

高效率低向上反射的氮化硅光栅耦合器^①

张赞允 朱 华 李鸿强

(天津工业大学 电子与信息工程学院,天津 西青 300387)

摘 要 氮化硅材料相比硅材料具有插入损耗低、热稳定性好、制作容差大及相对误差容忍度高的优点,引起了人们广泛的关注和极大的研究兴趣.光栅耦合器作为光芯片与片外光源的接口,以其优良的光耦合性能、放置位置灵活和便于晶圆级在线测试等诸多优点,在很多应用领域已经占据了越来越重要的位置.本文设计了一种基于氮化硅材料的垂直耦合的光栅耦合器,采用变迹光栅结构,实现了对入射光的垂直耦合.在 1 550 nm 波长处,在带有衬底金属反射镜的情况下单向传输的耦合效率达到了 79.5%,不引入金属反射镜的器件仍然能达到 57.8%的耦合效率值,能很好地实现单向垂直光耦合的性能.对比同类型的硅材料的光栅耦合器,本设计在垂直输入耦合时向上反射的光损耗极低仅为 0.29%,大大减弱了器件的负二阶上反射对光纤中入射光引起的串扰.这个设计对氮化硅光栅耦合器的实际制作有一定的参考价值.

关键词 光互连;光子集成技术;光栅耦合器;氮化硅

中图分类号 TN256

文献标识码 A

0 引言

随着光子集成技术和片上光互连技术的发展,光子互连的低功耗、高带宽、低串扰的优势日益显现,为突破芯片内电互连瓶颈进一步提高芯片性能提供了有效的解决方案.硅工艺成熟廉价且与 CMOS 工艺兼容的优点使得硅基光电子器件的制造成本更为低廉且前景巨大,各种功能性光子器件的片上集成是硅光子学的研究目标与发展方向,经过近几十年的发展硅基光电子集成已经向实用化稳步迈进,硅基片上光互连所需的所有功能器件都能够在晶圆级片上集成.与硅材料平台相似,氮化硅(Si_3N_4)材料工艺也与现有的 CMOS 工艺相兼容^[1-4],器件的制造灵活性更高,通过淀积的方法可以很容易地在硅衬底或 SOI 材料上制备氮化硅薄膜.氮化硅是波导平台的一种很有前途的材料,因为它的非线性系数很低,而且在 1 550 nm 通信波段不存在双光子吸收,传输损耗极低,可以广泛应用于可见光到中红外波段的高效非线性应用中.氮化硅材料插入损耗低、对比硅材料热稳定性更好(Si 或 InP 的温度依赖系数大约是 0.1 nm/°C,而 Si_3N_4 仅为其五分之一,大约为 0.02 nm/°C^[5,6])的优点,引起了人们广泛的关注和极大的研究兴趣,成为了制作光子集成回路的替代材料.现已有许多氮化硅材料光子器件被报道,如高 Q 值的微环谐振器,多模干涉耦合器等^[7,8].

在片上光子器件集成中,光栅耦合器作为光芯片与片外光源的接口,以其优良的光耦合性能和放置位置灵活、便于晶圆级在线测试等诸多优点,在很多应用领域已经占据了越来越重要的位置^[9].目前,由于光栅耦合器制作工艺及结构的复杂度不同,耦合效率集中在 45%-70%之间.基于氮化硅材料的光栅耦合器结合了氮化硅材料制作公差大对相位误差容忍度高^[10]等优良特性和光栅的光耦合性能,受到研究人员的广泛青睐.Jan Litvik^[5]等人设计的一维氮化硅斜入射光栅耦合器仿真的效率达到了 54.16%,在 1 550 nm 波长

① 收稿日期:2018-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61504093)资助

通讯作者:张赞允,男,汉族,博士,副教授,研究方向:半导体器件,E-mail:zhangzanyun@tjpu.edu.cn.

处; Wesley D. Sacher 等人设计复杂结构的氮化硅-硅对齐的双层光栅耦合器^[11] 的测试效率达到了 -1.3 db(74%), 其耦合效率能与研究比较充分的硅基光栅耦合器相媲美, 近来 Jianxun Hong 等人^[12] 在一维氮化硅光栅耦合器下方, 衬底上方加入了 10 层 DBR 结构, 减小了由于光栅的负二阶反射向衬底的透射损耗, 进一步提升了斜入射光栅的单向耦合效率. 目前对于氮化硅光栅的设计研究主要集中于斜入射光栅耦合器上, 即光纤的放置与芯片法线有一定的夹角, 然而在器件的实际应用中, 一定的光纤倾角无疑会带来很多不便. 首先这意味着测试过程中的光纤角度调谐不可避免, 而这个过程通常较为耗时; 其次, 要想实现光纤到芯片的封装, 我们通常需要对光纤进行角度抛光, 而这种后工艺又会显著地增加封装成本. 因此, 一个能够实现完全垂直耦合(即光纤完全垂直放置, 与光芯片的法线夹角为 0° 时)的高效率光栅耦合器^[13-15] 对于快速晶圆级测试和低成本的光纤封装是十分有利的.

综上, 我们设计了一种基于氮化硅材料的单向耦合的光栅耦合器, 光波导层为氮化硅材料, 采用变迹光栅结构, 近波导端为变迹光栅中的啁啾部分, 该部分使光栅的模场与垂直放置的光纤的模场更加匹配, 得到了输入光垂直耦合入射的光栅耦合器; 远离波导端加入充当布拉格反射镜的光栅结构, 采用多周期折射率不同的材料交替, 使得单向的耦合效率大大增加; 在光栅顶部覆盖了一层二氧化硅薄膜, 作为光栅的上包层增透减反膜, 减小了光栅对入射光的上反射引起的对输入光的串扰, 进一步增加了耦合效率. 通过采用 2D-FDTD 算法对器件的结构进行优化仿真计算, 在 1550 nm 波长处仿真得到了良好的光耦合性能, 其耦合效率为 57.8%, 这一结果能够保证光子集成电路的工作性能, 并且该结构的上反射损耗极小仅为 0.29%. 在增加衬底金属反射镜之后, 获得了很高的耦合效率, 在波长 1550 nm 处的光栅的耦合效率达到了 79.5%.

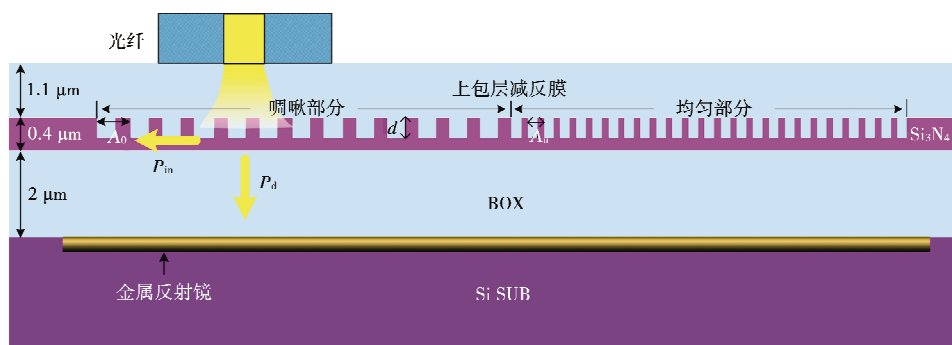


图1 光栅耦合器结构示意图

1 氮化硅单向光栅耦合器结构设计

光栅耦合器结构示意图如图1所示, 本器件设计基于 $3\ \mu\text{m}$ 厚的硅衬底(Si SUB), 氮化硅光栅结构与硅衬底之间有 $2\ \mu\text{m}$ 厚的埋氧层(Buried Oxide layer, BOX), 埋氧层的材料为 SiO_2 , 折射率 $n_3=1.44$; 氮化硅波导厚度为 $h=400\ \text{nm}$, 其折射率 $n_2=2$; 光栅刻蚀部分的深度为 $d=220\ \text{nm}$. 当光从光纤中垂直入射到光栅上时, 一部分的入射光 P_{in} 被光栅衍射耦合进入光波导, 还有一部分光 P_d 继续向下透射到衬底. 为了在 $1550\ \text{nm}$ 波长处实现最佳的单向垂直耦合的功能, 我们采用二维时域有限差分(2D-FDTD)算法对光栅的结构进行了建模仿真, 对变迹光栅和器件整体结构进行了详细的优化.

1.1 光栅部分的设计

根据设计目标, 要实现入射光与光栅垂直耦合进入波导的设计和单方向耦合输出的功能, 我们在远离波导方向加入了充当布拉格反射镜的均匀光栅结构, 保证光的单方向输出. 均匀光栅结构如图1中均匀部分所示, 该结构是由折射率不同的 Si_3N_4 和 SiO_2 以 ABABAB... 的形式排列构成的, 两种材料厚度为 $\lambda_0/4n$ (λ_0 为光在真空中的波长, n 为材料的折射率), 则 Si_3N_4 厚度为 $194\ \text{nm}$, SiO_2 为 $269\ \text{nm}$, 一对该结构为一个周期, 即 $\Delta_0=463\ \text{nm}$. 对于从 $1400\ \text{nm}$ 到 $1600\ \text{nm}$ 的波长, 这种 DBR 的反射率高达 94.8% ^[16]. 随着周期数的增多, DBR 的反射效果会更好, 在设计时, 我们先将 DBR 的周期初值设置为 18, 将实现光耦合功能的啁啾光栅部分的结构设计好后, 再在整体变迹光栅结构上优化最佳的 DBR 对数.

根据光栅布拉格条件可知, 为了实现垂直耦合, 光栅的周期 Δ 必须满足 $\Delta=\lambda/n_{\text{eff}}$, 其中 n_{eff} 为光栅区

域的有效折射率^[17],根据平面波导的 TE 模式本征方程

$$\frac{2\pi}{\lambda} = hK_1 = m\pi + \tan^{-1}K_2 + \tan^{-1}K_3, \quad (1)$$

其中, $K_1 = \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}$, $K_2 = \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}}$, $K_3 = \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}}$, $h = 400 \text{ nm}$ 为氮化硅波导的厚度, $n_1 = 1.46$, $n_2 = 2$, $n_3 = 1.444$, 分别为上包层、 Si_3N_4 和 SiO_2 的折射率, m 为模阶数. 经计算在 1550 nm 波长处, 光栅区域的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.75$, 进而求得光耦合部分的光栅周期 $\Delta(886 \text{ nm})$, 我们将其设置为啁啾部分光栅周期的初始值. 通过参考 Chen Xia 等人的设计^[18]并结合之前的设计经验, 在光耦合部分我们采用啁啾化的光栅结构, 这种结构的优点是实现了垂直耦合的功能, 更重要的是能使光栅的模场与光纤的模场更加匹配, 大大增加了光栅的耦合效率.

如图 1 中啁啾部分所示, 啁啾光栅部分共有 13 个光栅周期, 光栅的周期长度根据(2)式线性变化

$$\Delta(j) = \Delta_0 + (j-1)\Delta, \quad (2)$$

其中 Δ 表示光栅周期公差, Δ_0 是光栅前端的第一个周期长度, j 是啁啾光栅周期的序列数 ($1 \leq j \leq 13$). 因此, 啁啾部分主要的设计参数有: 第一个周期长度 Δ_0 , 光栅周期公差 Δ 的值和光栅的占空比 FF ($FF = W_j/\Delta(j)$, W_j 为光栅第 j 个周期中未刻蚀部分的宽度). 采用传统的参数扫描的方法只能优化单个的参数, 优化所有的设计参数会大大浪费系统的资源, 并且不能保证计算精度, 而且这些参数对耦合效率的影响是相互制约的, 所以一般的方法很难找到设计参数的最优值. 粒子群优化(PSO)算法是一种基于随机优化的技术, 受鸟群或鱼群的社会行为的启发, 从随机解出发, 通过迭代寻找最优解的方法, 广泛应用于各种设计优化问题, 包括纳米光子设计^[19,20]. 本设计采用 PSO 算法优化对上述的三个设计参数进行了全局优化, 我们取光栅第一个周期长度的初值 $\Delta_0 = 886 \text{ nm}$, 占空比的初值 $FF = 0.5$, 光栅周期公差的初值 $\Delta = 6 \text{ nm}$. 为了提高仿真效率, 必须围绕初值为 PSO 算法定义一些重要的参数值范围: Δ_0 的范围是 $880-1300 \text{ nm}$, FF 的范围是 $0.3-0.7$, Δ 的范围是 $2-7 \text{ nm}$; 优化目标是: 在 1550 nm 波长处光栅的耦合效率最大. 经过多次迭代优化计算, 求得器件整体最大的耦合效率为 51.58% , 对应的最佳设计参数值为 $\Delta_0 = 915 \text{ nm}$, $FF = 46\%$, 光栅周期公差 $\Delta = 5 \text{ nm}$.

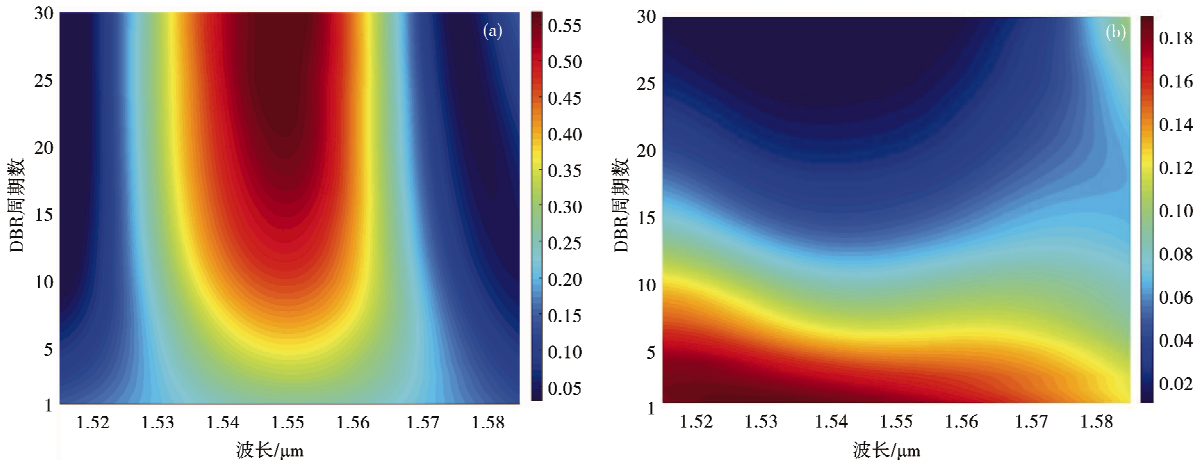


图 2 (a)计算得到不同 DBR 周期数与光栅正向耦合效率关系, (b)计算得到不同 DBR 周期数与光栅远波导方向耦合效率关系

在采用 PSO 算法优化得到啁啾部分的结构参数后, 我们基于整体光栅结构采用参数扫描的方法, 对均匀光栅部分 DBR 结构的周期数进行了扫描, 结果如图 2 所示, 图中横坐标为 DBR 周期数, 纵坐标为波长范围, 热图中的颜色分布代表了光栅耦合效率的大小. 由图可知, 随着 DBR 对数的增多, 光栅的正向耦合效率逐渐增大, 远离波导方向的光功率逐渐被抑制到最小, 当 DBR 周期数大于 22 时, 正向耦合的耦合效率达到 54% , 远离波导方向的光损耗也降到了 2% 以下. 综合器件尺寸和正向耦合效率考虑, 本设计选取 24 个周期的 DBR 反射层, 在 1550 nm 波长处, 仿真得到整体器件的耦合效率为 55% .

1.2 上包层厚度优化

在最优的光栅周期下, 限制氮化硅材料器件工作性能的主要因素是存在负二阶的上反射光和垂直向下的负一阶衍射光. 为了保证完美的垂直耦合性能, 器件在建模仿真时, 背景折射率设置为 1.46 , 这代表

了器件上覆盖了一层无限厚的 SiO_2 包覆层,因此该过程中,光栅向上反射的光功率没有受到包层和空气界面的任何反射作用而直接进入光纤.而考虑到器件实际制作时,通常覆盖一层一定厚度 SiO_2 上包层薄膜,其作用一是可以保护器件结构,更有意义的是可以增加向下的光透射减小负二阶的上反射对入射光进行的串扰.以下是我们对上包层厚度的优化过程,根据基本的光学原理,最佳的上包层减反膜的厚度 h 主要依照(3)式^[21]

$$h = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_1}, \quad (3)$$

其中 λ 为真空中的波长, n_1 为上包层材料的折射率, N 为正整数.取 $\lambda=1550\text{ nm}$ 、 N 为 2,计算得上包层膜的厚度为 $0.8\ \mu\text{m}$ 时,上包层达到了增透减反的效果,耦合效率大大提高.为了验证以上理论,在设计时重新对光栅的上包层减反膜的厚度 h 进行了参数扫描,结果如图 3 所示,仿真结果与理论分析基本吻合,耦合效率的最大值是与 N 值有关成周期分布的,当薄层厚度为 $0.85\ \mu\text{m}$ 时,在 1550 nm 波长处光栅的耦合效率达到了 57.8% ,保证了器件单向光耦合的工作性能,同时上反射被抑制到了最低为 0.29% ,对应的回波损耗则降至 20 dB 左右,比同类型的或硅基光栅耦合器的上反射损耗小得多.

2 结果讨论分析

通过采用 2D-FDTD 算法进行一系列的仿真和优化,最终本器件的结构参数为:器件总长度 $23.4\ \mu\text{m}$,其中,均匀光栅部分有 24 个周期,每个周期长度 $\Delta_0=463\text{ nm}$;啁啾部分第一个周期 $\Delta_0=915\text{ nm}$,共 13 个周期,光栅周期公差 $\Delta=5\text{ nm}$,每一个周期的占空比 $FF=46\%$;用作上包层减反膜的 SiO_2 的厚度为 $0.85\ \mu\text{m}$.

图 4 是采用商业光学软件 FDTD solution 对器件进行整体仿真的结果图,仿真光源采用一个模斑直径为 $10.4\ \mu\text{m}$ 的高斯光源替代光纤的垂直入射,光源的入射中心在 1550 nm 波长达到的最大耦合效率处,图 4 (a)为仿真光纤入射到光栅输入耦合截面电场分布图,可以看到垂直入射的高斯模式经过光栅的衍射具有较好的单向传输特性,向一侧波导的耦合远远大于另一侧,光栅工作性能良好.从图 4(b)中可以看出,光栅的耦合曲线(正向耦合)呈现为较为完美的高斯线型,其耦合中心波长在 1552 nm 处,正向耦合效率最高可达 57.8% ,上反射损耗(向上反射)和远波导方向的耦合(后向透射)都非常小.

通过向衬底透射曲线和截面电场图可以看出,器件主要的光功率损耗在于向衬底泄露的光功率比较大,泄露的光功率约占 38% 左右,这部分光功率对光栅的耦合效率有很大影响,为了减小这部分光损耗,参考器件在实际应用时,在基于 CMOS 后工艺的

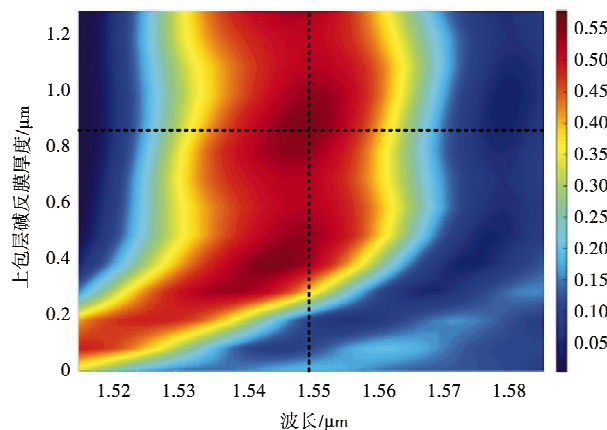


图 3 上包层厚度与光栅正向耦合效率关系

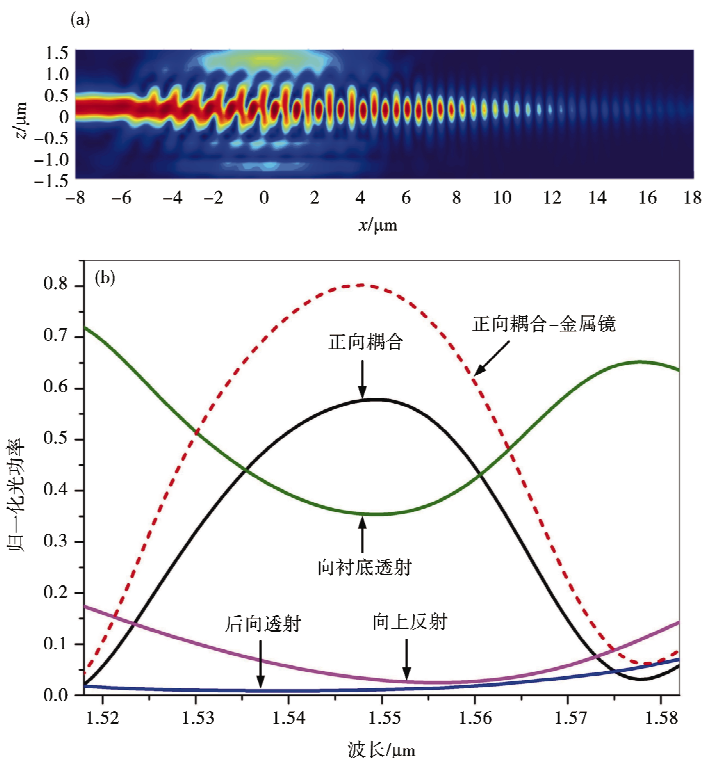


图 4 (a)仿真光纤入射到光栅输入耦合截面电场分布图, (b)仿真计算的光栅各部分归一化功率曲线

光电集成芯片中,通常把多晶硅、非晶硅或氮化硅等材料制作光子器件以3D集成的形式化学气相沉积在IC芯片垂直上方,而IC芯片上的金属焊盘恰好可以充当金属镜,将光波导层中光栅耦合器透射下来的光进行反射,使得光信号低损耗传输。基于上述思想,我们在埋氧层下方、Si衬底上部加了一个金属反射镜(如图1所示),并对其进行仿真,仿真结果如图4(a)中红色虚线所示,器件的耦合效率在工作波长1550 nm处增加到了79.5%,其耦合损耗仅为0.99 dB,这是一个令人满意的结果,对光电子器件三维集成技术的发展有一定的参考价值。

光纤的光被光栅耦合器耦合进入波导时,光栅耦合器对于光纤的对准容差能力越强,器件的工作性能越稳定。为了验证氮化硅器件的光纤对准容差性能,我们以光栅工作时正向光波导达到最大光耦合时光源的位置为原点(0,0),将光源中心的位置在 x 方向(平行于波导方向)和 y 方向(垂直于波导方向)引入了一定的位移,光源的高度保持不变(z 一定),通过软件仿真计算了光源偏离入射中心位置发生水平位移而带来的传输损耗,如图5所示,纵横坐标分别为偏离原点的距离,色柱为传输损耗值,由图可知,带来1 dB损耗的 y 方向上的偏移量约为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$, x 方向上的偏移量 $>|\pm 3| \mu\text{m}$,而光芯片的光学对准测试平台的精度一般为几十纳米,根据仿真结果可知,本设计在水平方向上存在几十纳米的对准误差的情况下,光损耗也能保持在1 dB以内。

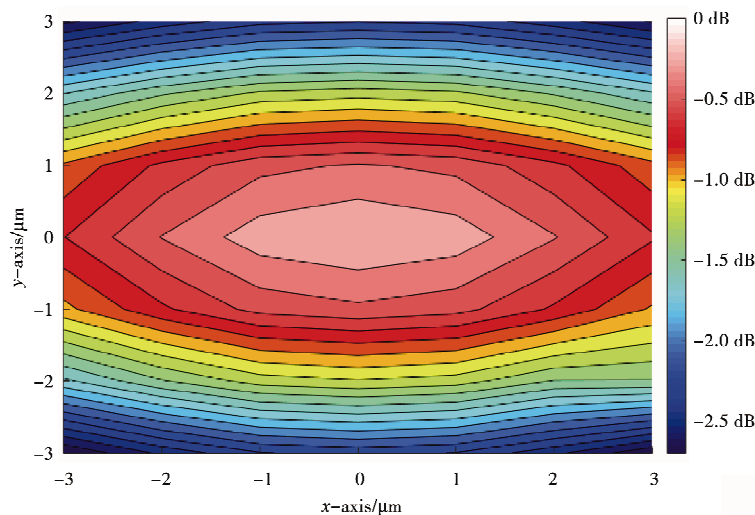


图5 光源偏离入射中心的距离与传输损耗的关系

3 结论

本文设计了一种高效率的氮化硅单向光栅耦合器,它能实现用于单模光纤和光芯片之间的垂直耦合功能,并且具有极低的上反射损耗,大大减弱了器件的负二阶上反射对光纤中入射光的串扰。经过仿真优化,器件的单向耦合效率为57.8%,基本满足光波导芯片的耦合需求,上反射损耗仅为0.29%,在优化后的结构上加入衬底金属反射镜后,器件的耦合效率能达到79.5%,这个结果对器件的实际制作具有一定的参考价值。同时该器件还兼具氮化硅材料插入损耗低、热稳定性好、制作公差大对相位误差容忍度高的优点,通过引入光源中心的未对准偏差,仿真计算得到造成器件的1 dB损耗在垂直于波导方向方向上的偏移量约为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$,在平行于波导方向上的偏移量 $>|\pm 3| \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] 周培基,李智勇,俞育德,等. 硅基光子集成研究进展[J]. 物理学报,2014,63(10):1-8.
- [2] Romero-García Sebastian, Merget Florian, Zhong Frank, et al. Silicon nitride CMOS-compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths[J]. Optics Express,2013,21(12):14036-14046.
- [3] Chen Hongda, Zhang Zan, Huang Beiju, et al. Progress in complementary metal-oxide-semiconductor silicon photonics and optoelectronic integrated circuits[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(12):121001.
- [4] 王军锋,李跃进,杨银堂. 光互连的研究与新进展[J]. 激光与光电子学进展,2005,42(1):16-21.
- [5] Litvik J, Dolnak I, Dado M. Waveguide silicon nitride grating coupler[C]. //Proceedings of the Spie,2016.
- [6] 邢艳红,孔孟菲,郑旭涵,等. 石墨烯/Cu基复合材料的制备及摩擦学性能研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2017,30(3):56-58.
- [7] Spencer D T, Bauters J F, Heck M J, et al. Integrated waveguide coupled Si₃N₄ resonators in the ultrahigh-Q regime[J]. Optica, 2014, 1:153-157.
- [8] Xuan Yi, Liu Yang, Varghese Leo T, et al. High-Q silicon nitride microresonators exhibiting low-power frequency combinitiation[J]. Optica,2016,3:1171-1180.
- [9] 杨彪,李智勇,肖希,等. 硅基光栅耦合器的研究进展[J]. 物理学报,2013,62(18):184214.
- [10] Maire Guillaume, Vivien Laurent, Sattler Guillaume, et al. High efficiency silicon nitride surface grating couplers[J]. Opt Express,

- 2008,16;328-333.
- [11] Sacher W D, Huang Ying, Liang Ding, et al. Ultra-efficient and broadband dual-level Si_3N_4 -on-SOI grating coupler[J]. *Lasers & Electro-optics*, 2014(1);1-2.
- [12] Hong J, Yokoyama S. Efficient silicon nitride grating coupler with a dielectric multilayer reflector[C]. // *Microoptics Conference*, 2018.
- [13] 武华, 郭霞, 韩明夫. 高效垂直耦合的光栅耦合器设计[J]. *光子学报*, 2013, 42(7):777-781.
- [14] 王贝贝, 高雅静, 高丛丛, 等. 基于 MoS_2 可饱和吸收体的 Nd:GYSGG 激光器双波长调 Q 及锁模的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2017, 30(2);30-34.
- [15] 王文敏, 刘文, 马卫东. 小尺寸低折射率差硅基二氧化硅阵列波导光栅[J]. *光子学报*, 2011, 40(8);1137-1142.
- [16] Zhang H, Li C, Tu X, Song J, et al. Efficient silicon nitride grating coupler with distributed Bragg reflectors[J]. *Opt Express*, 2014, 22;21800-21805.
- [17] Gao D S, Zhou Z P. Nonlinear equation method for band structure calculations of photonic crystal slabs[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(16);163105-1-163105-3.
- [18] Chen X, Li C, and Tsang H K, Fabrication-tolerant waveguide chirped grating coupler for coupling to a perfectly vertical optical fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20;1914-1916.
- [19] Pond J and Kawano M. Virtual prototyping and optimization of novel solar cell designs[C]. // *Proc SPIE*, 2010.
- [20] Wang Shaoliang, Hao Ran. High performance apodized grating Coupler for 700 nm Si_3N_4 Waveguides[C]. // *International Conference on Optical Communications and Networks*, 2017.
- [21] Zhang Zanyun, Huang Beiju, Zhang Zan, et al. Integrated silicon photonic interconnect with surface-normal optical interface[J]. *Optics Communications*, 2016, 367;206-213.

High Efficiency and Low Upward Reflection Silicon Nitride Grating Coupler

ZHANG Zan-yun ZHU Hua LI Hong-qiang

(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract Silicon nitride material has the advantages of low insertion loss, good thermal stability, large tolerance of fabrication and strong misalignment tolerance, and has aroused widespread concern and great interest in research. As the interface between the photonic integrated circuit and the external fiber, grating coupler has been playing an increasingly important role in many applications, because of its excellent optical coupling performance, flexible placement and easy wafer-scale test. In this paper, a perfectly vertical grating coupler based on silicon nitride material is designed using the apodized grating structure. At the wavelength of 1 550 nm, the coupling efficiency of forward transmission is 79.5% with the substrate metal mirror, and the device without metal mirror can still achieve a coupling efficiency of 57.8%. Compared with the same type of silicon grating coupler, the upward reflection loss of our device is only 0.29%, which greatly decrease the crosstalk caused by the negative second-order reflection in the optical fiber. This design provides a good reference for the actual fabrication of silicon nitride grating coupler.

Key words optical interconnection; photonic integration technology; grating coupler; silicon nitride