Dekker, A. Alippi, R. Grootjans, A. van Rees, R. M. Oldenbeuving, J. P. Epping, R. G. Heideman, K. Wörhoff, A. Leinse, D. Geuzebroek, E. Schreuder, P. W. L. van Dijk, I. Visscher, C. Taddei, Y. Fan, C. Taballione, Y. Liu, D. Marpaung, L. Zhuang, M. Benelajla, K.-J. Boller, 《低损耗三重结构氮化硅光波导：技术与应用概述》, IEEE《量子电子学精选主题期刊》24 (4) (2018) 1–21。doi:10.1109/JSTQE.2018.2793945。[8]S. Kumar Selvaraja, M. Schaekers, W. Bogaerts, D. Van Thourhout, 《用于纳米光子集成电路的沉积式非晶硅绝缘体上硅技术》, 《光学通信》313 (2014) 210–216。doi:10.1016/j.optcom.2013.10.033。网址 http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.10.033https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401813009504[9] S. K. Selvaraja, E. Sleeckx, M. Schaekers, W. Bogaerts, D. V. Thourhout, P. Dumon, R. Baets, 《用于光子集成电路的低损耗非晶硅绝缘体上硅技术》, 《光学通信》282 (9) (2009) 1767–1770。doi:10.1016/j.optcom.2009.01.021。网址 http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2009.01.021https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401809000418[10] R. Baets, A. Z. Subramanian, S. Clemmen, B. Kuyken, P. Bienstman, N. Le Thomas, G. Roelkens, D. Van Thourhout, P. Helin, S. Severi, 《硅光子学：氮化硅与绝缘体上硅》, 载于：光纤通信会议，OSA，华盛顿特区，2016，p. Th3J.1。doi:10.1364/OFC.2016.Th3J.1。网址 https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2016-Th3J.1[11] M.-C. Tien, J. F. Bauters, M. J. R. Heck, D. J. Blumenthal, J. E. Bowers, 《具有低非线性和高功率承受能力的 Si_3N_4 波导》, 《光学快报》18 (23) (2010) 23562。doi:10.1364/OE.18.023562。网址 https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-18-23-23562[12] P. Trinh, S. Yegnanarayanan, F. Coppinger, B. Jalali, 《具有极低偏振敏感性的绝缘体上硅 (SOI) 相控阵波长复用/解复用器》, IEEE《光子技术快报》9 (7) (1997) 940–942。doi:10.1109/68.593358。网址 http://ieeexplore.ieee.org/document/593358/[13] S.-H. Yang, M. L. Cooper, P. R. Bandaru, S. Mookherjea, 《多槽硅纳米光子波导中的巨大双折射》, 《光学快报》16 (11) (2008) 8306。doi:10.1364/OE.16.008306。网址 https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-11-8306 [14] S. Nambiar, P. Sethi, S. K. Selvaraja, 《用于 SOI 光子电路的光栅辅助光纤至芯片耦合》, 《应用科学》(瑞士) 8 (7) (2018) 1–22。doi:10.3390/app8071142。[15] J. Kennedy, R. Eberhart, 《粒子群优化》, 载于：ICNN'95 论文集——国际神经网络会议，第4卷，1995，第1942–1948页，第4卷。[16] V. A. Sychugov, 《硅基光波导光栅耦合的优化与控制》, 《光学工程》35 (11) (1996) 3092。doi:10.1117/1.601048。网址 http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1. 601048[17] S. K. Selvaraja, D. Vermeulen, M. Schaekers, E. Sleeckx, W. Bogaerts, G. Roelkens, P. Dumon, D. Van Thourhout, R. Baets, 《光纤与硅光子电路之间的高效率光栅耦合器》, 载于：激光与电光学会议/国际量子电子学会议，OSA，华盛顿特区，2009，p. CTuC6。doi:10.1364/CLEO.2009.CTuC6。网址 https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO-2009-CTuC6[18] W. Bogaerts, P. de Heyn, T. van Vaerenbergh, K. de Vos, S. Kumar Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. van Thourhout, R. Baets, 《硅微环谐振器》, 《激光与光子学评论》6 (1) (2012) 47–73。doi:10.1002/lpor.201100017。[19] J. Teng, P. Dumon, W. Bogaerts, H. Zhang, X. Jian, X. Han, M. Zhao, G. Morthier, R. Baets, 《通过在窄化波导上覆盖聚合物包层实现非热绝缘体上硅环形谐振器》, 《光学快报》17 (17) (2009) 14627。doi:10.1364/OE.17.014627。网址 https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-17-17-14627

[20] S. Feng, K. Shang, J. T. Bovington, R. Wu, B. Guan, K.-T. Cheng, J. E. Bowers, S. J. Ben Yoo, 覆有二氧化钛、用于 13μm 波长工作的无热硅环形谐振器, 《光学快报》23 (20) (2015) 25653. doi:10.1364/oe.23.025653.[21] V. Mere, R. Kallega, S. K. Selvaraja, 高效且可调谐的条形波导到狭缝波导的基模耦合, 《光学快报》26 (1) (2018) 438. doi:10.1364/oe.26.000438. 网址 https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-26-1-438[22] T. Visser, B. Demeulenaere, J. Haes, D. Lenstra, R. Baets, H. Blok, 介质波导中的限制与模态增益, Journal of Lightwave Technology 14 (5) (1996) 885–887. doi:10.1109/50.495172. 网址 http://ieeexplore.ieee.org/document/495172/[23] F. G. Della Corte, M. E. Montefusco, L. Moretti, I. Rendina, A. Rubino, 在 300 至 500 K 温度范围内对 1.55 μm 处氢化非晶硅和氢化非晶碳化硅热光效应的研究, Applied Physics Letters 79 (2) (2001) 168–170. doi:10.1063/1.1383056. 网址 http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1383056[24] A. W. Elshaari, I. E. Zadeh, K. D. Jons, V. Zwiller, 面向低温光子电路的氮化硅谐振器热光特性表征, IEEE Photonics Journal 8 (3) (2016) 1–9. doi:10.1109/JPHOT.2016.2561622. 网址 http://ieeexplore.ieee.org/document/7463458/