

文章编号: 1001-3806(2017)04-0479-05

硅基光栅耦合封装结构的优化设计

宋曼谷^{1,2,3}, 曹立强^{1,2,3*}, 刘丰满^{2,3}, 薛海韵^{2,3}, 孙瑜^{2,3}, 李宝霞⁴

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 3. 华进半导体封装先导技术研发中心有限公司, 无锡 214135; 4. 西安微电子技术研究所, 西安 710065)

摘要: 为了提高硅基光栅耦合封装结构的耦合效率、增大容差范围, 对光栅耦合的结构特性进行了理论分析, 并采用时域有限差分法完成了仿真验证, 在不改变光栅参量的基础上, 对光栅耦合封装结构进行了改进, 仿真建立了一款光栅上方和光纤端面分别增加透镜的优化结构, 研究了影响耦合效率的因素。结果表明, 增加透镜后, 耦合效率有所增加, 角度容差和带宽都有一定的优化; 在衬底增加反射镜后, 对波长 1550nm 的光耦合效率提高至 73.809%。该研究结果可为光栅耦合的封装结构设计提供参考依据。

关键词: 光栅; 封装结构; 时域有限差分法; 耦合效率; 透镜

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.04.004

Optimized design of grating coupling packaging structure on silicon substrate

SONG Mangu^{1,2,3}, CAO Liqiang^{1,2,3*}, LIU Fengman^{2,3}, XUE Haiyun^{2,3}, SUN Yu^{2,3}, LI Baoxia⁴

(1. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 2. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China; 3. National Center for Advanced Packaging, Wuxi 214135, China; 4. Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the coupling efficiency and increase the tolerance range of grating coupling packaging structure on silicon substrate, the characteristics of grating coupling structure were analyzed theoretically and verified by simulation based on finite-difference time-domain method. After studying the main influence factors of the coupling efficiency, the basic grating coupling structure was improved without changing the parameters of the grating. A grating coupling structure with lenses was proposed. The results show that, after the lenses are added, coupling efficiency, angle tolerance and bandwidth are optimized through simulation. The coupling efficiency is increased to 73.809% with an incident wavelength in 1550nm when adding the reflectors on the substrate. The analysis results provide a reference for the design of the packaging structure of the grating coupling.

Key words: gratings; packaging structure; finite-difference time-domain method; coupling efficiency; lens

引言

基于摩尔定律的硅基微电子学蓬勃发展, 已经深刻改变了人们生产生活的各个方面。但随着特征尺寸的持续减小, 微电子产业能否按照摩尔定律前进正面临挑战^[1], 传统电互连的延迟、带宽、功耗和信噪问题也日益显著^[2-3]。与电互连相比, 基于硅光子的光互连具有大带宽、低延迟、低能耗、低串扰等优势^[4]。如今, 硅光子集成的光通信、光互连和光传感等新兴信息技术展现出广阔的应用前景, 正成为新一代信息系统

和网络的重要基础^[5]。

由于集成到芯片上的光源还没有很好的解决方案, 因此需要外接光源与波导实现耦合。光信号的输入输出成为硅光子集成的关键问题^[6], 波导和光纤的耦合封装也越来越受到关注。实现光纤和波导的高效耦合比较困难, 主要是因为光波导的厚度通常为 100nm~300nm, 导模限制在波导中心, 而单模光纤的直径为 10 μ m 左右, 光从光纤进入这种小尺寸的波导时, 两者之间模斑尺寸的失配会产生很大的插入损耗, 同时还会带来很高的封装消耗^[7]。常用的两种耦合方式为采用光纤轴向对准波导端面的端面水平耦合或者片上垂直耦合。

波导光栅是指在波导光路中, 波导的包覆层、波导层或衬底等介质的光学参量或波导尺寸的分布呈现规律性周期变化的光路系统, 主要是利用衍射光栅对光的衍射作用将光波耦合输入、输出光波导中。与端面

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (61306136)

作者简介: 宋曼谷 (1990-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光电耦合封装方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liqiangcao@ncap-cn.com

收稿日期: 2016-10-13; 收到修改稿日期: 2016-11-11

耦合相比,光栅耦合具有与互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺兼容,无需抛光,易于片上测试,没有严格的空间限制等优点,极大地增加了系统设计的灵活性,更适合大规模集成。但由于影响光栅耦合效率的因素有很多,实际结果中耦合效率并不高。因此有必要对光栅耦合结构进行改进,对光栅和光纤之间的封装形式进行优化。为了提高光栅耦合器的方向性,LAERE 等人通过对均匀光栅底部增加底部金反射镜获得模拟结果在 1564nm 波长处最高 72% 的耦合效率^[7]。2009 年德国的 BERND 等人采用可以利用一步套刻制作的全刻蚀结构^[8],设计了一种可应用于光纤和波导之间耦合的光栅耦合器,其模拟结果显示耦合效率达到 49% 左右。LI 等人在 2013 年设计了一种与 CMOS 兼容的高效率的波导光栅耦合器^[9],用于光纤与波导之间的耦合。在 2014 年还设计了一种水平光纤光栅耦合的封装方式^[10],通过将光纤端面研磨一定角度来将纤芯出射光反射,以一定角度入射光栅。本文中在对传统光栅耦合结构研究的基础上,以提高耦合效率,增大容差为目标,仿真建立了一款光栅光纤之间分别增加透镜的耦合封装结构。通过仿真可知,增加两个透镜后,耦合效率有一定增加,角度容差和带宽都有所改进。利用 Si/SiO₂ 组成的分布布喇格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)对衍射到衬底的光进行反射后,在 1550nm 的工作波长下耦合效率增加到 73.809%。研究结果对光栅耦合封装结构具有一定参考意义。文中只考虑 TE 偏振,这个结构只适用于有偏振控制的应用,例如互连和传感器^[11]。

1 结构模型和理论基础

光栅耦合基本结构如下^[11]:在 Si(折射率 $n = 3.44$)衬底上有一层 1 μm 厚的 SiO₂(折射率 $n = 1.47$)埋氧层, SiO₂ 层上面的波导层 Si 的厚度为 220nm。光栅周期 630nm,周期数为 20,光栅槽深 70nm,波导层上层为空气($n = 1$),光栅以占空比为 1:1 的矩形光栅沿水平方向均匀分布,光纤相对光栅平面垂直方向倾斜 10°左右。波导光栅在 x 方向的宽度与光纤模斑直径接近,远大于光波波长,因此在分析过程中,通常假定电磁场在 x 方向没有变化,因而可以将 3 维的波导光栅结构简化为如图 1 所示的 2 维问题来处理^[12]。本文中主要以输出型光栅耦合结构为主,由于互易性定理,光纤到光栅输入的耦合效率与光栅到光纤的输出耦合效率相等。光源从右边入射,设入射功率 P_{in} 归一化为 1。经过光栅时,部分光会被反射回到波导中(反射功率为 P_r),部分光会透过波导光栅进入后续的波

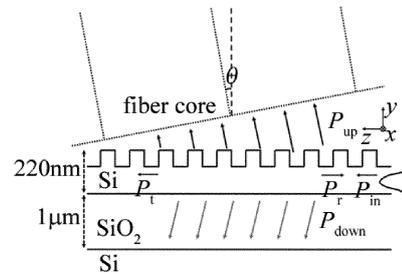


Fig. 1 2-D grating coupling structure

导中(透射功率为 P_t),其余的则被光栅衍射,或朝上进入上包层(向上功率为 P_{up}),或朝下进入埋氧层甚至硅衬底(向下功率为 P_{down})。为了得到波导与单模光纤的耦合效率,可以使用高斯函数来代替光纤中的模场,使用模斑直径代替折射率和芯层尺寸对于光纤模场的描述。光栅耦合结构与单模光纤的耦合效率表达式可表示为^[12]:

$$\eta = \left| \int_S \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{S} \right|^2 \quad (1)$$

式中, S 为光纤端面, \mathbf{E} 为衍射光场的模场分布, \mathbf{H}^* 为光纤归一化高斯模场分布, * 表示共轭。

一般造成耦合效率低的因素有三部分:一是光栅耦合的弱方向性,有 35% ~ 45% 的光即泄露到埋氧层或衬底,这部分可通过在底部增加金属反射镜或 DBR 反射镜来改善;二是由光栅布喇格条件^[13-14]可知,垂直光栅耦合结构通常利用光栅的 -1 阶衍射效应实现耦合,但由于同时存在较强的 -2 阶反射,使得一部分光(约 30%)返回至光波导,该现象可由光纤倾斜一定角度来消除,这个角度一般为 8° ~ 12°;三是在均匀的光栅耦合结构中,泄露因子 α 为常数,衍射光随传播距离 z 呈指数降低的模场分布与单模光纤高斯模场之间存在模式不匹配^[14],这部分约占 20%。因此理论

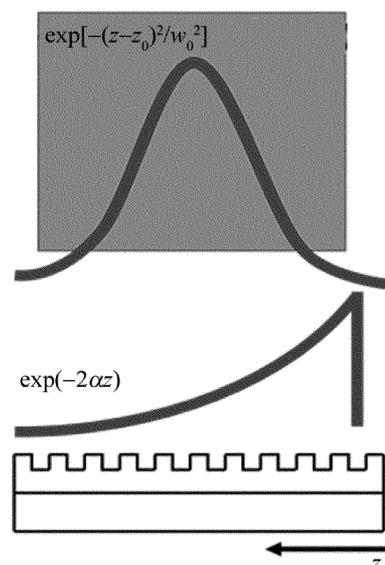


Fig. 2 Mode mismatch of grating diffraction light and optical end face light

上,均匀光栅结构理论上的最大耦合效率为 80%^[15],如图 2 所示。图中, z_0 表示基模高斯光束轴对称中心坐标, w_0 表示束腰半径。

2 仿真结果与优化

本文中采用 Rsoft-FullWave 软件对所设计的光栅结构进行仿真分析,该软件采用时域有限差分法^[16](finite-difference time-domain, FDTD),在结构模型中边界采用完美匹配层^[17](perfectly matched layer, PML)边界条件,避免寄生的反射效应。

2.1 基本光栅耦合结构建模

利用软件进行输出型光栅耦合结构建模,模型如图 3 所示。图 3 中,光源由右边输入,黑色边框为 PML 完美匹配层,消除边界反射;监测器代表光纤所在的位置,与光栅水平方向夹角为 θ ,用于监测光栅衍射的光强,并将其与光束直径为 $10.4\mu\text{m}$ 的高斯光束文件进行重叠积分计算,即得到光栅耦合结构与单模光纤的耦合效率。监测器监测的是整个衍射场,与所示宽度无关。仿真场 E_x 分布如图 4 所示。

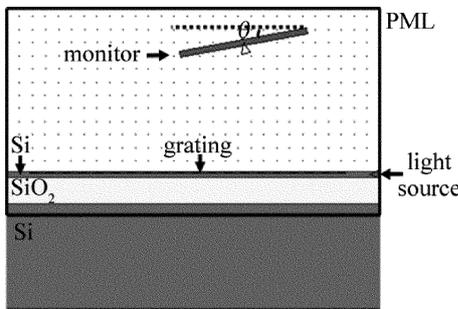


Fig. 3 Structure in Rsoft-FullWave software

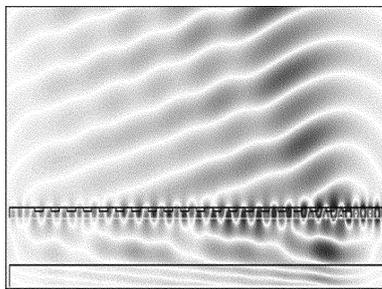


Fig. 4 Simulation field of E_x

2.2 光栅耦合封装结构优化

对于光栅耦合结构参数的优化,许多研究者给出了大量研究成果^[18],这里不对光栅参数做研究,重点集中在光栅与光纤的耦合封装方式的优化。为了得到较高的耦合效率,需要将光纤倾斜 10° 左右,这使得在测试过程中要不断的进行对准。同时,由于整个结构对外界的抗扰能力较差,输出光功率波动范围较大,不易于集成,因此设计一种高效的耦合封装结构很重要。随着透镜在光学领域的广泛使用,越来越多的研究面

向利用透镜来提高耦合效率^[19-20]。增加透镜的目的:一是为了减弱由光栅衍射的光进入空气后,因折射率不匹配引起的反射;二是为了集中衍射光,增大向上光的强度。同时,透镜的制作工艺已经比较成熟,如今市面上的光纤大多也是通过研磨、化学刻蚀、熔融或光刻等工艺处理成光纤微透镜。

图 5 为优化前后两种结构对比模型。图 5a 为模型 1,是基本光栅耦合结构;图 5b 为模型 2,是优化后的耦合结构。首先在光栅上方增加了透镜,透镜底面中心位置对准光栅衍射光最强点,透镜长轴为 $6\mu\text{m}$,短轴 $3\mu\text{m}$ 。由于增加透镜后,光栅衍射光的光斑直径会变小,使其与光纤高斯光场模式不匹配,因此在光纤端面也需要增加透镜减小光场模斑。在光纤端面增加的透镜为半球透镜,底面直径与光纤纤芯直径相等,两个透镜的折射率均为 1.5678,折射率参考了透镜制作材料。

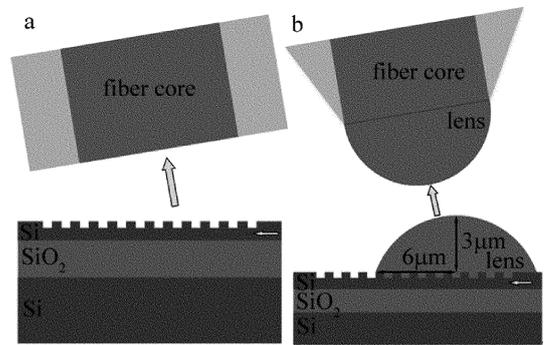


Fig. 5 Comparison of two grating coupling structures a—model 1; basic structure b—model 2; structure with lens

为了比较光场经过优化的模斑变化,经仿真,结果得到图 6。图 6a 为模型 1,图 6b 为模型 2,图中实线为

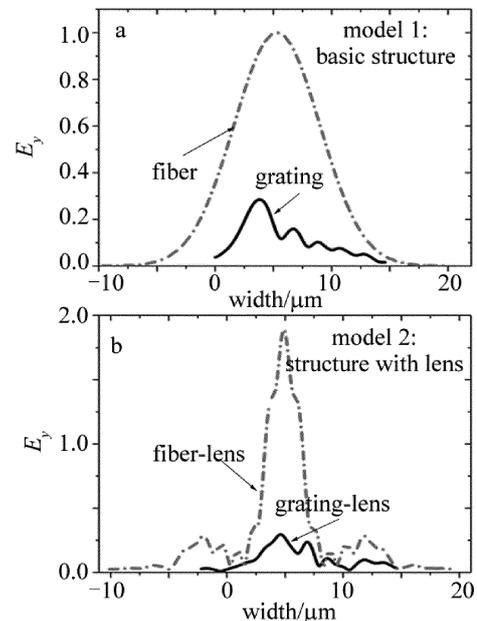


Fig. 6 Comparison between grating diffraction field and fiber end face mode

经过光栅后的光场分布,虚线为光纤端面的高斯光场分布。由图可知,经过优化的结构,光栅和光纤的出射光场模斑形状有所接近,模斑直径也有所缩小,光场强度也都有一定增加,但由于仍存在模式不匹配现象,耦合效率并没有大幅增加。

由于光纤倾斜角度和工作波长均对光栅的耦合效果有影响,因此在光栅基本参量不变的条件下,对光纤倾斜角度和工作波长进行了仿真,得到模型1和模型2的光栅耦合效率随光纤倾斜角度 θ 和工作波长变化的特性曲线,如图7和图8所示。模型1在 $\theta = 11^\circ$ 时的最大耦合效率为37.729%,模型2在 $\theta = 12^\circ$ 时的最大耦合效率为38.126%。同时可知,模型2的角度容差和带宽与模型1相比都有一定的增大。模型1在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 的角度范围内,最大耦合效率下降了13.5dB,模型2下降了1.93dB。这是由于增加透镜使得两边的光场模斑都有所减小,角度对准容差相应增大。而由于增加了透镜后,光栅的有效折射率发生改变,使得带宽有一定的扩展。

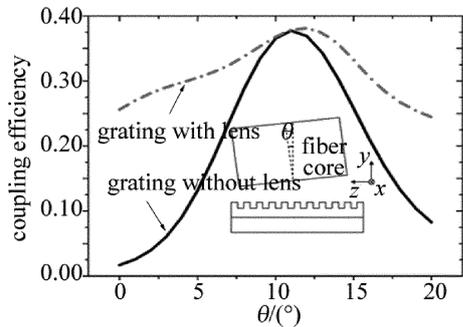


Fig. 7 Relationship between coupling efficiency and tolerance angle of model 1 and model 2

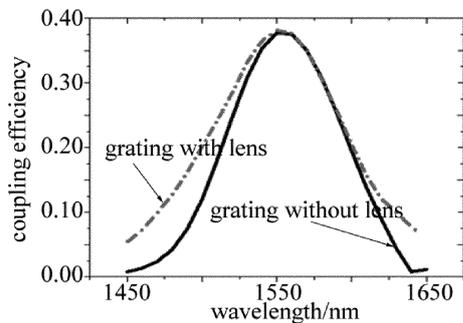


Fig. 8 Relationship between coupling efficiency and wavelength of model 1 and model 2

2.3 DBR 反射镜对光栅耦合结构的影响

为了降低耦合光栅向衬底方向的衍射损耗,在模型1和模型2的埋氧层下方增加 Si/SiO₂ 反射镜^[21],分别得到优化后的模型3和模型4,分别如图9a和图9b所示。DBR 反射镜一般由两种不同的光学材料交替构成,使得衬底呈现有效折射率周期性的变化。每一层界面会产生部分反射光,当反射层厚度达到工作

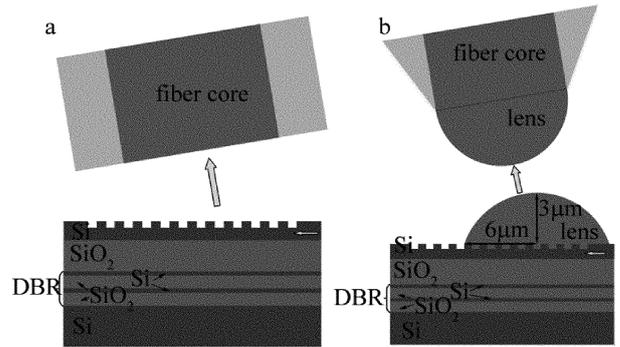


Fig. 9 Comparison of two grating coupling structures
a—model 3: basic structure + DBR b—model 4: structure with lens + DBR
波长的1/4时^[22],此时反射强度最大。

在工作波长为1550nm、光栅基本参量不变的条件下,对模型3和模型4进行仿真,图10为模型3和模型4仿真后的光纤倾斜角度容差对比曲线。由图可知,增加DBR反射镜后,模型3和模型4的耦合效率与模型1和模型2相比都有很大的提升,最佳光纤倾斜角度均减小了1°。模型3在 $\theta = 10^\circ$ 时的最大耦合效率为62.365%,模型4在 $\theta = 11^\circ$ 时的最大耦合效率为73.809%,比模型3增加了11.444%,这是由于增加DBR后,反射镜可对衍射至衬底方向的光进行高反射;同时,因为模型4增加了透镜,可以减少向上衍射光的损耗,使得耦合效率有了较大的增加。模型3在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 的角度范围内,最大耦合效率下降了9.15dB;模型2下降了2.78dB。图11所示为模型3和模型4的耦合效率随工作波长的变化曲线,在波长1540nm

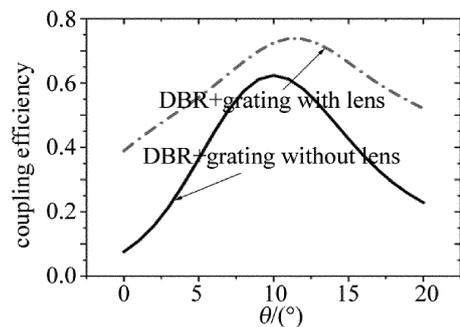


Fig. 10 Relationship between coupling efficiency and tolerance angle of model 3 and model 4

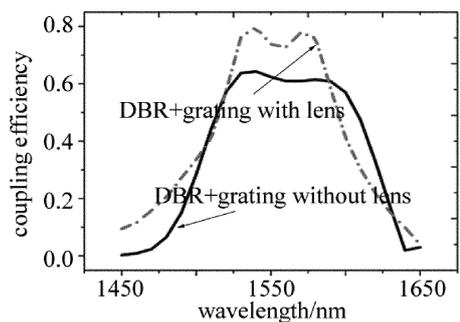


Fig. 11 Relationship between coupling efficiency and wavelength of model 3 and model 4

处,模型3达到最大耦合效率64.279%,模型4达到最大耦合效率79.75%,由图可知,与模型3相比,模型4的带宽并没有优化,但在1530nm~1580nm波长范围内,模型4的耦合效率要明显高于模型3。

表1显示了4种光栅耦合结构模型在工作波长1550nm时的耦合效率对比。由表可知,经过优化的模型2相较于模型1,耦合效率并没有明显的增加,但在

Table 1 Optimal angle and coupling efficiency of different grating coupling structures at working wavelength of 1550nm

model	comments	best angle/ (°)	best coupling efficiency/%
1	grating without lenses(basic structure)	11	37.729
2	grating with lenses	12	38.126
3	grating without lenses + DBR	10	62.365
4	grating with lenses + DBR	11	73.809

增加DBR反射镜后,模型4耦合效率得到了较大的提升。由此可知,增加DBR反射镜对加透镜的光栅耦合封装结构优化效果显著。

3 结论

采用Rsoft-FullWave软件对基本光栅耦合封装结构和优化结构进行了仿真。通过仿真可知,在光栅上方和光纤端面增加透镜,可以有效地增大光纤倾斜角度的容差范围和带宽,但对于耦合效率的增加贡献不大。在优化后的结构基础上增加DBR反射镜可大幅增加耦合效率,仿真得到在工作波长1550nm时73.809%的耦合效率,以及1540nm波长下79.75%的最高耦合效率,与基本结构仅增加DBR反射镜相比增加了15.471%。模拟结果显示,由于向上衍射光与光纤之间的光场模式不匹配限制了耦合效率,可进一步优化光栅耦合结构中的光栅和透镜,使得光栅衍射光模式更接近光纤模式,提高耦合效率。

参 考 文 献

- [1] KRISHNAMOORTHY A V, HO R, ZHENG X, *et al.* Computer systems based on silicon photonic interconnects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(7): 1337-1361.
- [2] MILLER D A B. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(6): 728-749.
- [3] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [4] MILLER D A B. Physical reasons for optical interconnection[J]. Optoelectron, 1997, 11(3): 155-168.
- [5] YANG B, LI Zh Y, XIAO X, *et al.* The progress of silicon-based grating couplers[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(18): 184214 (in Chinese).
- [6] BOLTEN J, HOFRICHTER J, MOLL N, *et al.* CMOS compatible cost-efficient fabrication of SOI grating couplers[J]. Microelectron Engineering, 2009, 86(4/6): 1114-1116.
- [7] LAERE F V, ROELKENS G, AYRE M, *et al.* Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic-waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(1): 151-156.
- [8] BERND S, PETROV A, EICH M. Optimized grating coupler with fully etched slots[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 11066-11076.
- [9] LI C, ZHANG H, YU M, *et al.* CMOS-compatible high efficiency double-etched apodized waveguide grating coupler[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 7868-7874.
- [10] LI C, CHEE K S, TAO J, *et al.* Silicon photonics packaging with lateral fiber coupling to apodized grating coupler embedded circuit[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24235-24240.
- [11] TAILLAERT D, LAERE F V, AYRE M. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(45): 6071-6077.
- [12] TAILLAERT D, BIENSTMAN P, BAETS R. Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides[J]. Optics Letters, 2004, 29(23): 2749-2751.
- [13] ROELKENS G, VERMEULEN D, SELVARAJA S, *et al.* Grating-based optical fiber interfaces for silicon-on-insulator photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 571-580.
- [14] VERMEULEN D, SELVARAJA S, VERHEYEN P, *et al.* High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible Silicon-On-Insulator platform[J]. Optics Express, 2010, 18(17): 18278-18283.
- [15] OROBTCHOUK R, LAYADI A, GUALOUS H, *et al.* High-efficiency light coupling in a submicrometric silicon-on-insulator waveguide[J]. Applied Optics, 2000, 39(31): 5773-5777.
- [16] YEE K S, CHEN J S. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(3): 354-363.
- [17] BIENSTMAN P, DERUDDER H, BESTS R, *et al.* Analysis of cylindrical waveguide discontinuities using vectorial eigenmodes and perfectly matched layers[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(2): 349-354.
- [18] FAN Sh W, ZHOU Q H. Analysis of diffraction characteristics of blazed gratings[J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 41-44 (in Chinese).
- [19] CHOU B C, VIS W, KHAN B, *et al.* Design and demonstration of micro-mirrors and lenses for low loss and low cost single-mode fiber coupling in 3-D glass photonic interposers[C]// IEEE Electronic Components & Technology Conference. New York, USA: IEEE, 2016: 497-503.
- [20] LU W L, ZHENG Y, ZHAO W L, *et al.* Analysis coupling between a laser and a single-mode fiber with a ball lens based on Monte Carlo method[J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 338-341 (in Chinese).
- [21] URA S, MURATA S, AWATSUJI Y, *et al.* Design of resonance grating coupler[J]. Optics Express, 2008, 16(16): 12207-12213.
- [22] SHEPPARD C J R. Approximate calculation of the reflection coefficient from a stratified medium[J]. Pure & Applied Optics Journal of the European Optical Society, 1995, A4(5): 665-669.