光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251109001

双向变迹垂直光栅耦合器的设计优化

封青青[1]，吉　喆[1*]，严英占[2]

（1. 石家庄铁道大学 机械工程学院，石家庄 050043；2. 中国电科智能科技研究院，北京 100041）

摘　要： 为实现单模光纤与硅基光子芯片的高效垂直耦合，文章设计了一种基于SOI平台的双向变迹光栅耦合器。设计中采用改变光栅占空比的策略，分别应用一元一次函数和指数函数对占空比进行线性和非线性两种变迹方式，优化单模光纤与向上衍射模斑的重叠积分，分别获得39.18%和36.59%的耦合效率。通过有限时域差分法对光栅耦合器进行仿真分析，对光栅关键参数进行优化。经仿真分析，发现在埋氧层下方添加Al反射镜后，线性与非线性变迹两种情况下的耦合效率可在1 570 nm波长处分别提升至90.8%与92.06%，对应的3 dB带宽分别达到73 nm和74 nm，展现出良好的耦合与带宽特性。并且在优化后，占空比非线性变迹要比线性变迹获得更高的耦合效率。所提方案不仅提升了耦合效率，还确保了器件的带宽性能，可为硅基光栅耦合器的设计与应用提供参考。

关键词： 硅基光子芯片；线性变迹；非线性变迹；有限时域差分法；垂直耦合

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0441－08

Design Optimization of a Bidirectional Taper Vertical Grating Coupler

FENG Qingqing[1], JI Zhe[1], YAN Yingzhan[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, CHN; 2. China Electronics Technology Group Corporation Intelligent Science and Technology Research Institute, Beijing 100041, CHN)

Abstract: A bidirectional tapered grating coupler based on the silicon-on-insulator platform was designed to achieve efficient vertical coupling between single-mode fibers and silicon photonic chips. The design employs the linear and nonlinear tapering of the grating duty cycle using linear and exponential functions, respectively, to optimize the overlap integral between the single-mode fiber and the upward diffracted mode spot, achieving coupling efficiencies of 39.18% and 36.59%, respectively. Simulations using the finite-difference time-domain method optimized the key parameters of the grating coupler. With the addition of an Al reflector beneath the buried oxide layer, the coupling efficiencies for linear and nonlinear tapering at a wavelength of 1 570 nm were enhanced to 90.8% and 92.06%, and the 3 dB bandwidths reached 73 nm and 74 nm, respectively, demonstrating excellent coupling and bandwidth characteristics. After optimization, non-linear duty cycle apodization achieved a higher coupling efficiency than linear duty cycle apodization. This approach not only enhances the coupling efficiency but also ensures excellent bandwidth performance of the device, providing a valuable reference for the design and application of silicon-based grating couplers.

Key words: silicon photonic; chip linear tapering; non-linear tapering; finite-difference time-domain method; vertical coupling

收稿日期：2025－11－09.

基金项目：河北省高等学校科学技术研究项目（ZD2022106）.

*通信作者：吉　喆

0 引言

在硅基光电子集成领域，双向光栅耦合器作为一种关键组件得到了广泛应用。该类耦合器不仅能够实现光电子芯片与外部光源的高效耦合，而且因其独特的设计可以有效减少寄生反射，提高耦合效率。随着光通信技术的不断进步，对于高性能光栅耦合器的需求也在持续增长。

光栅耦合效率受到散射效率、向上衍射的指数衰减场与单模光纤（SMF）高斯场之间的方向性和模式匹配程度的限制。其中，方向性可以使用金属反射镜或通过优化衬底层埋氧化物厚度来避免[1]。然而，进一步提高耦合效率的难点在于指数衰减的衍射场与SMF的高斯场之间的模式失配，由其导致的耦合效率损失约为20%[2]。为解决该问题，研究者一直在探索新的设计结构。例如，通过使用非均匀结构（变迹结构），可实现衍射光场呈现高斯分布，从而提高与单模光纤的模式匹配程度。

Riccardo等[3]提出一种简单实用的策略来设计高效率的光栅耦合器。该策略同时对光栅周期和占空比进行变迹，并对光栅耦合器的刻蚀深度进行优化。在1 550 nm波长处可获得83%的耦合效率，与实验获得的81%相近，3 dB带宽达81 nm。刘亚康等[4]提出一种新型的低损耗变迹光栅耦合器设计方案。通过线性改变占空比并根据布拉格条件对每个光栅周期进行调控，有效提升了向上衍射效率和耦合效率。在1 550 nm波长处，对于TE模式耦合效率达到81.3%，3 dB带宽约为76 nm，获得基于铌酸锂薄膜的无反射层光栅耦合器设计方案中最高的耦合效率。Zhou等[5]提出并验证了一种利用中心对称光栅耦合器结构提高光学带宽的方法。通过遗传算法对光栅各周期槽宽、齿宽等结构参数进行优化，该方法具有将1 dB光学带宽增加到108 nm的优异性能，在1 565 nm波长处的模拟耦合效率为51.5%，1 dB带宽为109 nm。Yang等[6]采用基于梯度的伴随优化方法快速生成多自由度的光栅结构。经该方法处理后的光栅光衍射强度归一化后呈类高斯分布，与输入高斯光束的模式匹配程度更好，实现了50.14%的耦合效率，3 dB带宽为31 nm。Zhang等[7]提出一种新型的双向变迹光栅耦合器，通过光栅切趾技术显著提高耦合效率，并最小化寄生反射。为便于制造，引入亚波长光栅以提升耦合性能。模拟显示在1 580 nm波长处，获得72%的耦合效率，3 dB带宽为85 nm。

本文基于变迹光栅的设计原理，采用时域有限差分法（FDTD）对光栅的刻蚀深度、周期和初始占空比等关键参数进行分析。此外，探讨了占空比线性与非线性变迹情况下对光栅耦合效率的影响，旨在实现光栅向上衍射模场与光纤高斯模场之间的高效匹配。为减少光能量在衬底的泄漏，通过对比分析在埋氧层下方引入不同金属反射镜对耦合效率的影响，最终提出一种具有高耦合效率和大带宽特性的双向变迹垂直光栅耦合器结构。仿真结果表明，在1 520～1 620 nm波长范围内的横电波（TE）偏振模式下，添加Al反射镜后，占空比线性与非线性变迹情况下耦合效率可在1 570 nm波长处分别提升至90.8%与92.06%，且3 dB带宽分别为73 nm（1 538～1 611 nm）和74 nm（1 542～1 616 nm）。

1 结构设计

双向变迹光栅耦合器采用绝缘体上硅（SOI）结构，如图1所示。主要包括片上光栅结构和光纤结构两个部分，由多层材料堆叠而成[8]，自下向上依次为：5 μm厚的衬底层、3 μm厚的埋氧层、340 nm厚的硅波导层。虽然硅波导的厚度仅为纳米量级，但Si与周围介质存在的高折射率差能将光能量束缚在光栅波导层中，以实现低损耗的传输[9]。在耦合器的上方，使用模场直径为10.4 μm的单模光纤，以实现高效的光耦合。本文通过调控各结构参数，确保光耦合的高效性和稳定性。

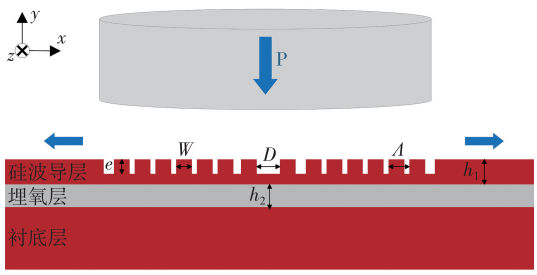


图1 双向变迹光栅耦合器截面示意图

光栅的周期Λ，即相邻栅柱之间的距离，是影响光栅耦合器性能的关键参数。光栅的占空比F_f，即相邻栅柱间脊形宽度w与周期的比值，对光栅的衍射效率起决定性作用。同时，光栅的刻蚀深度也是影响耦合效率的重要因素。当空间光入射至波导时，光栅刻蚀形成的上下表面会对光波产生干涉效

应。若上下表面能使光栅作用下的光波在相位上实现干涉增强，光耦合效率将得到显著提升[10]。

光栅的耦合效率η受到向上衍射效率η_1和向上衍射模斑与单模光纤模斑的重叠积分η_2的综合影响，表达式为：

$$\eta=\eta_1\cdot\eta_2 \tag{1}$$

式中，η_1为波导中向上衍射的光功率与波导内总光功率的比值，反映了波导中光向上衍射的比例；η_2则表示向上衍射的模斑与单模光纤模斑之间的重叠积分，即向上衍射的光能有效耦合到单模光纤中的比例[4]。为了实现高效的光耦合，需要同时优化这两个参数：提高向上衍射的效率η_1，并确保衍射光与单模光纤模斑之间的良好重叠，即提高η_2。

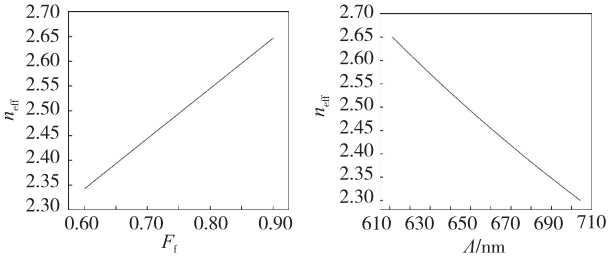
对于均匀光栅，假设未刻蚀部分的宽度为w，刻蚀深度为e，周期为Λ。如果将光栅的占空比F_f定义为未蚀刻部分的宽度w与单个辐射单元的总长度Λ之比，则光栅的有效折射率n_eff可表示为：

$$n_\mathrm{eff}=F_\mathrm{f}\cdot n_\mathrm{u}+(1-F_\mathrm{f})\cdot n_\mathrm{e} \tag{2}$$

式中，n_u和n_e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。当刻蚀深度为定值时，n_u和n_e也为定值，此时有效折射率的改变由占空比确定，两者关系如图2(a)所示。正因为光栅未刻蚀区域的栅柱和刻蚀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Λ可表示为：

$$\Lambda=\frac{\lambda_\mathrm{c}}{n_\mathrm{eff}-\sin\theta_\mathrm{air}} \tag{3}$$

式中，λ_c是光在真空中的波长，θ_air是衍射角，n_eff是光在衍射单元传播时的有效折射率。在λ_c和θ_air确定的情况下，有效折射率的改变会导致周期发生变化，两者关系如图2(b)所示。



(a) 占空比与有效折射率关系图 (b) 光栅周期与有效折射率关系图

图2　光栅周期、占空比与有效折射率之间的关系

在单次刻蚀工艺中，由于刻蚀深度固定，通过沿光栅长度x方向线性调整占空比，可以在初始几个周期内有效控制光的衍射，形成类似高斯分布的衍射光斑[11]。这种方法能够提高衍射光斑与单模光纤模场的重叠积分η_2，从而提升耦合效率。相比之下，均匀光栅中的电场强度呈现指数衰减，与光纤的高斯模场分布不匹配，导致耦合效率降低。因此，调整占空比是优化光栅设计的关键步骤[12]。

分别采用线性与非线性改变占空比两种策略，线性变迹方法采用一元一次函数形式，非线性变迹方法采用指数函数形式，对于占空比线性变迹如式(4)和(5)所示：

$$\text{左侧：}F_\mathrm{f1}=F_{01}-R_1\cdot i \tag{4}$$

$$\text{右侧：}F_\mathrm{f2}=F_{02}+R_1\cdot i \tag{5}$$

对于占空比非线性变迹如式(6)和(7)所示：

$$\text{左侧：}F_\mathrm{f1}=F_{01}\cdot\exp[(-R_2)\cdot i] \tag{6}$$

$$\text{右侧：}F_\mathrm{f2}=F_{02}\cdot\exp[(R_2)\cdot i] \tag{7}$$

式中，F_f1是间隔D左侧光栅区域第一个衍射单元占空比；F_f2是间隔D右侧光栅区域第一个衍射单元的占空比；F_{01}和F_{02}为两段光栅区域从左到右子单元的初始占空比；R_1与R_2分别是线性与非线性变迹因子；i是从左到右衍射单元编号。

式(4)～(7)给出了光栅占空比的调控方式，为使得η_2能够更好匹配，设置光栅衍射区域的长度为10 μm[13]。此时，光栅衍射单元数为16，即一侧的单元数为8。其中，设置左侧光栅前四个衍射单元占空比发生变迹而后四个占空比均匀，并且第四与第五个衍射单元占空比保持一致。由于该结构为镜像对称，右侧光栅结构为前四个衍射单元占空比均匀而后四个占空比变迹，同样，第四与第五个衍射单元占空比保持一致。本文采用保证周期不发生变化，改变占空比的方案。先将光栅初始占空比定为0.85，初始刻蚀深度为160 nm，对于λ=1 570 nm，$\theta_\mathrm{air}=0°$，将得到的n_eff代入到式(3)可以得到每个衍射单元的周期Λ_i($i=1,2,\cdots,8$)。

所提出的双向变迹光栅耦合器的初始结构参数如表1所示。

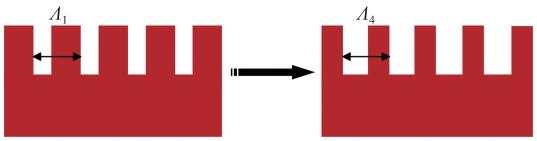
表1　光栅耦合器初始结构参数

参数	数值
周期Λ/nm	630
初始占空比F_0	0.85
波长λ/nm	1 570
变迹因子R	0.016
间隔D/nm	260
刻蚀深度e/nm	160
埋氧层厚度h_2/μm	3

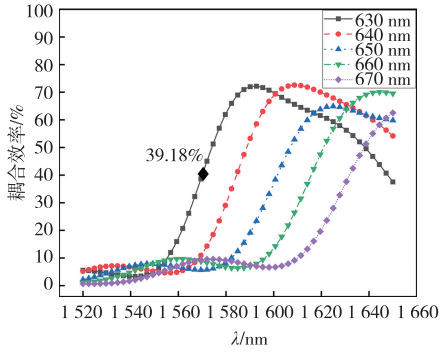
2 仿真与结构优化

2.1 光栅关键参数对耦合效率的影响

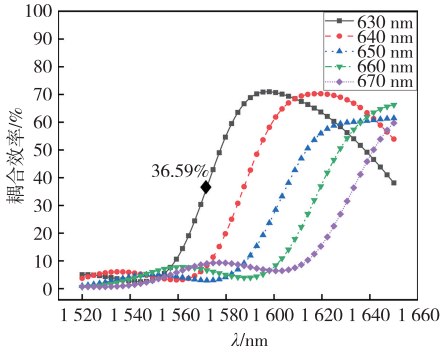
通过上文分析发现初始占空比、变迹因子和刻蚀深度等因素对耦合效率产生影响。为提高耦合效率，需要对这些参数进行优化。在固定其他参数的情况下，对光栅周期Λ进行10 nm步长的扫描，范围在630～660 nm。结果显示，在波长1 570 nm下，当采用线性变迹的方法调控占空比时，随着周期从630 nm增加到670 nm，在周期为630 nm处达到最高耦合效率39.18%；当采用非线性方法时，同样也在周期为630 nm处取得高于其他周期的耦合效率，为36.59%，展现出更好的耦合性能。



（a）光栅周期变化图



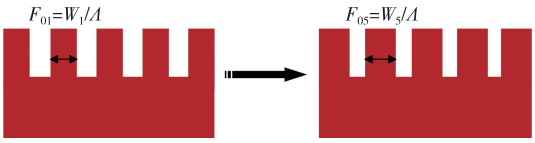
（b）线性变迹下光栅周期与耦合效率关系图



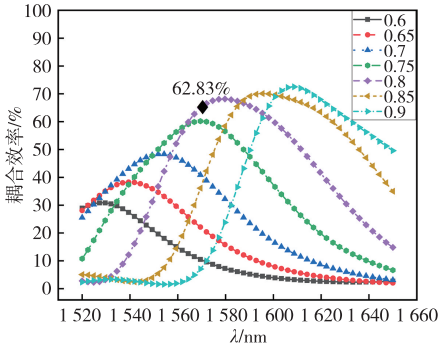
（c）非线性变迹下光栅周期与耦合效率关系图

图3 光栅周期对耦合效率的影响

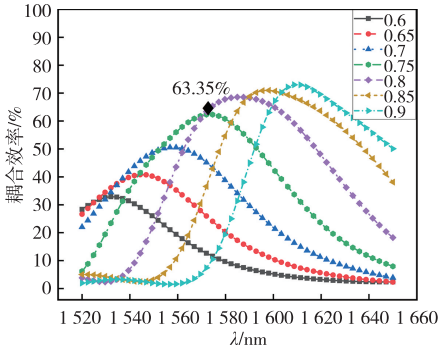
在确定光栅周期Λ=630 nm、光栅刻蚀深度e=160 nm、间隔D=260 nm、埋氧层厚度h_2=3 μm后，接下来讨论初始占空比F_0的变化对耦合效率的影响。由于过大或过小的占空比均会使得光栅衍射特性降低，选择将初始占空比F_0从0.6到0.9按照步长0.05进行扫描，得到在1 570 nm波长下占空比线性、非线性变迹情况下耦合效率与光栅初始占空比F_0关系，仿真得到的耦合效率曲线如图4所示。随着初始占空比增大，光栅刻槽宽度也逐渐变小，其中，两种情况均在F_0=0.8时达到峰值耦合效率，分别为62.83%与63.35%。



（a）光栅初始占空比变化图



（b）线性变迹下光栅初始占空比与耦合效率关系图



（c）非线性变迹下光栅初始占空比与耦合效率关系图

图4 光栅初始占空比对光栅耦合效率的影响

采用粒子群算法（PSO）对光栅刻蚀深度与变迹因子同时进行优化。在PSO算法中，每个解决方案被视为搜索空间中的一个“粒子”。粒子在搜索空间中移动，通过跟踪两个最优解来更新自己的位置和速度：个体最优（$pBest$）和全局最优（$gBest$）。

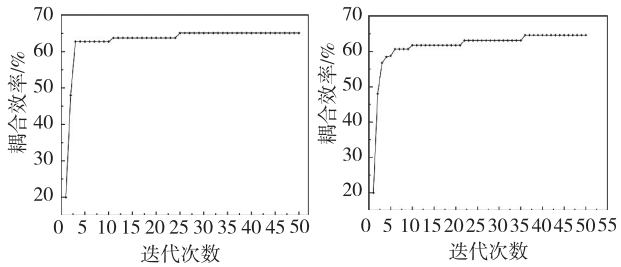
$$v_i(t+1)=w\cdot v_i(t)+c_1\cdot r_1\cdot[pBest_i-x_i(t)]+c_2\cdot r_2\cdot[gBest-x_i(t)] \quad (8)$$

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1)x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1) \quad (9)$$

式中，$i(i=1,2,\cdots,N)$表示该种群中粒子总数；$v_i(t)$是粒子i在时间t的速度；$x_i(t)$是粒子i在时间t的位置；w是惯性权重，控制粒子速度的前一次迭

代的影响；c_1 和 c_2 是加速系数，控制粒子向个体最优和全局最优移动的趋势；r_1 和 r_2 是随机数，通常在[0,1]范围内。随机初始化一群粒子的位置和速度，然后评估每个粒子的适应度，即计算目标函数值。对于每个粒子，如果其当前适应度优于之前找到的最优适应度，则更新其个体最优；如果该适应度优于整个群体的最优适应度，则更新全局最优。之后，根据粒子的当前速度、个体最优和全局最优，更新每个粒子的速度和位置。重复评价、更新个体最优、全局最优并根据公式(8)、(9)对速度和位置进行不断更新，直到达到预设的迭代次数或其他停止条件，完成算法的迭代过程。

以实现最大的耦合效率为目标，通过PSO优化光栅刻蚀深度和变迹因子。由于该算法的随机性，选取刻蚀深度的搜寻范围为0～340 nm。变迹因子 R 过大，光栅占空比会发生急剧变化，可能导致光栅的衍射特性发生突变，增加背反射，同时也会使光栅难以加工。因此，实验将线性、非线性变迹因子的搜寻范围均设为0.01～0.04，并分别对算法进行50次迭代[8]。迭代次数与耦合效率之间的关系如图5所示，随着迭代次数的增加，光栅的耦合效率也呈现增长趋势。当迭代分别进行到第25次、36次时基本达到稳定，此时得到占空比线性变迹与非线性变迹条件下光栅最大耦合效率分别为65.4%和64.62%。对应的最优刻蚀深度 e 和线性变迹因子 R_1 分别为：e_1=170 nm；R_1=0.016。非线性变迹条件下的最优刻蚀深度 e 和非线性变迹因子 R_2 分别为：e_2=170 nm；R_2=0.019。

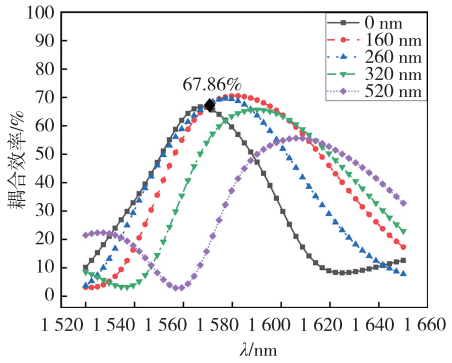


(a) 线性变迹下迭代次数与耦合效率关系图　(b) 非线性变迹下迭代次数与耦合效率关系图

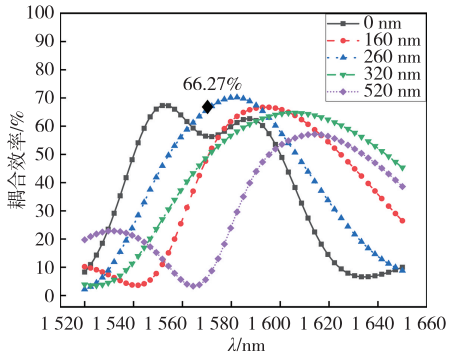
图5　粒子群算法优化过程中耦合效率随迭代次数的变化

2.2　左、右光栅间距对耦合性能的影响

在对称光栅耦合器设计中，调整光栅间距对耦合效率、带宽和传输谱形状有重要影响。基于仿真确定的其他参数，分析光栅间距 D 为0 nm，160 nm，260 nm，320 nm，520 nm的情况。仿真所得的间距 D 与光栅耦合效率关系如图6所示。如图6(a)所示，占空比线性变迹下，随着间距增大，耦合效率增加，但超过260 nm后效率下降。在1 570 nm波长处，D=260 nm时耦合效率最高，达到67.86%。如图6(b)所示，占空比非线性变迹情况下，同样在 D=260 nm时达到66.27%的峰值耦合效率。因此，为获得最佳耦合性能，选取260 nm的光栅间距。



(a) 线性变迹下两段光栅间距与耦合效率关系图



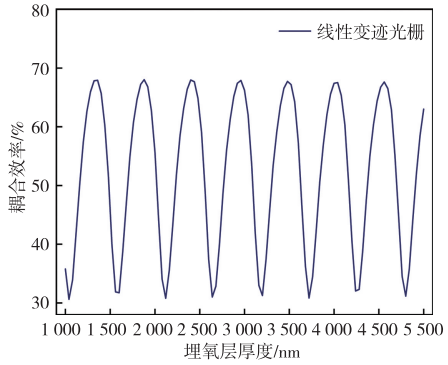
(b) 非线性变迹下两段光栅间距与耦合效率关系图

图6　光栅间距对耦合效率的影响

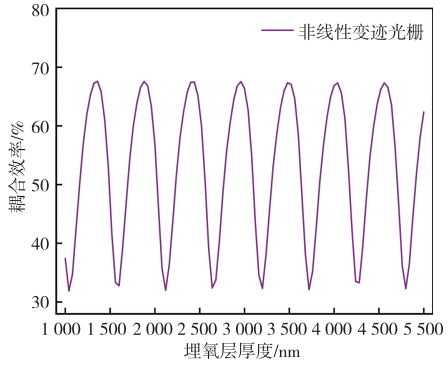
2.3　埋氧层厚度对耦合效率的影响

在光栅耦合器设计中，埋氧层厚度对耦合效率也会产生影响。当光从光纤入射至光栅时，只有满足顶层硅材料传播条件的光才能有效耦合进波导。大部分光穿透光栅至硅衬底层并反射，这部分光与入射光相位匹配时可提升耦合效率[14]。利用FDTD软件进行扫描分析得到埋氧层厚度对光栅耦合效率的影响，如图7所示，右侧的条状图表示光耦合进光栅右侧的耦合效率。由于结构的对称性，两侧的耦合效率是一致的。从图7(a)中可以发现，占空比线性变迹条件下耦合效率随着埋氧层厚度变化呈现出一定的规律性，在1.2 μm，1.8 μm，2.2 μm，3 μm处可达到67.88%的峰值耦合效率。考虑到整体集成系统的规模需求，选取埋氧层厚度为3 μm。观察图7(b)同样可以发现占空比非线性

变迹条件下，当埋氧层厚度为3 μm时，可以达到67.54%的最高耦合效率。



（a）线性变迹下埋氧层厚度与耦合效率关系图

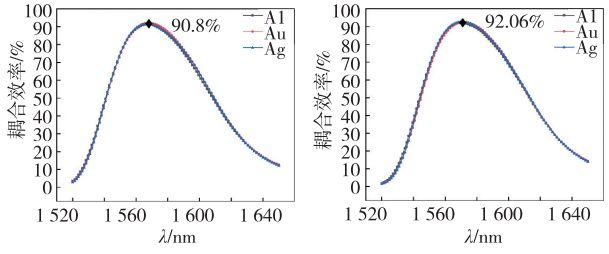


（b）非线性变迹条件下埋氧层厚度与耦合效率关系图

图7 光栅埋氧层厚度对光栅耦合效率的影响

2.4 金属反射镜选择及优化

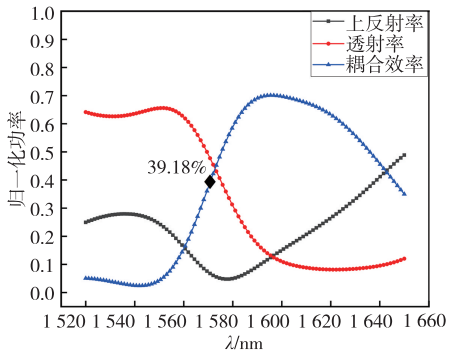
基于上文仿真优化得到的参数，对光栅耦合器结构进行调整，以达到减少衬底光泄漏，提升方向性系数的目的[9]。采用Al，Ag，Au三种较为常见的材料为反射镜对产生的影响效果进行分析。如图8（a）、（b）所示，当在埋氧层正下方添加厚度为60 nm的三种金属反射镜后，占空比线性与非线性变迹两种情况在1 570 nm波段处获得峰值耦合效率分别为90.8%、92.06%。考虑到Al是一种在工业生产中应用广泛且价格相对较为低廉的金属材料，而Ag和Au属于贵金属，因此选择Al为反射镜材料。



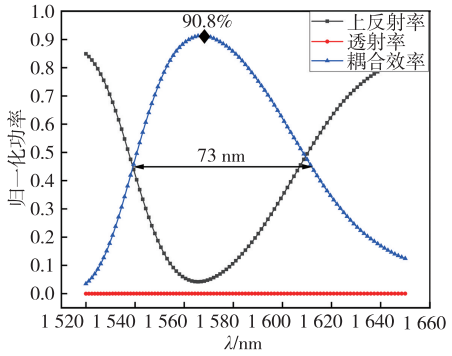
（a）线性变迹下三种反射镜与耦合效率的关系图　（b）非线性变迹下三种反射镜与耦合效率的关系图

图8 不同金属反射镜对光栅耦合效率的影响

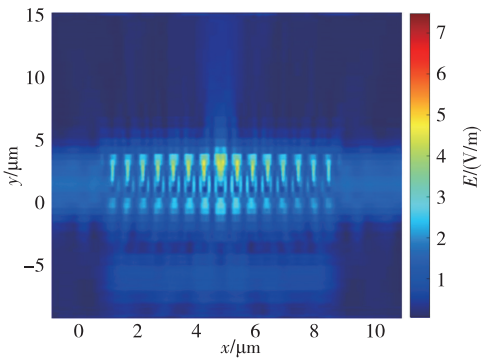
由于增加了金属反射镜，向下传输的光被反射到光栅进行二次耦合，进而提高了耦合效率。图9（a）、（b）展示出在占空比线性变迹情况下优化前后在传播方向上衍射的光功率之间的差异。在1 570 nm波长处，优化前的峰值耦合效率为39.18%，优化后可达到90.8%，相比之下提升51.62%。从图10中可以看出，优化前占空比非线性变迹的光栅耦合器获得36.59%的耦合效率，带Al金属反射镜的光栅耦合器在1 570 nm波段的峰值耦合效率达到92.06%，相较于未优化前提升68.38%，这两种情况下在添加Al反射镜后透射率均显著降低，基本为0。此时通过图9（c）、（d）可以看出，相比于未添加反射镜，光栅耦合效果明显，空间光经过光栅耦合进入波导中并沿波导两侧传播。



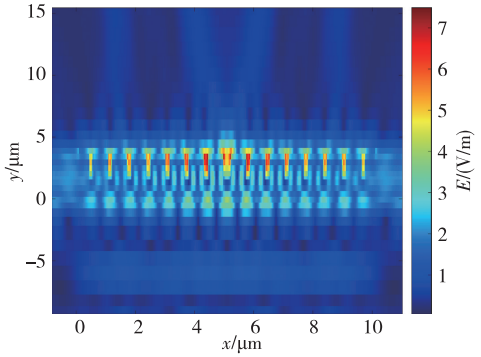
（a）优化前



（b）优化后



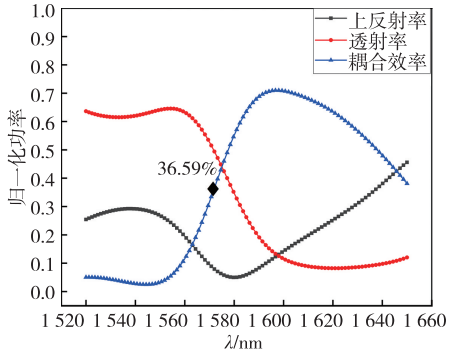
（c）优化前光场分布



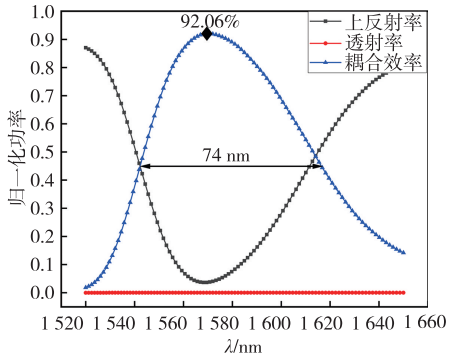
（d）优化后光场分布

图 9　线性变迹光栅耦合器优化前后的能量与光场分布对比

利用二维 FDTD 对垂直光栅耦合器结构在 1 570 nm 波长处的耦合效率进行分析。对比优化前后的两种光栅耦合器结构：线性变迹光栅和非线性变迹光栅结构。优化涉及参数调整和加入金属反射镜，以提高耦合效率。表 2 比较了本文设计的两种双向变迹光栅结构与其余五种光栅结构的性能参数，可以看出，所提出的双向变迹光栅可获得相较于其余光栅更高的耦合效率，且具有良好的带宽特性与耦合性能。



（a）优化前



（b）优化后

图 10　非线性变迹光栅耦合器优化前后的能量分布对比

表 2　几种光栅耦合器的比较

结构	λ/nm	耦合效率/%	3 dB 带宽 /nm
单向变迹[3]	1 550	83	81
单向变迹[4]	1 550	81.3	76
中心对称[5]	1 565	51.5	144
单向变迹[6]	1 550	50.14	31
双向变迹[7]	1 580	72	85
双向变迹*1	1 570	90.8	73
双向变迹*2	1 570	92.06	74

注：*1 与*2 为本文设计的线性、非线性变迹光栅结构。

2.5　容差分析

在与芯片器件对接的过程中，光纤位置的微小偏差难以避免，且器件的纳米级特征尺寸要求极高的加工精度。如图 11 所示为优化后的线性和非线性变迹光栅耦合器对准误差分析。仿真中光纤与光栅 x 方向中心对准位置为 5.1 μm，当耦合效率超过 80% 时，非线性变迹光栅的对准容差为 2.2 μm（4～6.2 μm），线性变迹光栅为 2.05 μm（4.05～6.1 μm），显示了良好的对准容差，能够适应微小偏差，确保高效能量传输。

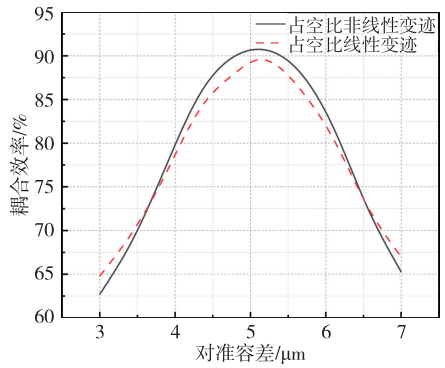


图 11　器件对准容差分析

此外，为进一步分析结构尺寸的加工容差对耦合效率的影响，这里重点分析结构参数优化后两段光栅间距 D 的加工误差，如图 12 所示，以 D 的最优参数 260 nm 为横坐标零点。可以看出，当光栅耦合

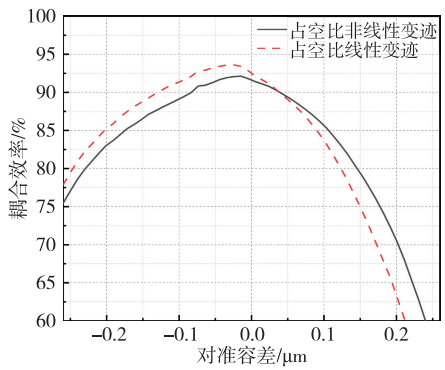


图 12　光栅间距容差分析

器的耦合效率超过80%时,线性变迹光栅的加工容差为0.37 μm(−0.23~0.14 μm),非线性变迹光栅为0.37 μm(−0.25~0.12 μm),在以上误差范围内,本设计表现出良好的加工误差。

3 结论

本文设计了一种用于单模光纤与SOI波导之间完全垂直耦合的双向变迹光栅耦合器。在初始结构参数下,通过线性与非线性两种方式调控占空比,分别实现了39.18%和36.59%的耦合效率。进一步优化光栅关键参数后,在TE模式下、1 570 nm波长处,线性与非线性变迹光栅的峰值耦合效率分别提升至67.88%和67.54%。为减少衬底光泄漏,在埋氧层下方引入金属反射镜层。添加Al反射镜后,两种光栅耦合器在1 570 nm波长处的耦合效率分别进一步提升至90.8%和92.06%,对应的3 dB带宽分别为73 nm和74 nm,表现出良好的耦合特性与带宽特性。此外,对两种结构的容差分析均显示其具有良好的对准和加工容差能力。该工作为硅基光栅耦合器的设计与实际应用提供了有价值的参考。

参考文献:

[1] Zhang Z, Shan X, Huang B, et al. Efficiency enhanced grating coupler for perfectly vertical fiber-to-chip coupling [J]. Materials, 2020, 13(12): 2681.

[2] 王付玲. 硅基片上波分复用器研究[D]. 济南:山东大学, 2022.
Wang Fuling. Reach of silicon based on-chip wavelength multiplexing device[D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[3] Marchetti R, Lacava C, Khokhar A, et al. High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 16670.

[4] 刘亚康, 佘 玄, 刘红硕, 等. 基于铌酸锂薄膜的低损耗切趾光栅耦合器[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 204-211.
Liu Yakang, She Xuan, Liu Hongshuo, et al. Low-loss apodized grating couplers based on lithium niobate on insulator [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 204-211.

[5] Zhou X, Tsang H K. Photolithography fabricated broadband waveguide grating couplers with 1 dB bandwidth over 100 nm [J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(1): 6600206.

[6] Yang M, Yan Y, Wu Z, et al. High-performance grating couplers on 220 nm thick silicon by inverse design for perfectly vertical coupling[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 18112.

[7] Zhang Z, Chen X, Cheng Q, et al. High-efficiency apodized bidirectional grating coupler for perfectly vertical coupling[J]. Optics Letters, 2019, 44(20): 5081-5084.

[8] 吉 喆, 李 东, 付士儒, 等. 基于双层氮化硅减反射垂直光栅耦合器[J]. 光学学报, 2024, 44(2): 0222003.
Ji Zhe, Li Dong, Fu Shiru, et al. Vertical grating coupler based on double-layer silicon nitride antireflection [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(2): 0222003.

[9] Chen Z, Peng R, Wang Y, et al. Grating coupler on lithium niobate thin film waveguide with a metal bottom reflector[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(11): 4010.

[10] Luo X, Tang W, Chu T. Low-loss grating coupler with a gradient index-matching subwavelength structure[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 168: 109860.

[11] Zhou X, Tsang H K. Wide-bandwidth and low-reflection high-efficiency grating couplers [C]//2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), 2023: 1.

[12] Ji Z, Fu S R, Li D, et al. Efficient and perfectly vertical binary blazed grating coupler with a slit [J]. Optical Engineering, 2023, 62(9): 097101.

[13] Fraser W, Korček R, Glesk I, et al. High-efficiency metamaterial-engineered grating couplers for silicon nitride photonics[J]. Nanomaterials, 2024, 14(7): 581.

[14] Guo Y, Ma Z, Tong X, et al. Efficient grating couplers for optical fibers to ultra-low-loss waveguides [J]. Proc. of SPIE, 2022, 12006: 26-32.

作者简介:

封青青(2000—),男,河北省平山县人,硕士研究生,研究方向为光栅耦合器的设计;

吉 喆(1983—),女,河北省涉县人,博士,副教授,主要从事集成光波导技术方面的研究。