

基于铌酸锂薄膜的低损耗切趾光栅耦合器

刘亚康, 余玄*, 刘红硕, 黄飞, 陈侃, 毕然, 王磊, 舒晓武

浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 基于铌酸锂薄膜提出了一种新型的低损耗切趾光栅设计方案, 在线性改变填充因子的同时根据布拉格条件对每个光栅周期进行调控。此方案不仅提高了向上衍射效率, 还增加了向上衍射模斑和单模光纤模斑的重叠积分, 极大地提高了耦合效率。1550 nm 处对于 TE 模式耦合效率达到 81.3% (0.90 dB), 是目前已报道的基于无反射层铌酸锂薄膜的光栅耦合器设计方案中耦合效率最高的。考虑到实际工艺下波导存在刻蚀倾角, 基于合理推广的布拉格条件同样对光栅周期进行调控, 优化了带刻蚀倾角的切趾耦合光栅, 耦合效率高达 60.0% (2.22 dB)。

关键词 铌酸锂薄膜; 低损耗; 切趾光栅; 布拉格条件; 刻蚀倾角

中图分类号 TN622; TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230650

1 引言

铌酸锂(LN)晶体具有优良的光学特性, 包括宽的透明窗口(0.4~4.5 μm)^[1], 优良的电光、声光、压电特性和其他非线性效应。近年来发展的铌酸锂薄膜(LNOI)不仅保留了LN优异的光学性能, 而且由于LN和二氧化硅间高折射率差的特性, 使得LN薄膜上脊型波导对于光具有很强的约束能力, 从而可以将光学器件限制到纳米量级。基于LN薄膜的器件尺寸小、集成度高、性能优良, 如低损耗的波导^[2-3]、微环谐振腔^[4-5]、可调谐频率梳^[6-9]、低压驱动的高频电光调制器^[10-12]等。随着对LN薄膜上器件的进一步研究, 如何降低光波导与单模光纤的耦合损耗成为亟待解决的问题。目前两种主流的方式是端面耦合和光栅耦合, LNOI的波导模斑和单模光纤模斑的失配是耦合损耗的主要来源, 对于标准的单模光纤, 1550 nm处其模斑尺寸约为10.4 μm , 几乎等于LNOI波导宽度的10倍, 如果直接进行耦合, 会产生巨大的耦合损耗。端面耦合的经典方案为利用绝热倒锥来增大波导的模斑尺寸, 利用锥形透镜光纤来减小光纤的模斑, 增大两者的重叠积分进而增加耦合效率。光栅耦合则是通过精确设计光栅的周期、刻蚀深度、填充因子等参数, 使得在波导中传输的光经过光栅衍射耦合入光纤。端面耦合具有偏振不敏感、高耦合效率、大带宽等特点^[13-16], 例如Hu等^[16]在双层倒锥结构上覆盖了氮氧化硅波导, 对于TE/TM模, 在1550 nm处耦合损耗低至0.54 dB/0.59 dB, 且在1527~1630 nm处的耦合损耗

均低于1 dB。但是端面耦合器只能位于芯片的边缘, 并且需要复杂的后处理, 如切片、抛光等, 对准容差低。相反, 光栅耦合器可位于芯片的任意位置, 不需要复杂的后处理, 对准容差较高, 但是光栅耦合器偏振敏感, 耦合损耗较大, 且带宽比较窄^[17]。为了提高LNOI上光栅的耦合效率, 研究人员提出了填充因子线性变化的啁啾光栅^[18-20], 来提高光栅衍射模斑和单模光纤模斑的重叠积分; 引入金属反射层^[18-19, 21-22], 或沉积非晶硅层^[23]来提高向上衍射效率。Kang等^[19]在有金属反射层的LNOI上设计了填充因子线性变化的啁啾光栅, 在1550 nm处, 对于TE模式仿真得到的耦合效率达到89.2% (0.50 dB)。但是在Si基底和氧化层间引入金属反射层使得制造成本增加, 且可能会降低LNOI上电光调制器和声光调制器的性能^[20]。在没有金属反射层的LNOI上, Chen等^[18]设计的均匀光栅在1550 nm处对于TE模式其耦合损耗达到3.5 dB, 通过线性改变填充因子和周期来提高向上衍射效率以及向上衍射模斑与单模光纤模斑的重叠积分, 在1550 nm处对于TE模式耦合损耗达到1.37 dB。利用布拉格条件调控每个光栅周期, 可以进一步提高耦合效率。为了降低成本, 保证LNOI上的电光调制器和声光调制器的性能, 本文的耦合光栅设计基于无反射层的Z切LNOI晶圆。本文还从物理层面解释了提出的切趾光栅的设计思路, 并利用MODE solution和FDTD solution对该切趾光栅进行了仿真验证, 得到了目前已报道的基于不加反射层LNOI上光栅耦合器设计方案中的最高耦合效率。并且考虑了实际加工工艺导致的

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-04-16; 录用日期: 2023-04-23; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 浙江省自然科学基金(Q18F050002)

通信作者: *0013808@zju.edu.cn

刻蚀倾角问题,对布拉格条件进行了合理延伸,设计得到的带刻蚀倾角的切趾光栅的耦合效率也很高,对后续实验具有很好的指导作用。

2 设计思路

光栅的耦合效率 η 由向上衍射效率 η_1 和向上衍射模斑和单模光纤模斑的重叠积分 η_2 综合影响,表达式为

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (1)$$

向上耦合效率 η_1 为向上衍射光功率与波导中总光功率之比,表明波导中的光有多少向上衍射。 η_2 为向上衍射模斑和单模光纤模斑的重叠积分,代表向上衍射的光有多少耦合至单模光纤基模中。所以为了获得高耦合效率要同时提高向上衍射效率 η_1 和重叠积分 η_2 。

对于均匀光栅(如图 1 所示),假设未刻蚀部分的宽度为 w ,刻蚀深度为 e ,周期为 Λ 。如果将光栅的填充因子 F_1 定义为未刻蚀部分的宽度 w 与单个辐射单元的总长度 Λ 之比,则光栅的有效折射率 n_{eff} 可表示为

$$n_{\text{eff}} = F_1 \cdot n_u + (1 - F_1) \cdot n_c \quad (2)$$

式中, n_u 和 n_c 分别为未刻蚀部分与刻蚀区域对应高度下平板波导中 TE_0 模式的有效折射率。正因为光栅未刻蚀区域的栅条和刻蚀的沟槽折射率的交替变化,使得波导中传输的光衍射到自由空间中,被光纤接收。根据一阶布拉格条件,光栅的周期可由下式得到:

$$\Lambda = \frac{\lambda_c}{n_{\text{eff}} - \sin \theta_{\text{air}}} \quad (3)$$

式中: λ_c 是光在真空中的波长,为 1550 nm; θ_{air} 是衍射角,为了减少二阶布拉格衍射的影响,一般设定为 8° ; n_{eff} 是光在衍射单元传播时的有效折射率。

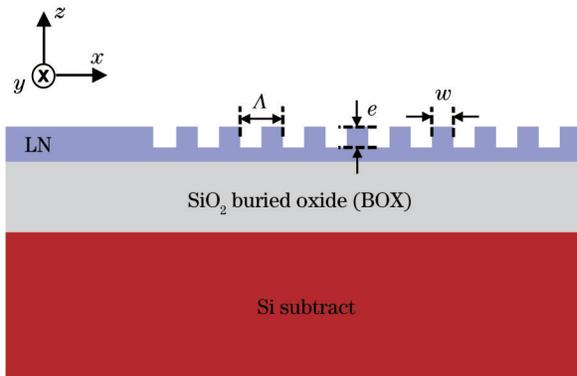


图 1 均匀光栅的截面示意图

Fig. 1 Cross-sectional schematic of uniform grating

经光栅后,向上衍射的电场强度沿光传播方向(x 轴)的分布可以表示为

$$E_{\text{up}}(x) = E_0 \exp[-\alpha(x) \cdot x] \quad (4)$$

式中, $\alpha(x)$ 为光栅的耦合强度,由刻蚀深度 e 和填充因子 F_1 决定。已知向上衍射模斑的电场强度分布和单模光纤高斯模斑的分布,可得到两者的重叠积分 η_2 为

$$\eta_2 = \frac{\left| \int E_{\text{up}}(x') \cdot E_{\text{fiber}}^*(x') dx' \right|^2}{\int E_{\text{up}}^2(x') dx' \cdot \int E_{\text{fiber}}^2(x') dx'} \quad (5)$$

式中: x' 平行于光纤截面,即与 x 轴方向夹角为 θ_{air} ; $E_{\text{up}}(x')$ 为向上衍射光沿 x' 方向的电场强度分布; $E_{\text{fiber}}(x')$ 为单模光纤基模沿 x' 的模场分布。

对于均匀光栅, $\alpha(x)$ 为定值,由式(4)可知,大部分光在光栅的前几个周期发生衍射,向上衍射的电场强度随着光传播方向(x 轴)呈指数衰减,与高斯状相差较大,而标准单模光纤的模斑呈高斯型,由式(5)可得两者重叠积分 η_2 很低,进而降低了耦合效率 η 。

根据式(4),可知当沿着位置 x 合理调控 $\alpha(x)$ 时,可以控制不同位置 x 下衍射光的电场强度,从而得到类高斯型的向上衍射模斑。通过调控不同位置 x 的刻蚀深度 e 和填充因子 F_1 可以获得理想的 $\alpha(x)$ 。考虑到一次刻蚀工艺,不同位置 x 处的刻蚀深度均相同,所以一般通过线性改变填充因子来使向上衍射光斑更加接近高斯型,从而提高与单模光纤模斑的重叠积分。填充因子线性变化,不仅可以减弱前几个周期对于光的衍射作用,使得向上衍射的模斑更加接近高斯型,提高了 η_2 ,而且可以使得波导与光栅区域阻抗更加匹配,降低反射率,提高了 η_1 。填充因子线性变化趋势如下式所示:

$$F_{fi} = F_{f1} - R \cdot i \quad (6)$$

式中: F_{f1} 是第一个衍射单元的填充因子; R 是填充因子线性变化因子; i 是衍射单元编号。式(6)给出了填充因子的调控方式,但没有体现衍射周期。在已有的啁啾方案中,大多是线性改变填充因子,保证周期固定,如图 2(a)所示。该情况下每个衍射单元的 n_{eff} 不同,使得仅在某个特定单元中满足布拉格条件,不仅限制了向上衍射效率 η_1 ,而且导致相邻衍射单元衍射波间出现非零相位不匹配的现象,限制了向上衍射光模斑与单模光纤模斑的重叠积分 η_2 ^[24]。

为解决以上问题,在线性改变填充因子的基础上,根据布拉格条件对衍射周期进行调控,进一步提高 η_1 ,并提高 η_2 。如图 2(c)所示,本文提出的切趾光栅前半部分为 10 个填充因子和周期均变化的切趾衍射单元,不仅降低了光栅与波导间的反射,提高了向上衍射效率,而且降低了模式失配;后半部分为若干填充因子和周期固定的均匀衍射单元,从而使得更多的光向上衍射而非透过光栅。由于单模光纤的模斑直径为 10.4 μm ,所以此处设置的切趾衍射单元数为 10,均匀衍射单元的填充因子和周期与第 10 个切趾衍射单元保持一致。不同于图 2(a)所示的保证周期不变线性改变填充因子的啁啾光栅方案,本文在线性改变填充因子的同时根据式(3)改变衍射周期,如图 2(b)所示,使得所有衍射单元都能满足布拉格条件,进一步提高耦合效率。由式(2)可知,每个衍射单元的 n_{eff} 不仅与

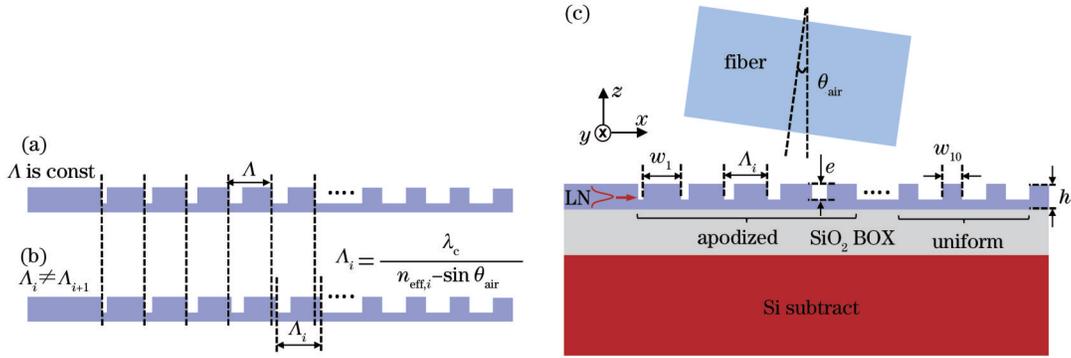


图 2 不同设计方案下的光栅耦合器。(a)周期固定,填充因子线性变化的线性啁啾光栅局部图;(b)提出的线性切趾光栅局部图;(c)提出的线性切趾光栅的截面图

Fig. 2 Grating couplers in different design schemes. (a) Partial schematic of linearly chirped grating with linearly changed fill-factor and fixed period; (b) partial schematic of proposed linearly apodized grating; (c) cross-sectional schematic of proposed linearly apodized grating

填充因子 F_i 相关,还与 n_u 和 n_e 相关。这里的 n_u 和 n_e 分别是高度为 h 和 $h-e$ 时平板波导内 TE_0 模式的有效折射率,由 MODE solution 软件中的 FDE solver 计算得到。 h 为 LN 薄膜的总厚度, $h-e$ 即被刻蚀沟槽内的 LN 的厚度。所以 n_u 是一个定值,而 n_e 是随着刻蚀深度变化而变化的,所以 n_{eff} 也是随着刻蚀深度变化而变化的,将得到的 n_{eff} 代入式 (3),对于 $\lambda_c=1550\text{ nm}$, $\theta_{air}=8^\circ$,可以得到每个衍射单元的周期 $\Lambda_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 。本文所使用的晶圆中 LN 薄膜层的厚度和 SiO_2 BOX 厚度分别为 500 nm 和 $2\text{ }\mu\text{m}$,所以只需要优化填充因子线性变化因子 R 和刻蚀深度 e 即可。这里选择 F_n 为 0.92 ,与 Chen 等^[18]的方案保持一致,更小的 F_n 会减小光栅与波导间的反射,但会增加实际刻蚀制造的难度。用二维时域有限差分(FDTD)方法来寻找最优的 e 和 R 。

由于光路的可逆性,通过仿真光从波导经过光栅耦合器衍射到单模光纤,来寻找最优的耦合效率,这里设置单模光纤的直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$,模斑直径为 $10.4\text{ }\mu\text{m}$,倾斜放置,与竖直方向夹角为 8° 。在波导中设置模式光源,其波长为 1550 nm ,以 TE_0 模式输入,在光纤中设置光功率监视器和模式分布监视器,通过观测耦合入光纤的光功率来计算耦合效率。

3 仿真结果及分析

为了获得最高的耦合效率,需要找到最优的填充因子线性变化因子 R 和刻蚀深度 e 。对于不同的刻蚀深度 e ,对应高度为 $h-e$ 平板波导下 TE_0 模有效折射率 n_e 会相应变化, 1550 nm 处 TE_0 模下有效折射率 n_e 与刻蚀深度 e 的关系,如图 3(a)所示。

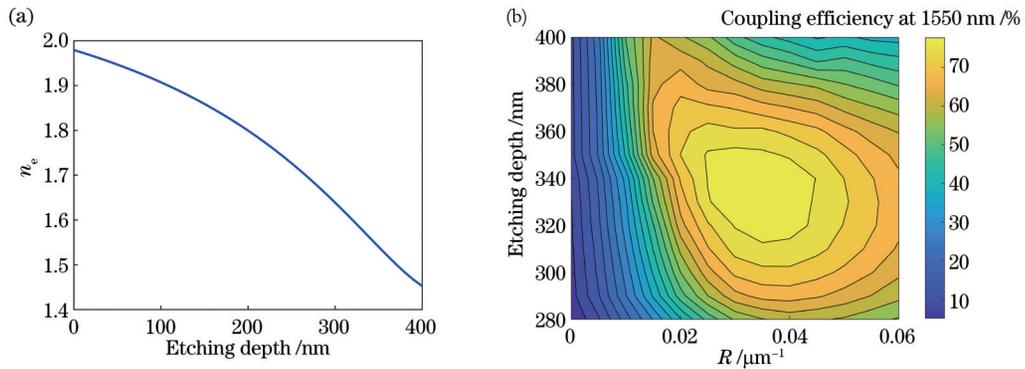


图 3 有效折射率 n_e 和耦合效率的变化趋势。(a) 1550 nm 处 TE_0 模式下有效折射率 n_e 与刻蚀深度 e 的关系;(b) 1550 nm 处耦合效率随 e 和 R 变化的二维等高线图

Fig. 3 Variation trends of effective index n_e and coupling efficiency. (a) Effective index n_e as a function of etching depth e in TE_0 mode at 1550 nm ; (b) 2D contour map of coupling efficiency at 1550 nm as a function of e and R

之后对填充因子线性变化因子 $R(0\sim 0.06)$,间隔为 0.005 和刻蚀深度 $e(280\sim 400\text{ nm})$,间隔为 10 nm 进行扫描,同时也优化了单模光纤的位置,得到在 1550 nm 处 TE_0 模式下耦合效率随 R 和 e 变化的二维等高线图,如图 3(b)所示。可见当刻蚀深度为 300 nm 、线性变化因子 $R=0.03$ 时的耦合效率为

71.3% (1.47 dB),随着 e 和 R 增加,耦合效率逐渐增加,在 e 为 340 nm ,且 $R=0.035$ 时得到最大的耦合效率为 81.3% (0.90 dB),其对应的向上衍射效率为 84.3% ,此时对应的光栅参数如表 1 所示。

进一步增加刻蚀深度,耦合效率开始降低。对于很多组的 e 和 R ,其耦合效率均在 75% (1.25 dB) 以

表 1 基于 500 nm 的 Z 切 LNOI 优化出的切趾光栅周期和填充因子, 此时 $e=340\text{ nm}$ 、 $R=0.035\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ Table 1 Optimal periods and fill-factors obtained from optimization of apodized grating in 500 nm Z-cut LNOI platform, when $e=340\text{ nm}$ and $R=0.035\text{ }\mu\text{m}^{-1}$

Number	Period /nm	Fill-factor	Number	Period /nm	Fill-factor	Number	Period /nm	Fill-factor
1	858	0.920	8	910	0.675	15	926	0.605
2	865	0.885	9	918	0.640	16	926	0.605
3	872	0.850	10	926	0.605	17	926	0.605
4	879	0.815	11	926	0.605	18	926	0.605
5	887	0.780	12	926	0.605	19	926	0.605
6	894	0.745	13	926	0.605	20	926	0.605
7	902	0.710	14	926	0.605	—	—	—

上,说明本文的设计可以容忍一定的刻蚀误差。表 2 汇总了近年来各种方案下的 LNOI 光栅耦合器的耦合性能,在已知的不加金属反射层的方案中,本文所述的切趾光栅耦合效率最高。

在同样规格的 LNOI 上设计了一种均匀光栅进行对比,固定填充因子为 0.6,使得光经凹槽缓慢衍射^[18],利用粒子群优化(PSO)算法得到光栅的周期为 $0.92\text{ }\mu\text{m}$,刻蚀深度为 $0.29\text{ }\mu\text{m}$,在 1550 nm 处 TE 模式向上衍射效率为 64.4%,耦合效率为 48.6% (3.13 dB)。并且复原了文献[18]中周期和填充因子均线性变化的切趾光栅模型,得到了其向上衍射光的电场分布,在 1550 nm 处 TE₀ 模式向上衍射效率为 73% (1.37 dB),耦合效率为 66% (1.80 dB)。

表 2 近年来 LNOI 光栅耦合器的耦合效率比较

Table 2 Coupling efficiency comparison of demonstrated LNOI grating couplers in recent years

Structure	Reflector	Angle /($^{\circ}$)	Simulated efficiency /dB	Reference
Uniform	Yes	8	2 dB	[21]
Chirped	Yes	1.6	88.7% (0.52 dB)	[19]
Uniform	Yes	0	0.71 dB	[22]
Chirped	No	2.6	66.6% (1.8 dB)	[20]
Apodized	No	8	1.8 dB	[18]
Uniform	No	8	50.4% (3 dB)	[25]
Uniform	No	8	6.6 dB	[26]
Uniform	No	12	2.7 dB	[23]
Uniform	No	8	5 dB	[27]
Apodized	No	8	81.3% (0.90 dB)	This work

图 4 (a) 比较了均匀光栅、文献[18]中周期和填充因子均线性变化的切趾光栅,以及本文提出的切趾光栅衍射光的归一化电场分布,可以清楚地看到,与均匀光栅和文献[18]中的切趾光栅相比,本文提出的切趾光栅对应的向上衍射模斑与单模光纤的高斯模斑更加适配,即增大了重叠积分 η_2 。均匀光栅、文献[18]中的切趾光栅和本文提出的切趾光栅在 1500~1600 nm 处向上衍射效率和耦合效率对比如图 4(b)、4(c) 所示,在 1550 nm 处,本文的设计方案相比于均匀光栅方案向

上衍射效率提高了 19.9%,耦合效率提高了 32.7%;相比于文献[18]中的切趾光栅方案向上衍射效率提高了 11.3%,耦合效率提高了 15.3%。可以看到,本文的设计方案在提高了向上衍射效率 η_1 的同时提高了重叠积分 η_2 ,从而大幅度提高了耦合效率。

4 带刻蚀倾角的切趾光栅

受限于工艺问题,在 LNOI 上制造的波导截面不是理想的矩形,而是类梯形,倾斜角在 65° ^[16] 左右,进一步可以探究引入刻蚀倾角时高耦合效率光栅的设计方法。如图 5(a) 所示,设 w_1 为梯形截面的上底, w_b 为梯形截面的下底, w_s 为梯形截面的侧边沿水平方向投影,即 $w_b = w_1 + 2 \times w_s$ 。基于实际制造工艺,进一步仿真了带有 65° 刻蚀倾角的光栅,设置梯形截面的下底 $w_{b,i}$ 与图 2(c) 中的矩形截面宽度 w_i 保持一致。将 $F_{f_{i,i}}$ 定义为梯形截面的上底 $w_{1,i}$ 与单个辐射单元的总长度 Λ_i 之比, $F_{f_{b,i}}$ 定义为梯形截面的下底 $w_{b,i}$ 与单个辐射单元的总长度 Λ_i 之比, $F_{f_{s,i}}$ 定义为梯形截面的侧边沿水平方向的投影 $w_{s,i}$ 与单个辐射单元的总长度 Λ 之比,则光栅的有效折射率 n_{eff} 可以推广为

$$n_{\text{eff},i} = F_{f_{i,i}} \cdot n_u + 2 \cdot F_{f_{s,i}} \cdot n_a + (1 - F_{f_{b,i}}) \cdot n_e, \quad (7)$$

式中: n_u 和 n_e 分别为未刻蚀部分与刻蚀区域对应高度平板波导下 TE₀ 模式的有效折射率; n_a 为侧腰区域对应的平均有效折射率。沿用不考虑刻蚀倾角时的优化参数,即刻蚀深度 $e=340\text{ nm}$ 。则梯形截面的侧腰高度沿着 x 方向从 500 nm 线性变化至 160 nm,即对应的刻蚀深度从 0 线性变化至 340 nm,由下式可得 n_a 为 1.807:

$$n_a = \frac{\int_0^{340} n_e(e) de}{340}, \quad (8)$$

式中, $n_e(e)$ 为根据图 3(a) 拟合出的 n_e 与刻蚀深度 e 的关系式。

沿用了不考虑刻蚀倾角时的优化参数,即 $R=0.035$, $e=340\text{ nm}$ 。可以确定 n_u 、 n_e 和 n_a , $F_{f_{b,1}}$ 仍为 0.92, $F_{f_{b,i}}$ 由 R 进行调控, $F_{f_{s,i}}$ 与 $F_{f_{i,i}}$ 可用梯形截面上的几何关系推算出来,进而可以求得 $n_{\text{eff},i}$ 。利用式(3),将 n_{eff} 赋值为 $n_{\text{eff},i}$,从而算出带刻蚀倾角光栅的各个衍

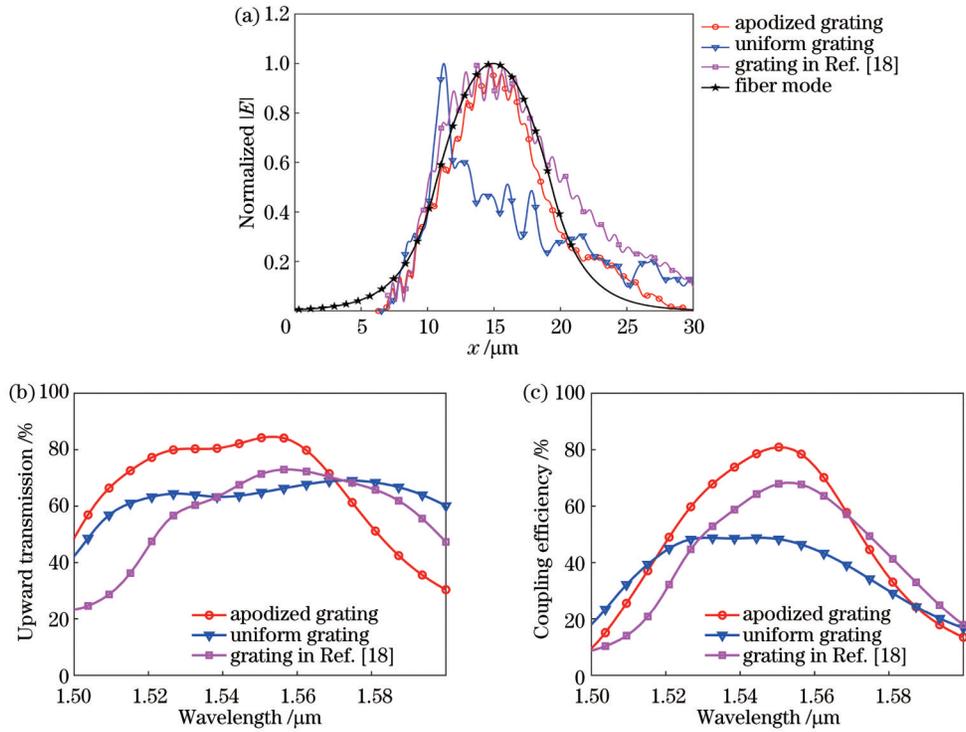


图 4 均匀光栅、文献[18]中切趾光栅和本文切趾光栅效果对比图。(a)1550 nm 处沿 x 方向的归一化电场分布;(b)向上衍射效率;(c)耦合效率

Fig. 4 Effect comparison of uniform grating, apodized grating in Ref. [18], and apodized grating in this work. (a) Normalized field distributions at 1550 nm along x direction; (b) upward transmission; (c) coupling efficiency

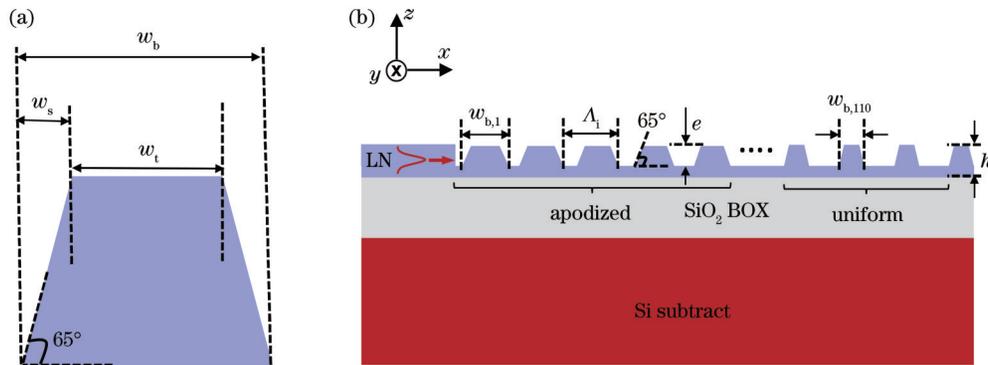


图 5 引入刻蚀倾角的光栅耦合器。(a)带刻蚀倾角的波导截面图;(b)带刻蚀倾角的切趾光栅截面图

Fig. 5 Grating couplers with etching inclination angle. (a) Cross-sectional schematic of waveguide with etching inclination angle; (b) cross-sectional schematic of apodized grating with etching inclination angle

射单元的周期。

将上述求得的参数代入仿真模型得到耦合效率为 60.0% (2.22 dB), 低于不考虑刻蚀倾角时设计下的耦合效率。图 6(a) 和 6(b) 分别为不考虑刻蚀倾角和引入刻蚀倾角 65° 时切趾光栅的衍射电场分布。对比两图发现, 引入刻蚀倾角时, 经光栅向上衍射的模斑偏离高斯型, 且在波导与光栅间存在较大的反射。分析其原因为: 1) 引入了倾角则光栅缝隙变宽, 导致前几个周期对光的衍射能力加强, 使得向上衍射的模斑偏离高斯模斑; 2) 引入倾角使得波导与光栅的阻抗匹配度降低, 反射回波导的光功率增加。对于带刻蚀倾角的切

趾光栅, 为了更加直观地描述其耦合效率随光栅缝隙宽度的变化趋势, 图 6(c) 给出了耦合效率随着 $F_{b,1}$ 的变化曲线, 可以看到, 随着 $F_{b,1}$ 增大, 耦合效率进一步提升, 但会增加工艺难度。根据实际刻蚀效果与可刻蚀的最小缝隙, 可以将该设计方法推广至带任意刻蚀倾角的耦合光栅, 对实验具有极大的指导意义。

5 结 论

本文基于 Z 切 LNOI 提出了一种低耦合损耗的切趾光栅设计方法。该方法同时改变填充因子和周期, 提高了向上衍射效率和向上衍射模斑与单模光纤模斑

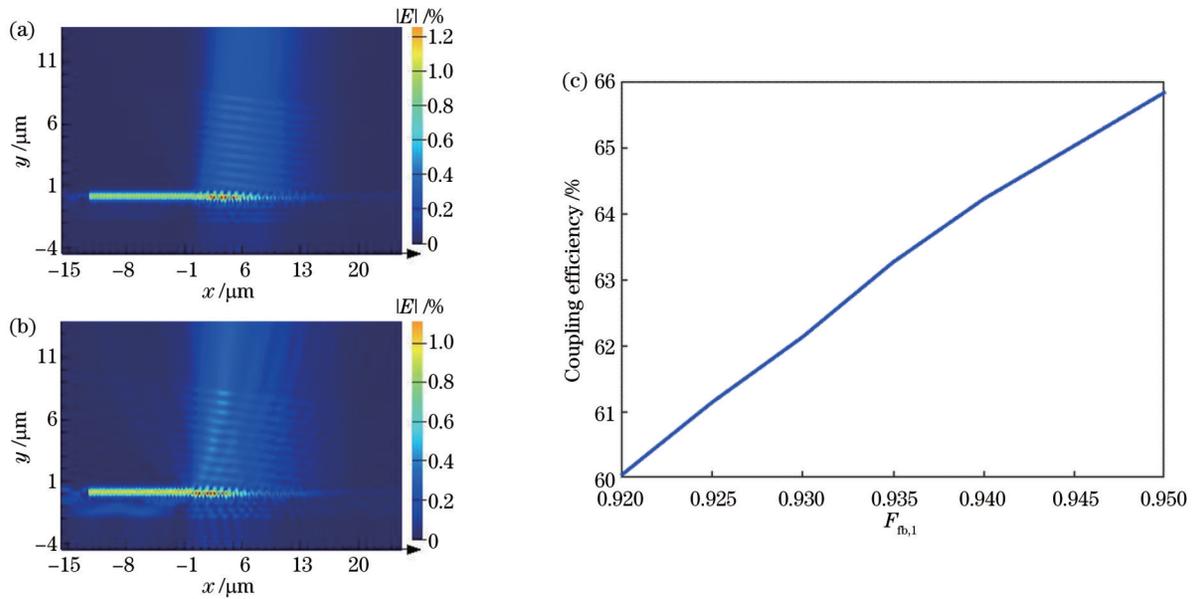


图 6 衍射电场分布和耦合效率。(a) TE 模式输入时,切趾光栅的衍射电场分布;(b) TE 模式输入时,带刻蚀倾角切趾光栅的衍射电场分布;(c)带刻蚀倾角切趾光栅的耦合效率随 $F_{nb,1}$ 的变化趋势

Fig. 6 Diffraction electric field distribution and coupling efficiency. (a) Diffraction electric field distribution of apodized grating for TE polarization; (b) diffraction electric field distribution of apodized grating with etching inclination angle for TE polarization; (c) coupling efficiency of apodized grating with etching inclination angle as a function of $F_{nb,1}$

的重叠积分,在 1550 nm 处 TE 模式下,向上衍射效率达到 84.3%,耦合效率达到 81.3% (0.90 dB),这是目前为止基于无金属反射层的 LNOI 上得到的最高光栅耦合效率。之后考虑实际刻蚀倾角,基于推广的布拉格条件对模型进行优化,在 1550 nm 处 TE 模式下,耦合效率达到 60.0% (2.22 dB),为后续的实验提供了很好的指导。并且随着工艺迭代,刻蚀倾角逐渐改善,可刻蚀的狭缝更窄,该方法可以设计出带任何刻蚀倾角的低损耗切趾光栅。

参 考 文 献

- [1] Boyd G D, Miller R C, Nassau K, et al. LiNbO₃: an efficient phase matchable nonlinear optical material[J]. Applied Physics Letters, 1964, 5(11): 234-236.
- [2] Boes A, Corcoran B, Chang L, et al. Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 1700256.
- [3] 乔玲玲, 汪旻, 伍荣波, 等. 超低损耗 LN 光子学[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823012.
Qiao L L, Wang M, Wu R B, et al. Ultra-low loss lithium niobate photonics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823012.
- [4] Guarino A, Poberaj G, Rezzonico D, et al. Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate[J]. Nature Photonics, 2007, 1(7): 407-410.
- [5] 季晓伟, 崔建民, 冯立辉, 等. 基于 LNOI 的环形谐振腔压力传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0323001.
Ji X W, Cui J M, Feng L H, et al. Ring resonator pressure sensor based on LNOI[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0323001.
- [6] He Y, Yang Q F, Ling J W, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO₃ soliton microcomb[J]. Optica, 2019, 6(9): 1138-1144.
- [7] Zhang M, Buscaino B, Wang C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. Nature, 2019, 568(7752): 373-377.
- [8] Wang C, Zhang M, Yu M J, et al. Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation[J]. Nature Communications, 2019, 10: 978.
- [9] 刘时杰, 郑远林, 陈险峰. LN 薄膜上的非线性频率变换[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823013.
Liu S J, Zheng Y L, Chen X F. Nonlinear frequency conversion in lithium niobate thin films[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823013.
- [10] Mercante A J, Shi S Y, Yao P, et al. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 14810-14816.
- [11] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. Nature, 2018, 562(7725): 101-104.
- [12] He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond[J]. Nature Photonics, 2019, 13(5): 359-364.
- [13] He L Y, Zhang M, Shams-Ansari A, et al. Low-loss fiber-to-chip interface for lithium niobate photonic integrated circuits[J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2314-2317.
- [14] Krasnokutskaya I, Tambasco J L J, Peruzzo A. Nanostructuring of LNOI for efficient edge coupling[J]. Optics Express, 2019, 27(12): 16578-16585.
- [15] Yao N, Zhou J X, Gao R H, et al. Efficient light coupling between an ultra-low loss lithium niobate waveguide and an adiabatically tapered single mode optical fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 12416-12423.
- [16] Hu C R, Pan A, Li T A, et al. High-efficient coupler for thin-film lithium niobate waveguide devices[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5397-5406.
- [17] Nisar M S, Zhao X J, Pan A, et al. Grating coupler for an on-chip lithium niobate ridge waveguide[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 9(1): 6600208.
- [18] Chen Z H, Ning Y F, Xun Y. Chirped and apodized grating couplers on lithium niobate thin film[J]. Optical Materials

- Express, 2020, 10(10): 2513-2521.
- [19] Kang S T, Zhang R, Hao Z Z, et al. High-efficiency chirped grating couplers on lithium niobate on insulator[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6651-6654.
- [20] Cai L T, Piazza G. Low-loss chirped grating for vertical light coupling in lithium niobate on insulator[J]. Journal of Optics, 2019, 21(6): 065801.
- [21] Chen Z H, Peng R H, Wang Y W, et al. Grating coupler on lithium niobate thin film waveguide with a metal bottom reflector [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(11): 4010-4017.
- [22] Chen B, Ruan Z L, Fan X C, et al. Low-loss fiber grating coupler on thin film lithium niobate platform[J]. APL Photonics, 2022, 7(7): 076103.
- [23] Jian J, Xu P F, Chen H, et al. High-efficiency hybrid amorphous silicon grating couplers for sub-micron-sized lithium niobate waveguides[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 29651-29658.
- [24] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 201-239.
- [25] Ruan Z L, Hu J Y, Xue Y, et al. Metal based grating coupler on a thin-film lithium niobate waveguide[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 35615-35621.
- [26] Kar A, Bahadori M, Gong S B, et al. Realization of alignment-tolerant grating couplers for z-cut thin-film lithium niobate[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15856-15867.
- [27] Chen Z H, Wang Y W, Zhang H H, et al. Silicon grating coupler on a lithium niobate thin film waveguide[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(5): 1253-1258.

Low-Loss Apodized Grating Couplers Based on Lithium Niobate on Insulator

Liu Yakang, She Xuan*, Liu Hongshuo, Huang Fei, Chen Kan, Bi Ran, Wang Lei, Shu Xiaowu

College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract

Objective Lithium niobate on insulator (LNOI) is an interesting material for high-density photonic integrated circuits because of the high refractive-index contrast between lithium niobate (LN) and silicon dioxide, which also retains the excellent optical properties of LN. Based on LNOI, many photonic devices with outstanding performances have been demonstrated such as tunable frequency combs and high-frequency electro-optical modulators driven by low voltage. To link to off-chip systems, low-loss coupling between an LNOI waveguide and a conventional single-mode fiber (SMF) is necessary. At present, two mainstream methods are edge coupling and grating coupling. However, the edge couplers with low alignment tolerance can only be located on the edge of the chip and require intensive post-fabrication processing, such as cleaving and facet polishing. In contrast, grating couplers with relaxed fiber-positioning tolerances can be located at any point on the chip to facilitate wafer-level testing anywhere on the chip. Reports of grating couplers fabricated on LNOI so far either have low coupling efficiency or require additional layers to realize high coupling efficiency. Therefore, it is important to identify ways to improve the performance of LNOI without additional layers.

Methods We propose a novel strategy that allows designing low-loss apodized gratings on LNOI, where the filling factor is linearly varied while periods are tuned according to Bragg condition. Our apodized grating coupler consists of ten apodized diffraction units with filling factors and pitches both varying along the x -axis, followed by several uniform diffraction units with fixed filling factors and periods [Fig. 2(c)]. The apodized grooves are designed to reduce the modal mismatch and the reflection from the interface between the waveguide and grating coupler and improve upward transmission. The uniform grooves are employed to guarantee that almost all the lights are scattered upwards rather than transmitted through, and the filling factors and periods are the same as the tenth apodized diffraction unit. According to this design idea, only the linear apodization factor R of the filling factor and the etching depth e should be optimized. Due to the limitations of the process, the cross-section of the waveguide fabricated on LNOI is not an ideal rectangle, but a trapezoidal shape with an etching inclination angle of about 65° . Thus the reasonably extended Bragg condition is adopted to tune the grating periods of the apodized grating coupler with an etching inclination angle.

Results and Discussions As shown in Fig. 3(b), by nesting the linear apodization factor R (0–0.06) and etching depth e (280–400 nm), the highest coupling efficiency of 81.3% (0.90 dB) for the TE polarization at 1550 nm is obtained. It represents the best performance ever reported in the literature for LNOI without a reflection layer. As shown in Fig. 4, this scheme not only improves the upward transmission but also increases the overlap integration between the upward diffraction field and the SMF mode field, which greatly improves the coupling efficiency. Considering the etching

inclination angle of the waveguide in the actual process, the grating periods of the apodized grating coupler with etching inclination angles are also tuned based on the reasonably extended Bragg condition, and the optimized coupling efficiency is as high as 60.0% (2.22 dB), which is smaller than 81.3% (0.90 dB). The reasons are as follows. First, the grooves become wider when the etching inclination angle is introduced, which leads to enhanced light diffraction ability in the first few periods and makes the upward diffraction field deviate from the Gaussian field. Second, the introduction of the etching inclination angle decreases the optical impedance matching between the waveguide and the grating section, causing more optical power to be reflected into the waveguide. Further, according to the actual etching effect and smallest etching gap, this design method can be applied to design grating couplers with any etching inclination angle, which paves the way for experiments.

Conclusions In this study, we propose a new design strategy for apodized grating couplers with low coupling loss. This method changes the filling factors and periods spontaneously and improves the upward transmission and the overlap integration between the upward diffraction field and the SMF mode field. For the TE mode at 1550 nm, the upward transmission is 84.3% and the coupling efficiency is 81.3% (0.90 dB), which is the highest grating coupling efficiency obtained so far based on LNOI without a reflective layer. Then, considering the actual etching inclination, the model is optimized based on the extended Bragg conditions. For the TE mode at 1550 nm, the coupling efficiency reaches 60.0% (2.22 dB), which guides subsequent experiments. Additionally, as the process iterates with a bigger etching inclination angle and a smaller gap that can be etched, this method can design a low-loss apodized grating with any etching inclination angle.

Key words lithium niobate on insulator; low loss; apodized grating; Bragg condition; etching inclination angle