

激光与光电子学进展

应用于锗硅材料的高效耦合光栅研究

黄强^{1,2}, 张意¹, 江佩麟¹, 余长亮³, 石浩天¹, 黄楚坤¹, 孙军强^{1*}¹华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;²邵阳学院电气工程学院多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000;³武汉飞思灵微电子有限公司, 湖北 武汉 430040

摘要 为实现单模光纤与锗硅材料器件的垂直耦合并提高耦合效率,设计了一种锗硅光栅耦合器。通过在硅衬底上增加金属反射层来提高光栅的耦合效率,并利用时域有限差分法仿真软件对锗硅光栅的刻蚀深度、刻蚀槽宽和光栅周期等结构进行了优化。然后,分析了有无金属反射层时的功率和电场分布情况,计算了光栅耦合效率。仿真结果表明,在最佳工作波长 1466 nm 处,有金属反射层均匀光栅得到的光栅最大耦合效率为 -1.34 dB,相比无金属反射层光栅,最大耦合效率提高了 9.4 dB,并且光在波导中的定向性得到了明显的改善。另外,为进一步提高耦合效率,在均匀光栅的基础上仿真设计了两步变迹光栅,相比均匀光栅最大耦合效率提高了 0.55 dB。同时,对耦合光栅中的金属层厚度、锗硅材料折射率和光栅尺寸三个方面行了工艺容差分析,结果表明,所设计的耦合光栅对工艺偏差具有较高的容忍度。最后,制作了锗硅耦合光栅器件,测试结果表明,在工作波长 1465 nm 处,获得了一 2.7 dB 的最大耦合效率。

关键词 集成光学; 锗硅材料; 垂直耦合; 光栅耦合器; 金属反射层

中图分类号 TN389

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1913002

Research on High-Efficiency Coupling Gratings Applied to Silicon Germanium Materials

Huang Qiang^{1,2}, Zhang Yi¹, Jiang Peilin¹, Yu Changliang³, Shi Haotian¹, Huang Chukun¹, Sun Junqiang^{1*}¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;²Hunan Province Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, School of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China;³Wuhan Fisilink Microelectronics Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, Hubei, China

Abstract In this paper, we propose a SiGe grating coupler to realize vertical coupling between the single-mode fiber and the SiGe on-chip device. To improve the coupling efficiency of the SiGe grating, we adopted a metal layer as the reflecting mirror on the chip backside, and we optimized the structure, including the etch depth, etch groove width, and grating period, using the finite-difference time-domain method. We computed the grating coupling efficiency by analyzing the power and electric field distribution with and without the metal reflective layer. The simulation results show that the maximum coupling efficiency of the uniform grating is increased by 9.4 dB compared with the case without a metal layer, and its directionality is significantly improved. The maximum coupling efficiency of the SiGe grating obtained by simulation optimization is -1.34 dB at 1466 nm. Furthermore, we simulated and designed a two-step apodized grating based on the uniform grating, which further increased the maximum coupling efficiency by 0.55 dB compared with the uniform. Additionally, we performed a tolerance analysis on the coupled grating, including the thickness of the metal layer, the refractive index of the SiGe material, and the size of the grating. The analysis results show that the SiGe grating has a high tolerance for process deviations. Also, we fabricated a SiGe coupling grating, and the test results show that the maximum coupling efficiency of -2.7 dB is obtained at 1465 nm.

Key words integrated optics; SiGe material; vertical coupling; grating coupler; metal reflective layer

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-06-30; 录用日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61875063)、湖北省重点研发计划项目(2021BAA002)、邵阳市科技计划项目(2021004ZD)

通信作者: *jqsun@hust.edu.cn

1 引言

目前,端面耦合和垂直耦合^[1]是光纤与片上器件耦合的两种方式。端面耦合是将单模光纤拉锥成透镜光纤,利用模斑转换器将片上波导的模场扩大,使光纤端与片上波导的模场直径相匹配,最终完成光纤与波导之间光的耦合。垂直耦合主要是基于光栅耦合器,为形成周期性光栅结构在片上器件端刻蚀出周期性凹槽,利用布拉格衍射效应使得光纤输出的光定向衍射到波导,从而完成器件和光纤的耦合。近年来,为实现单模光纤和锗硅波导之间的耦合,大部分研究工作使用的是端面耦合,由于高质量端面的锗硅波导难以制作^[2],这种耦合方式会引入较大的损耗,而且目前关于锗硅光栅耦合器的设计研究非常少。从本质上来看,垂直耦合有着巨大的优势,一方面光栅可以设置在片上表面的任何位置,另一方面不需要打磨抛光波导端面,这样既可以增加芯片设计的灵活性又可以实现晶圆级的光学测试和芯片量产。

相对于端面耦合,光栅耦合器的尺寸较大,在耦合时它对光纤的摆放位置有较大的容差。为获得偏振分束器^[3-4],将光栅耦合器^[5-6]制作成二维结构。光栅耦合器在绝缘体上硅(SOI)材料平台上已经取得了重大的突破^[7-10],但在锗硅合金半导体材料中光栅耦合器仍然是一个较大的挑战。另外,在中红外应用中,锗材料的光栅耦合器也取得了一定的成果^[11-13],但是耦合的效果还不是特别的理想。锗硅量子阱调制器近年来也得

到了很大的发展^[14-18],在进行光学测试时一般采用端面耦合方式,大大限制了光纤与器件的耦合效率,因此有必要设计一个与锗硅材料兼容的高效的光栅耦合器来集成器件。

本文提出了一种硅基锗硅合金波导的高效耦合光栅。为避免硅衬底和锗硅合金的折射率差小而导致光泄漏,在衬底增加了金属反射层来提高耦合效率。在时域有限差分法(FDTD)软件中对所设计光栅的周期、刻蚀深度和刻蚀槽宽度等参数进行了仿真优化。并对比分析了有无金属反射层时光功率分布和电场分布情况,同时也计算了有无金属反射层时的耦合效率。为最大化垂直耦合效率,在均匀光栅的基础上,改进设计了一种变迹锗硅耦合光栅,并对其进行了容差分析。本文主要计算了光栅尺寸、锗硅合金折射率和金属层上衬底厚度三个方面的工艺偏压对耦合效率的影响,同时也制作了器件并进行了耦合效率的测试。

2 锗硅光栅的设计与仿真

本文所提出的锗硅耦合光栅如图1所示。 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Ge}_{0.85}\text{Si}_{0.15}$ 合金层沉积生长在硅衬底上,锗硅波导的刻蚀深度设计为 $660\ \text{nm}$ 。为保护器件和提高耦合效率,二氧化硅覆盖层包裹了锗硅光栅。由于硅衬底和锗硅合金之间的折射率差很小,导致大部分光纤中的光散射到衬底中。针对这一问题,本文设计了底部金属层来充当反射镜,对泄漏到衬底的光重新定向,将散射到衬底的光反射回光栅,从而提高耦合效率。为便

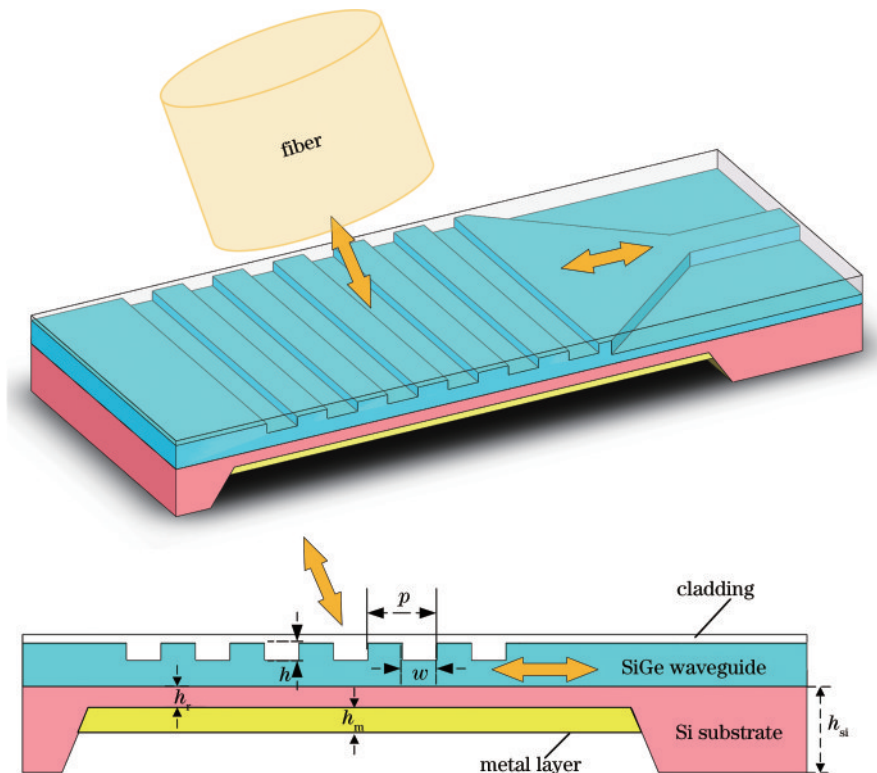


图1 锗硅光栅耦合器的结构与横截面示意图

Fig. 1 Structure and cross-section of SiGe grating coupler

于工艺制作和互补金属氧化物半导体 (COMS) 兼容^[19], 金属反射层的窗口设计在基片的背部, 方便通过电子束蒸镀在腐蚀槽处沉积一层金属。

光栅耦合器满足布拉格条件, 表示为

$$k_m \sin \theta + m k_{gc} = \beta, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

式中: $k_m = 2\pi n_c / \lambda_0$ 是入射光的波矢; λ_0 是自由空间波长; n_c 是覆盖层材料的折射率; θ 是光纤与垂直方向的夹角; m 代表衍射级数; $k_{gc} = 2\pi / p$ 是光栅矢量; p 是光栅周期; $\beta = 2\pi n_{eff} / \lambda_0$ 是光栅中光场模式的传播常数; n_{eff} 是光栅的有效折射率。一般情况下, 仅当衍射级次 $m = 1$ 时, 光栅具有最大的耦合效率。

在利用 FDTD 数值仿真软件对光栅进行仿真优化时, 定义监视器探测到的波导中的基模光功率与输入光功率的比值为光栅的耦合效率, 网格精度设置为 20 nm。选择模场直径为 10.4 μm 的高斯光源模拟单模光纤的输入, 为避免较强的反射, 光源与垂直方向的夹角设置为 9° 。本文设计的光栅基于锗硅多量子阱材料, 因此其工作波长选择光通信中的 S 波段和 E 波段。另外, 在波导器件中横电 (TE) 模式更为常见, 因此选择在 TE 模式下对光栅进行优化。

普通均匀光栅耦合效率主要由光栅周期 p 、刻蚀深度 h 和刻蚀槽宽度 w 三个方面决定, 一般情况下刻蚀深度的影响最大。为了避免光栅区域与光波导交界面处的背向反射, 刻蚀深度又不能太大。另一方面, 为了保证耦合效率, 刻蚀深度又不能太小。从这里可以看出, 相对于光栅周期和刻蚀槽宽度, 刻蚀深度对光栅的耦合效率影响更大, 也就是说, 在一定的刻蚀深度下, 能够在较大光栅周期和刻蚀槽宽度范围内获得相对较高的光栅耦合效率。接着, 在 SiO_2 覆盖层厚度为 100 nm, 光栅周期为 780 nm、周期数为 18, 以及刻蚀槽宽度为 400 nm 的条件下, 输入高斯光源位置调整到耦合效率最大的条件下, 仿真研究了刻蚀深度对光栅耦合效率的影响。最后, 得到刻蚀深度、工作波长和耦合效率三者之间的关系如图 2 所示。可以发现, 当光栅刻蚀深度为 370 nm、工作波长为 1470 nm 时, 光栅具有

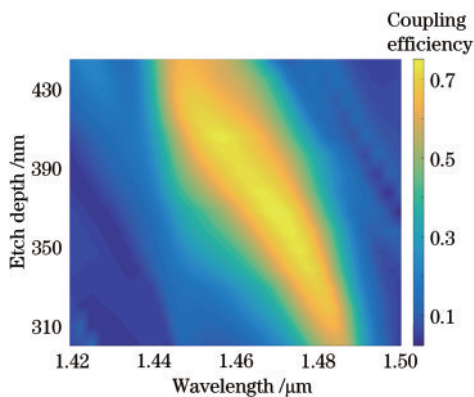


图 2 耦合效率、刻蚀深度和工作波长之间的关系

Fig. 2 Relationship between coupling efficiency, etch depth, and operating wavelength

75% 的最大耦合效率。综合考虑工艺制作偏差和 3 dB 带宽可知, 刻蚀深度确定为 380 nm, 在工作波长为 1466 nm 时, 光栅最大耦合效率为 73%。

在确定光栅最佳刻蚀深度后, 本文用扫描的方式优化了光栅周期与刻蚀深度。最终锗硅耦合光栅的最佳参数如下: 光栅周期为 780 nm、刻蚀槽宽度为 400 nm、刻蚀深度为 380 nm。锗硅光栅在最佳参数下继续仿真了有无金属反射层的耦合效率谱, 结果如图 3 所示。从图 3 可以发现: 当无金属反射层时, 在工作波长为 1460 nm 处具有最大的耦合效率, 但仅为 -10.73 dB; 当有金属反射层时, 在工作波长为 1466 nm 波长处的最大耦合效率能达到 -1.34 dB, 相对无金属反射层耦合效率提高了 9.4 dB。这是由于泄漏到衬底的散射光能量又被金属反射层重新反射回波导, 从而提高了光栅的耦合效率。

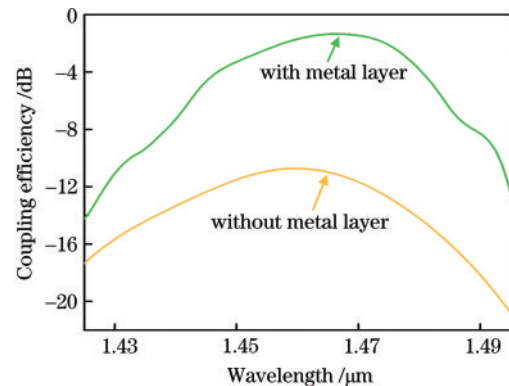


图 3 锗硅光栅在有无金属反射层情况下的耦合效率谱

Fig. 3 Coupling efficiency spectra of SiGe grating with and without metal reflective layer

另外, 通过计算发现, 当有金属层时, 光栅的 3 dB 带宽为 36 nm, 这是由于锗硅波导的高度更高、锗硅材料有效折射率更大而引起光栅 3 dB 带宽小于 SOI 平台上的硅光栅。同时, 在最佳锗硅光栅参数情况下, 对有无金属反射层时的光功率和电场分布情况进行了仿真分析, 其仿真结果如图 4 所示。可以发现, 在底部有金属反射层时光栅耦合器的定向性显著提高, 并且输出光场很好地限制在波导中。

对于均匀光栅的辐射场轮廓沿光栅结构的传播方向呈指数性衰减, 与单模光纤中的高斯场存在较大的模式失配, 从而导致二者耦合时效率降低。本文考虑通过非均匀结构增加光纤和光栅耦合器之间的模场重叠, 来进一步提升耦合效率。在锗硅光栅中, 通过改变周期和每个刻蚀槽的宽度形成变迹光栅, 从而形成类高斯的衍射场, 然后与光纤中的高斯场匹配。但为了简单化光栅制作工艺, 在仿真中每个光栅齿的刻蚀深度还应该保持不变。之前在 SOI 材料平台上已经证实两步变迹方式^[20]与连续变迹在提高光栅模场匹配方面的效果比较接近, 因此设计了两步变迹光栅。另外, 为降低实际器件制作成本,

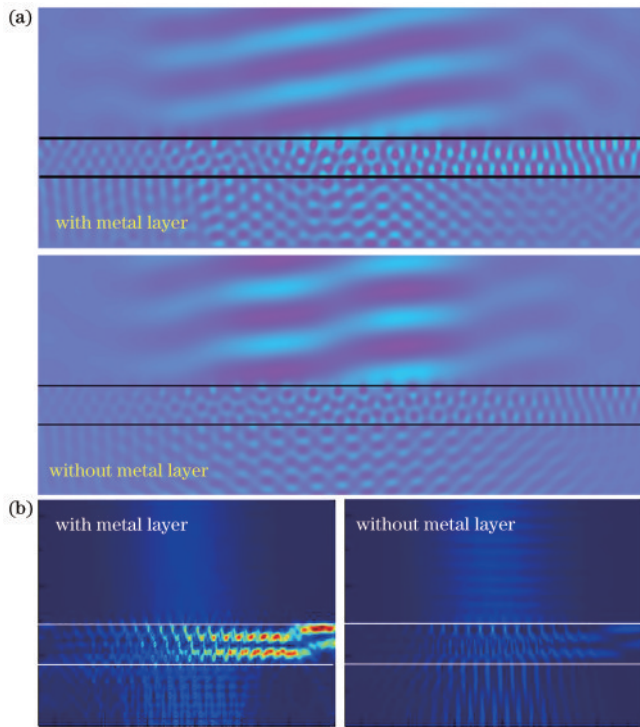


图4 锗硅光栅在有无金属反射层情况下的仿真结果。(a)仿真电场分布;(b)仿真光功率分布

Fig. 4 Simulation results of SiGe grating with and without metal reflective layer. (a) Simulated electric field distribution; (b) simulated optical power distribution

仿真时结构尺寸应与目前深紫外光刻工艺兼容。变迹光栅包括两个部分:第一部分由4个光栅(周期为690 nm、刻蚀槽宽度为100 nm)组成;第二部分由14个光栅(周期为780 nm、刻蚀槽宽度为400 nm)组成。接下来,仿真分析了均匀光栅和两步变迹光栅的耦合效率谱,其结果如图5所示。可以发现,在工作波长为1466 nm时,两步变迹光栅的耦合效率为-0.79 dB,其对应的3 dB带宽仍然为36 nm。从耦合效率来看,相对于均匀光栅,变迹光栅的最大耦合效率提高了0.55 dB。

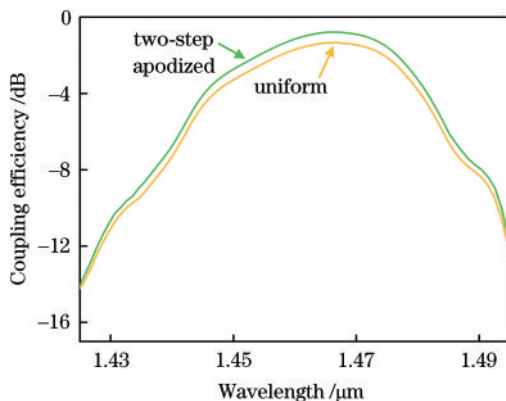


图5 均匀锗硅光栅与两步变迹锗硅光栅的耦合效率谱
Fig. 5 Coupling efficiency spectra of uniform SiGe gratings and two-step apodized SiGe grating

3 仿真参数与工艺容差分析

考虑到实际材料的生长以及光栅制作过程中结构参数与仿真参数之间的偏差,会导致有效折射率、谐振波长和耦合度等参数的变化而引起光栅实际耦合效率的变化,因此有必要对仿真设计的锗硅光栅耦合器进行容差分析。由于均匀光栅和变迹光栅对工艺容差的分析比较类似,所以本文仅对均匀光栅中工艺容差进行了分析计算。

首先,分析了锗硅波导和金属层之间硅衬底厚度的工艺误差。仿真中设计的硅衬底厚度为2 μm,但实际的工艺很难控制这个厚度。由于金属反射形成的光场与硅衬底在波导层衍射光场会发生干涉作用,从而波导和金属层之间的衬底厚度会严重影响光栅的耦合效率。所以必须对锗硅光栅在工作波长为1466 nm处的耦合效率和衬底厚度之间的关系进行分析,结果如图6所示。可以发现,衬底厚度和光栅耦合效率之间呈现周期性变化,相消干涉发生在波谷而相长干涉发生在波峰。从图6还可以观察到,耦合效率增加1 dB和3 dB所对应的硅衬底范围分别为125 nm和163 nm。这个数值远大于目前一般工艺刻蚀深度误差,所以仿真设计的锗硅光栅对硅衬底厚度偏差具有很高的容忍度。

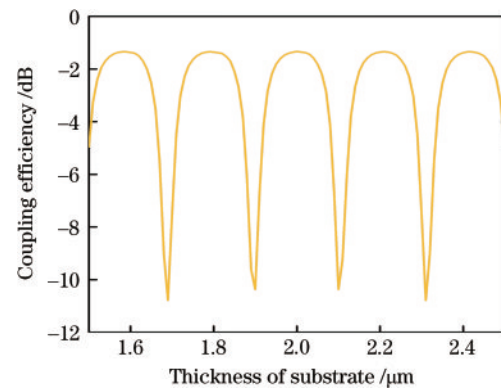


图6 锗硅光栅耦合效率与硅衬底厚度之间的关系
Fig. 6 Relationship between the coupling efficiency of SiGe grating and the thickness of silicon substrate

紫外曝光是制作锗硅光栅耦合器的一道工艺,由于其临近效应会不可避免地引起光栅尺寸发生偏差,这个偏差主要是体现在刻蚀槽宽度的变化上。本文仿真分析了不同刻蚀槽宽度偏差下的光栅耦合效率的变化情况,如图7所示。从图7可以发现,当刻蚀槽宽度稍微增加时,耦合光栅的谐振波长会蓝移,即向短波长移动,并且3 dB带宽也有轻微下降。另外,光栅耦合器的最高效率会随刻蚀槽宽度的减小而稍微降低,但3 dB带宽会稍微增加。总的来说,根据仿真结果可知,当刻蚀槽宽度在±15 nm范围内变化时,锗硅光栅的耦合效率变化并不大。目前流行的工艺尺寸都能控制在10 nm以内^[21],因此本文设计的锗硅光栅对紫外曝光工艺也有较大的容忍度。

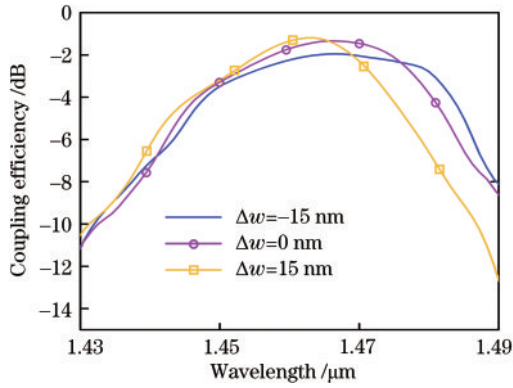


图 7 锗硅光栅刻槽宽度偏差与耦合效率之间的关系
Fig. 7 Relationship between the etched groove width deviation and coupling efficiency of SiGe grating

锗硅合金材料的生长一般通过气相沉积工艺来完成,但气相沉积的不稳定性可能造成锗组分含量相对于仿真参数存在一定偏差。根据报道可知,这种锗组分偏差通常在 $-2\% \sim 4\%$ 之间,将导致锗硅合金材料有效折射率发生 ± 0.03 以内的变化^[22]。基于此,仿真分析了不同有效折射率情况下光栅耦合器的效率谱,结果如图 8 所示。可以发现,谐振波长会随着有效折射率的增加而红移,反之,折射率减小会引起谐振波长

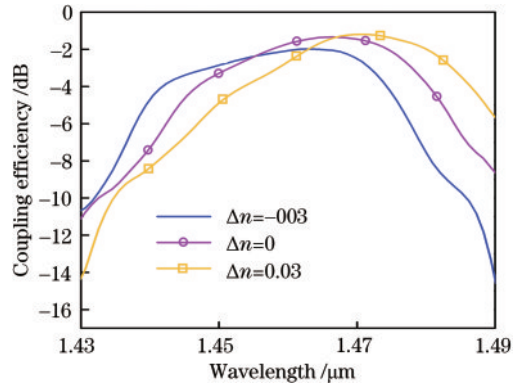


图 8 锗硅光栅耦合效率与材料有效折射率偏差关系
Fig. 8 Relationship between the coupling efficiency and material effective refractive index deviation of SiGe grating

蓝移。根据这个结果可知,光栅耦合器的耦合效率与仿真设计情况下的最大效率比较接近,二者之间的差异在允许范围之内。

4 器件测试

在厚度 $h_{si} = 520 \mu\text{m}$ 硅衬底上制作了所设计的光栅耦合器。光栅器件的扫描电镜(SEM)图如图 9(a)和(b)所示。器件制作完后锗硅均匀光栅的周期为

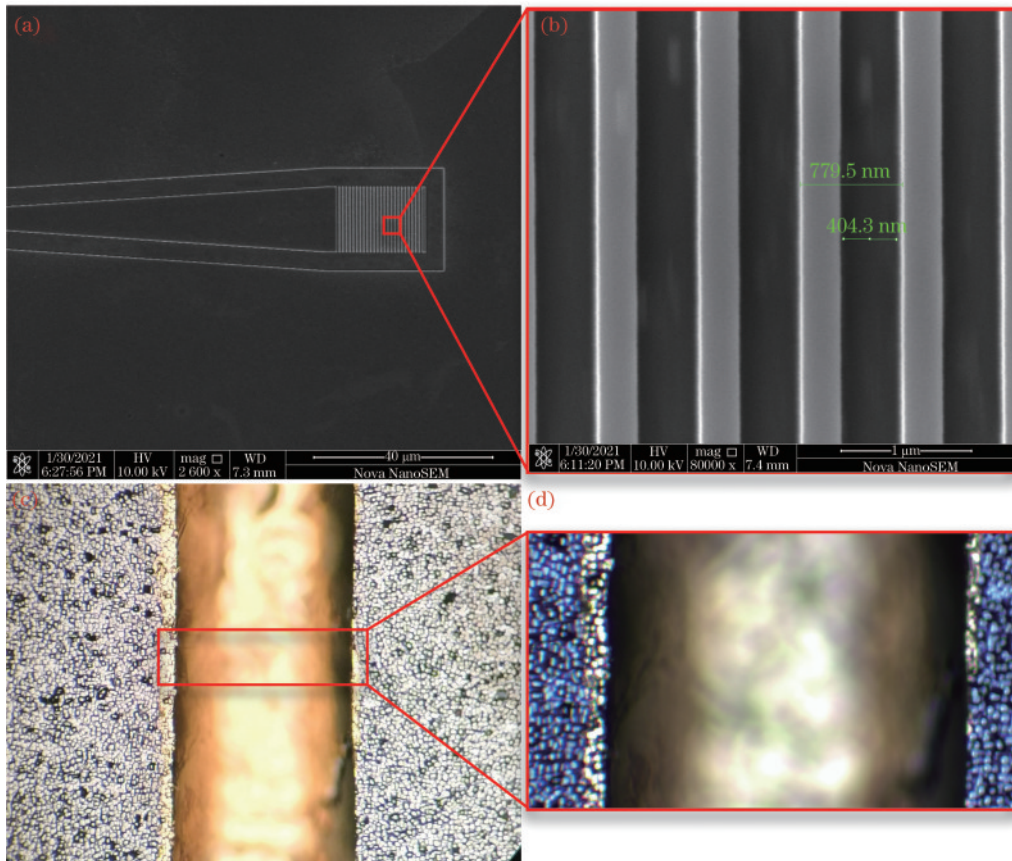


图 9 测试结果。(a)锗硅光栅的 SEM 图;(b)耦合光栅局部放大 SEM 图;(c)基片背部金相显微镜图;(d)底部金属反射层局部放大金相图
Fig. 9 Test results. (a) SEM image of SiGe grating; (b) partially enlarged SEM image of coupled grating; (c) metallographic microscope image of chip backside; (d) partially enlarged metallographic image of bottom metal reflective layer

779.5 nm, 刻蚀槽的宽度为 404.3 nm, 刻蚀深度为 385 nm, 这些尺寸与之前的仿真优化结构相接近。另外, 锗硅波导的宽度和高度分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $640\ \text{nm}$ 。为更准确地测取锗硅光栅耦合效率, 制作了多种不同长度的波导以便评估波导的传输损耗。锥形波导的宽度和长度分别为 $15\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$, 根据仿真结果可知, 其单端的模板转换损耗 $< 0.22\ \text{dB}$ 。图 9(c) 和 (d) 为金属反射层的金相图。从图 9(d) 可以看出, 由于没有打磨, 其背面较为粗糙。金属层厚度以及材料类型等都对耦合光栅效率影响不大。为匹配工艺制作, 在基片背部的刻蚀槽蒸镀了厚度为 $10\ \text{nm}/120\ \text{nm}$

($h_m=130\ \text{nm}$) 的铬/金 (Cr/Au) 金属层, 通过电子束蒸发 (EBE) 精确控制厚度。另外, 由于工艺条件限制, 实际制作的锗硅波导和金属层之间硅衬底厚度 $h_r=20\ \mu\text{m}$ 。

首先对锗硅耦合光栅进行了通光测试, 测试装置图如图 10 所示。其中, 锗硅耦合光栅的两端都用单模光纤进行耦合光的输入和输出。利用偏振控制器将激光器的输出调至 TE 偏振光, 并将其入射到光栅上, 最后利用光功率计来探测出射光。为了获得光栅耦合器的最大耦合效率, 使用了精密光纤调节架来调节耦合光纤的偏转和空间位置。

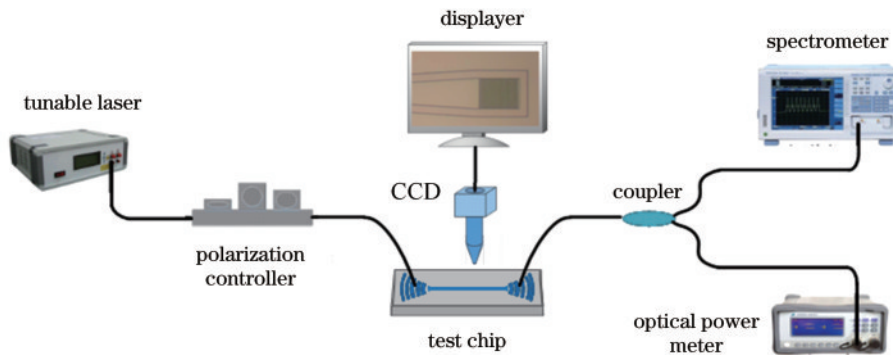


图 10 测试装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of test device

实验得到的锗硅均匀耦合光栅 TE 模式的耦合效率结果如图 11 所示。从图 11 可以发现, 在 $1465\ \text{nm}$ 工作波长处, 锗硅光栅的最大耦合效率为 $-2.7\ \text{dB}$ 。由于底部金属反射层粗糙而发生散射以及基片背面的深刻蚀槽不够光滑, 实验耦合效率比仿真结果小 $1.36\ \text{dB}$, 但二者的最佳工作波长几乎一致。受可调谐激光器波长范围的限制, 无法准确测量器件的 $3\ \text{dB}$ 带宽, 但从图 11 可知, $3\ \text{dB}$ 带宽明显大于 $40\ \text{nm}$ 。

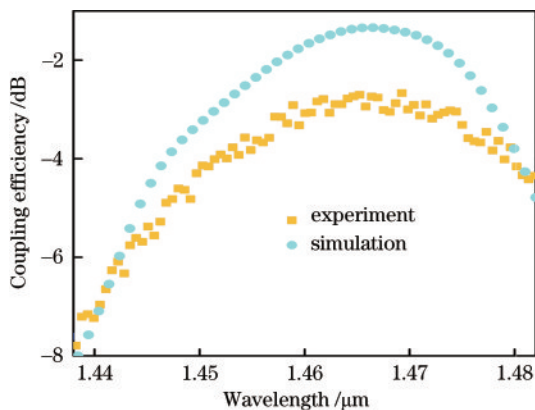


图 11 实验测试与仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of experimental test and simulation results

5 结 论

针对光纤与硅基集成锗硅材料器件的耦合效率问

题, 本文研究了一种高效的锗硅光栅耦合器。为了弥补硅衬底与锗硅合金之间的折射率差而引起的光泄漏, 在基底增加金属反射层来提高锗硅光栅的耦合效率。首先, 利用 FDTD 仿真软件对光栅周期、刻蚀深度、刻蚀槽宽度等参数进行了优化计算, 得到了最优光栅参数 (光栅周期为 $780\ \text{nm}$ 、刻蚀深度为 $380\ \text{nm}$ 和刻蚀槽宽度为 $400\ \text{nm}$)。在最优参数和 $1466\ \text{nm}$ 的工作波长情况下, 获得了光栅最大耦合效率为 $-1.34\ \text{dB}$ 。与无金属反射层相比, 光栅耦合效率提高了 $9.4\ \text{dB}$, 并且光的定向性也得到了明显的改善, 输出光场能很好地被波导限制。考虑到单模光纤高斯场与光栅衍射场之间的匹配度不高, 本文设计了两步变迹光栅来进一步提高锗硅光栅的耦合效率。通过再次优化可知, 相比均匀光栅, 两步变迹光栅将最大耦合效率提高了 $0.55\ \text{dB}$ 。考虑到工艺制作的误差, 从波导和金属反射层之间衬底厚度、光栅几何尺寸、锗硅合金有效折射率三个方面对所设计的耦合光栅行了容差分析, 结果表明, 所设计的锗硅耦合光栅对工艺偏差具有较高的容忍度。最后, 制作了锗硅耦合光栅器件, 测试结果表明, 底部有金属反射层的光栅其最大的耦合效率约为 $-2.7\ \text{dB}$, 并且 $3\ \text{dB}$ 带宽大于 $40\ \text{nm}$ 。

参 考 文 献

- [1] 田苗, 瞿敏妮, 乌李瑛, 等. 用于垂直耦合的非对称光栅耦合器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021,

- 58(5): 0500004.
- Tian M, Qu M N, Wu L Y, et al. Progress on asymmetrical grating couplers for vertical coupling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500004.
- [2] Ramirez J M, Vakarin V, Gilles C, et al. Low-loss Ge-rich $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$ waveguides for mid-infrared photonics[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 105-108.
- [3] Taillaert D, Chong H, Borel P I, et al. A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(9): 1249-1251.
- [4] Wang Z C, Tang Y B, Wosinski L, et al. Experimental demonstration of a high efficiency polarization splitter based on a one-dimensional grating with a Bragg reflector underneath[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(21): 1568-1570.
- [5] 刘萌, 郑焯, 刘文斐, 等. 基于亚波长线光栅的垂直光栅耦合器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1705002.
- Liu M, Zheng X, Liu W F, et al. Design of vertical grating coupler based on sub-wavelength line gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1705002.
- [6] 朱国锋, 戴圳镛, 居学尉, 等. 基于逆向设计的片上太赫兹解复用器和光栅耦合器[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0913001.
- Zhu G F, Dai Z R, Ju X W, et al. On-chip terahertz demultiplexer and grating coupler based on reverse design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0913001.
- [7] Roelkens G, van Thourhout D, Baets R. High efficiency Silicon-on-insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11622-11630.
- [8] Li C, Zhang H J, Yu M B, et al. CMOS-compatible high efficiency double-etched apodized waveguide grating coupler[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7868-7874.
- [9] Halir R, Cheben P, Schmid J H, et al. Continuously apodized fiber-to-chip surface grating coupler with refractive index engineered subwavelength structure[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3243-3245.
- [10] Alonso-Ramos C, Cheben P, Ortega-Monux A, et al. Fiber-chip grating coupler based on interleaved trenches with directionality exceeding 95[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5351-5354.
- [11] Nedeljkovic M, Penadés J S, Mitchell C J, et al. Surface-grating-coupled low-loss Ge-on-Si rib waveguides and multimode interferometers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(10): 1040-1043.
- [12] Kang J, Cheng Z Z, Zhou W, et al. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane germanium waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2094-2097.
- [13] Radosavljevic S, Kuyken B, Roelkens G. Efficient 5.2 μm wavelength fiber-to-chip grating couplers for the Ge-on-Si and Ge-on-SOI mid-infrared waveguide platform[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19034-19042.
- [14] Gao J F, Zhou H, Jiang J L, et al. Design of low bias voltage Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator at 1550 nm[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(3): 035317.
- [15] Gao J F, Sun J Q, Jiang J L, et al. Design and analysis of electro-absorption modulators with uniaxially stressed Ge/SiGe multiple quantum wells[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10874-10884.
- [16] Gao J F, Sun J Q, Jiang J L. Demonstration of biaxially tensile-strained Ge/SiGe multiple quantum well (MQW) electroabsorption modulators with low polarization dependence[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(14): 4355-4363.
- [17] Zhang Y, Sun J Q, Gao J F. Theoretical analysis of electro-refractive index variation in asymmetric Ge/SiGe coupled quantum wells[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30032-30042.
- [18] Zhang Y, Gao J F, Qin S B, et al. Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well modulators[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(6): 1765-1773.
- [19] Zaoui W S, Rosa M F, Vogel W, et al. Cost-effective CMOS-compatible grating couplers with backside metal mirror and 69% coupling efficiency[J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): B238-B243.
- [20] Benedikovic D, Cheben P, Schmid J. High-efficiency single etch step apodized surface grating coupler using subwavelength structure[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): L93-L97.
- [21] Xu D X, Schmid J H, Reed G T, et al. Silicon photonic integration platform: have we found the sweet spot? [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 189-205.
- [22] Erko A, Zizak I. Hard X-ray micro-spectroscopy at Berliner elektronenspeicherring für synchrotronstrahlung II[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2009, 64(9): 833-848.