

# 基于等效折射率人工剪裁的宽带高效光栅耦合器

武 华<sup>1,2</sup> 韩明夫<sup>1</sup> 郭 霞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京工业大学电子信息与控制工程学院光子器件研究实验室, 北京 100124)

<sup>2</sup> 赣南师范学院物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000

**摘要** 利用不同占空比的亚波长结构剪裁光栅槽的等效折射率来改变光栅的衍射特性实现衍射输出光束与单模光纤之间的模式匹配, 通过优化埋氧化层厚度和集成底部金反射镜, 可以改善光栅耦合器弱的方向性, 从而设计出用于 SOI 波导与光纤之间高效率耦合的光栅耦合器。采用本征模展开方法, 模拟了光栅耦合器随剪裁的光栅槽等效折射率变化的相关特性, 在 SOI 波导和单模光纤之间对波长为 1550 nm 的光获得了最高 93.1% 的耦合效率, 3dB 带宽为 82 nm。

**关键词** 光栅; 等效折射率; 光栅耦合器; 耦合效率; 模式匹配

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1105001

## Broadband High-Efficiency Grating Coupler Based on the Tailored Artificial Equivalent Refractive Index

Wu Hua<sup>1,2</sup> Han Mingfu<sup>1</sup> Guo Xia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Photonic Device Research Laboratory, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

<sup>2</sup> College of Physics and Electronic Information, GanNan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

**Abstract** A high-efficiency grating coupler is designed to couple a planar waveguide and a single-mode fiber. An improvement in fiber coupling efficiency is obtained by using nonuniform diffraction gratings whose grating grooves consist of subwavelength structures with different duty cycle, which can better match the diffracted field profile to that of the Gaussian fiber mode. By optimizing the thickness of the buried oxide layer and integrating a gold bottom mirror, the directionality of SOI grating coupler can be increased. The coupler is optimized using eigenmode expansion-based simulations. A peak coupling efficiency of 93.1% at 1550 nm and 3 dB bandwidth of 82 nm are achieved.

**Key words** gratings; equivalent refractive index; grating coupler; coupling efficiency; mode matching

**OCIS codes** 050.2770; 050.2065; 050.6624

## 1 引 言

在低成本和低功耗的驱动下, 迄今为止基于绝缘衬底上的硅(SOI)平台已制备出多种硅光子器件并实现了光子集成, 硅光子技术被认为是解决目前集成电路中功耗和带宽问题的最有潜力技术之一<sup>[1-2]</sup>。硅光子技术面临的其中一项挑战是如何将

光引入和导出光子集成回路, 光栅耦合器由于其高的耦合效率, 制备封装成本低且与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容、可在芯片表面任何地方实现光信号输入输出等优点, 成为光子集成回路中最有效的耦合方案。但是光栅耦合器耦合效率的提高存在两个主要限制因素: 1) 光栅向外衍射光呈指

**收稿日期**: 2014-05-25; **收到修改稿日期**: 2014-07-07

**基金项目**: 国家自然科学基金(61222501, 61335004)、高等学校博士学科点专项科研基金(20111103110019)

**作者简介**: 武 华(1979—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事半导体光电子器件及器件物理方面的研究。

E-mail: wh1125@126.com

**导师简介**: 郭 霞(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事半导体光电子器件及器件物理方面的研究。

E-mail: guo@bjut.edu.cn

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;2)光栅耦合器弱的方向性<sup>[3-5]</sup>。

为了解决光栅耦合器的衍射模场与光纤高斯模场的匹配问题,人们提出通过表面光栅横向或者纵向非均匀的结构来调控泄漏因子分布,从而实现光栅耦合器衍射模场为高斯分布的匹配问题。Chen等<sup>[6]</sup>通过纵向剪裁光栅的占空比制备出非均匀光栅,获得高斯分布的衍射模场,在TE偏振下,理论计算结果显示在1550 nm波长处获得最高耦合效率为83%;实验测得在1533 nm波长处获得最高耦合效率为75.8%,3 dB带宽45 nm。Tang等<sup>[7]</sup>利用感应耦合等离子体反应离子刻蚀工艺中的迟滞效应,获得光栅结构刻蚀深度不均匀,同时剪裁光栅纵向的占空比,也获得了高斯分布的衍射模场,在横电模(TE)偏振下波长1520 nm处理论上最高耦合效率为74%,实验测得在1524 nm波长处获得最高耦合效率为64%,3 dB带宽70 nm。为了提高光栅耦合器的方向性,Selvaraja等<sup>[8]</sup>通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)制备带底部分布布拉格反射镜(DBR)的均匀光栅,获得模拟结果在1550 nm波长处最高为82%的耦合效率,实验测得在1510 nm波长处最高为69.5%的耦合效率,3 dB带宽63 nm。Van Laere等<sup>[9]</sup>通过对均匀光栅底部用苯并环丁烯(BCB)晶片键合的方法增加底部金反射镜获得模拟结果在1564 nm波长处最高为72%的耦合效率,实验测得在1540 nm波长处最高为69%的耦合效率,3 dB带宽64 nm。上述各类方法都是浅刻蚀的光栅,需要在全刻蚀SOI顶硅层生成波导结构后二次刻蚀生成波导表面的光栅结构。

本文通过在纵向上剪裁不同周期光栅槽的亚波

长结构横向占空比来呈现非均匀变化,进而在纵向上形成等效折射率非均匀的光栅槽,从而来调节光栅的衍射特性,获得与光纤模场匹配的高斯型衍射模场分布。采用在顶硅层横向全刻蚀亚波长结构,根据亚波长等效介质理论可形成具有均匀等效折射率的光栅槽<sup>[10]</sup>,使光栅与波导结构为刻蚀工艺同时生成,这种方法也克服了传统光学介质薄膜因材料品种有限而使折射率受限的缺点。为了改善方向性,优化了SOI埋氧化层(BOX)的厚度并通过对光栅下面的硅衬底刻蚀至BOX层后沉积金形成底部反射镜,使得向下衍射光在BOX与金反射镜界面向上高反射后的光与光栅的直接向上衍射光形成相长干涉,进而提高向上的辐射功率。利用光栅的负一阶衍射效应实现波导与光纤之间的耦合,通过合理设计亚波长结构光栅槽的等效折射率分布、光栅周期等参数,在1550 nm波长处得到的最高耦合效率为93.1%,3 dB带宽为82 nm。

## 2 计算方法和结构模型

图1(a)显示的是本文设计的光栅耦合器的结构模型,为避免背反射损耗,光纤位置偏离光栅面垂直方向 $10^\circ$ ,图1(b)是光栅槽等效折射率人工剪裁的光栅耦合器的顶视图,与普通光栅耦合器的区别在于光栅槽为在纵向( $x$ 方向)不同位置是具有不同横向( $y$ 方向)占空比的亚波长结构。本文基于本征模展开方法<sup>[11]</sup>进行模拟,在结构模型中顶部和底部边界采用完美匹配层边界条件,避免寄生的反射效应<sup>[12]</sup>。为了避免光纤端面的反射,模拟中在光栅上

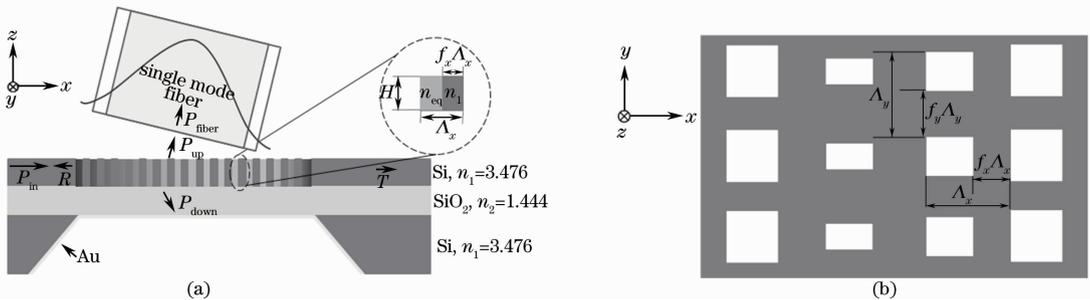


图1 (a)基于光栅槽等效折射率人工剪裁的光栅耦合器的结构模型,子图中是等效的光栅槽和光栅齿;  
(b)光栅槽等效折射率人工剪裁的光栅耦合器的顶视图

Fig. 1 (a) Structural model of grating coupler based on the tailored artificial refractive index of grating grooves, inset shows equivalent grating groove and tooth; (b) schematic top view of grating coupler with tailored artificial refractive index of grating grooves

表面设置一个折射率匹配层<sup>[7]</sup>。图 1(a)中显示的折射率是计算中采用的波长为 1550 nm 的材料折射率。光源从左边入射,设入射功率  $P_{in}$  归一化为 1,向上和向下衍射的功率为  $P_{up}$  和  $P_{down}$ 。在模拟计算中,首先计算整个结构的反射率  $R$  和透射率  $T$ ,然后进行功率传输过程中场的计算和与光纤模式重叠的计算,向上衍射模场与光纤模场的重叠积分为

$$\gamma = \frac{\left| \iint E \times H_{fib}^* \right|^2}{\operatorname{Re} \iint E \times H^* \iint E_{fib} \times H_{fib}^*}, \quad (1)$$

式中  $E, H$  和  $E_{fib}, H_{fib}$  分别为衍射模场和光纤模场的电场和磁场分布<sup>[13]</sup>,该重叠积分用来描述衍射模场与光纤模场的模式匹配程度。为了计算耦合到光纤的耦合效率,使用光束直径是  $10.4 \mu\text{m}$  的高斯光束来模拟光纤模式。光栅向上衍射的效率定义为向上衍射光功率与最初输入平面波导的光功率的比值,与光纤的耦合效率定义为耦合进入光纤的光功率与最初输入平面波导的光功率的比值。

### 3 等效折射率人工剪裁调节光栅特性的方法

根据等效介质理论,亚波长结构的光栅槽可当作具有等效折射率的均匀介质,TE 偏振情况下,光栅槽的等效折射率为<sup>[10]</sup>

$$n_{eq} = [(1 - f_y)n_{air}^2 + f_y n_1^2], \quad (2)$$

式中  $n_{air} = 1$  为刻蚀区域的折射率,  $n_1 = 3.476$  为硅的折射率,  $f_y$  为横向占空比。为了满足横向结构为亚波长的要求并兼顾工艺实现难度,固定横向的周期为  $400 \text{ nm}$ ,通过剪裁横向占空比  $f_y$  从  $0 \sim 1$  可以得到从  $n_{air} \sim n_1$  之间任意的等效折射率。在亚波长结构光栅槽等效为均匀介质后,因为多个横向周期组成的光栅宽度(典型值约  $10 \mu\text{m}$ ,与单模光纤芯层直径匹配)远大于其厚度,在横向( $y$ )和垂直方向( $z$ )可以建立去耦的二维(2D)模型<sup>[14]</sup>,如图 1(a)所示。

根据光栅槽与光栅齿(分别为光栅层在  $x$  方向的低、高折射率部分)的体积分数,计算出光栅层的等效折射率:

$$n_{eq-g} = (1 - f_x)n_{eq} + f_x n_1, \quad (3)$$

式中  $f_x$  为光栅的纵向( $x$  方向)占空比,为了使泄漏因子最大化,  $f_x$  固定为  $0.5$ <sup>[15]</sup>。

根据平板波导的 TE 模式本征方程<sup>[16]</sup>:

$$(n_{eq-g}^2 - n_{eff}^2)^{1/2} \frac{2\pi H}{\lambda} = m\pi + \arctan\left(\frac{n_{eff}^2 - n_3^2}{n_{eq-g}^2 - n_{eff}^2}\right)^{1/2} + \arctan\left(\frac{n_{eff}^2 - n_2^2}{n_{eq-g}^2 - n_{eff}^2}\right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $H = 220 \text{ nm}$  为顶部 Si 波导层的厚度,  $n_2 = 1.444$  为埋氧化层  $\text{SiO}_2$  的折射率,  $n_3 = 1.46$  为折射率匹配液的折射率,  $n_{eff}$  为带亚波长结构的光栅波导的有效折射率,  $m$  为模阶数。当  $\lambda$  取  $1550 \text{ nm}$  时,根据(4)式计算出 0 阶 TE 模式波导的有效折射率。

光栅周期根据下面的光栅衍射布拉格条件得出<sup>[3]</sup>:

$$q\lambda = \Lambda_x (n_{eff} - n_1 \sin \theta), \quad (5)$$

式中  $q$  为衍射级次(这里取  $q = -1$ ),  $\Lambda_x$  为光栅在传播方向  $x$  的周期,  $\theta$  为光纤偏离垂直方向的角度( $\theta = 10^\circ$ )。

图 2 中给出了不同光栅槽等效折射率  $n_{eq}$  对应的横向占空比  $f_y$  及纵向光栅周期  $\Lambda_x$ 。

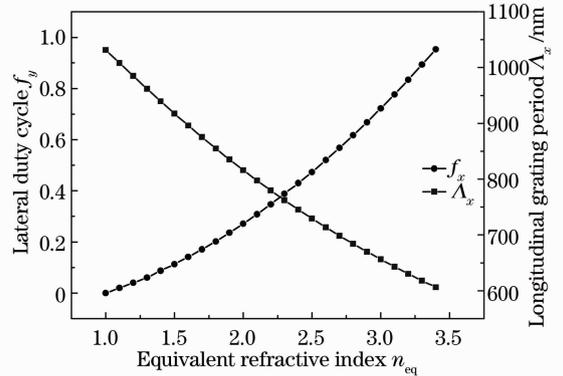


图 2 光栅槽等效折射率  $n_{eq}$  对应的横向占空比  $f_y$  及纵向光栅周期  $\Lambda_x$

Fig. 2 Equivalent refractive index  $n_{eq}$  of the grating grooves and the corresponding lateral duty cycle  $f_y$  and longitudinal grating period  $\Lambda_x$

光栅耦合器的泄漏因子表达式为  $2\alpha = -\ln T/n\Lambda$ <sup>[13]</sup>,  $n$  为光栅总的周期个数,  $T$  为通过  $n$  个光栅周期后的透射率。通过对不同光栅槽折射率下的均匀光栅耦合器对  $1550 \text{ nm}$  波长光计算透射功率可得出  $\alpha$ , 结果如图 3 所示。通过剪裁亚波长结构的横向占空比  $f_y$  能实现泄漏因子在  $0 \sim 0.5 \mu\text{m}^{-1}$  之间变化,利用图 2、3 可对光栅槽折射率剪裁的非均匀光栅耦合器在纵向进行  $0 \sim 0.5 \mu\text{m}^{-1}$  之间任意的泄漏因子分布设计。

为了实现光栅向上的衍射模场与光纤高斯模场的模式匹配,通过非均匀光栅改变沿传播方向  $x$  的泄漏因子  $2\alpha(x)$  来获得高斯形状的输出场分布  $G(x)$ , 则有  $dP(x)/dx = -2\alpha(x)P(x) = -G^2(x)$ ,

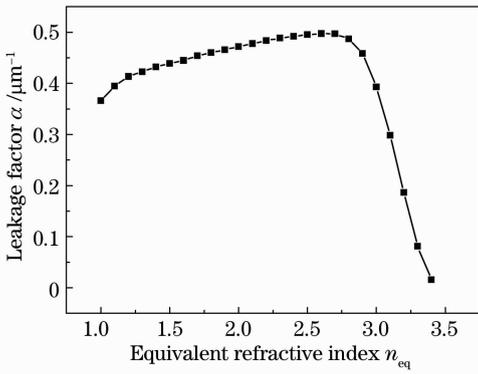


图 3 不同光栅槽等效折射率下的均匀光栅耦合器的泄漏因子

Fig. 3 Leakage factor versus equivalent refractive index of grating grooves for uniform grating couplers

式中  $P(x)$  是  $x$  处限制在光栅波导结构中的光功率,最后可计算出光栅泄漏因子满足<sup>[17]</sup>:

$$2\alpha(x) = G^2(x) / \left[ 1 - \int_0^x G^2(t) dt \right]. \quad (6)$$

利用图 2、3 中的折射率剪裁方法,在纵向不同的  $x$  位置剪裁横向占空比  $f_y$  来调节光栅槽等效折射率  $n_{eq}$  分布得到与  $x$  相关的泄漏因子  $\alpha$ , 根据(6)式从而实现光栅向上的衍射为与单模光纤模场匹配的高斯光束。图 4 为光栅在纵向上得到的泄漏因子分布及与其对应的高斯型场分布。由于光栅中任意位置向外衍射的光功率与该处光栅波导内的光功率成正比,来自入射波导的光从光栅始端到末端的传播过程中,不断向外衍射使得光栅波导中的光功率逐渐下降,而向外衍射光的模场分布根据模场匹配要求为先增后减的高斯分布,通过在纵向设计泄漏因子分布为如图 4 所示的从低到高,再从高到低,可以得到向外衍射光的模场为图 4 中的高斯分布。

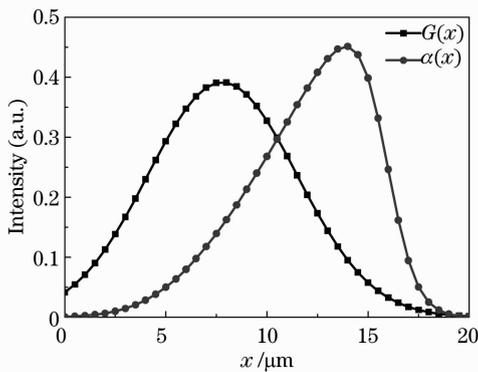


图 4 泄漏因子分布及其对应的高斯型场分布

Fig. 4 Leakage factor distribution and the corresponding Gaussian field profile

## 4 模拟结果和讨论

在模拟计算中,设中心波长  $\lambda$  为 1550 nm,仅考虑 TE 偏振情况。

为了提高耦合效率,埋氧化层厚度值需要合理选取。模拟结果显示,耦合效率与埋氧化层厚度之间的关系呈周期性变化,在两个耦合效率最大值之间的间隔是半个波长,这种性质是由于直接向上衍射的光和在埋氧化层/衬底界面的向上反射光之间的干涉引起的。本文选取埋氧化层厚度的设计值为 2200 nm,此厚度值下耦合效率处于周期性变化的峰值点。

### 4.1 不带底部反射镜的折射率人工剪裁的光栅耦合器

通过折射率剪裁可以得到不同光栅槽等效折射率的均匀光栅耦合器,在满足相位匹配条件下不同光栅槽等效折射率下的均匀光栅耦合器对 1550 nm 波长光的耦合效率如图 5 所示。可以看出当光栅槽折射率剪裁为  $n_{eq} = 2.6$  时,最高耦合效率为 58.5%,远大于光栅槽折射率  $n_{eq} = 1$  (空气)时的最高耦合效率 11.5%,原因是全刻蚀光栅槽为空气时,除了光栅弱的方向性和入射波导和光栅槽之间大的折射率差引起大的背反射的原因外,另一方面由于衍射模场与光纤模场之间模式匹配程度仅为 24.2%。图 6 为光栅槽剪裁为均匀折射率  $n_{eq} = 2.6$  时以及非均匀分布的折射率使得输出场分布为高斯分布时对不同波长的耦合效率,其中非均匀折射率时光栅槽的等效折射率(相应的横向占空比  $f_y$ )和纵向光栅周期如图 7 中所示。非均匀光栅耦合器在设计波长 1550 nm 处最高耦合效率为 62.1%,从

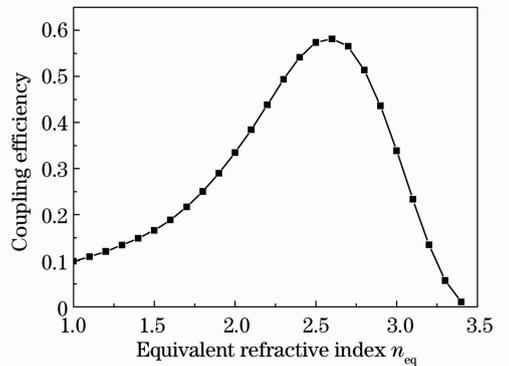


图 5 不同光栅槽等效折射率时光栅耦合器对 1550 nm 波长光的耦合效率

Fig. 5 Coupling efficiency of uniform grating couplers with different equivalent refractive index of grating grooves at wavelength 1550 nm

图 6(a)可以看出非均匀光栅耦合器在设计波长 1550 nm 附近具有比均匀光栅耦合器更高的耦合效率,图 6(b)为非均匀光栅耦合器在波长 1550 nm 时

光栅耦合器各层的电场分布,场分布为高斯分布形式,相对均匀光栅,非均匀光栅与单模光纤之间模场更加匹配。

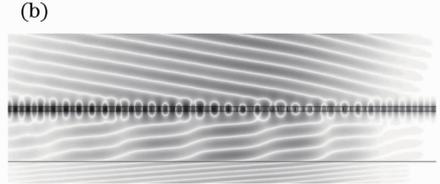
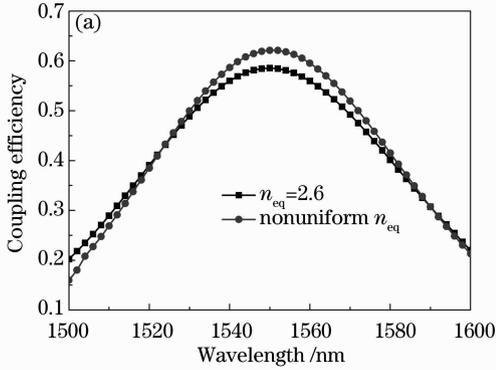


图 6 (a)均匀和非均匀光栅槽等效折射率的光栅耦合器对不同波长光的耦合效率;  
(b)1550 nm 波长时非均匀光栅耦合器各层的电场分布

Fig. 6 (a) Coupling efficiency of uniform and nonuniform grating couplers versus wavelength; (b) electric field component of electromagnetic wave in the layers of nonuniform grating couplers at wavelength 1550 nm

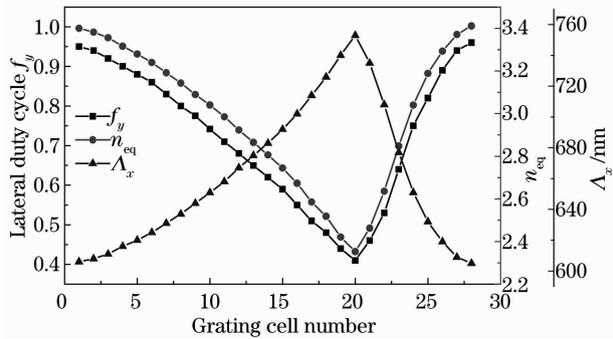


图 7 非均匀光栅的横向占空比  $f_y$ 、光栅槽的等效折射率  $n_{eq}$  和纵向光栅周期  $\Lambda_x$  分别沿光栅单元数的取值分布

Fig. 7 Value distribution along the grating cell number of lateral duty cycle  $f_y$ , equivalent refractive index  $n_{eq}$  of the grating grooves and longitudinal grating period  $\Lambda_x$  for nonuniform grating coupler

#### 4.2 集成底部反射镜的折射率人工剪裁的光栅耦合器

在不带底部反射镜的均匀和非均匀光栅耦合器中,限制耦合效率提高的主要因素为光栅弱的方向性,为了改善光的方向性,对光栅下面的硅衬底刻蚀至 BOX 层后沉积金形成底部反射镜,使得向下衍射光在 BOX 与金反射镜界面向上高反射后的光与光栅的直接向上衍射光形成相长干涉,进而提高向上的辐射功率。在集成底部金反射镜后,均匀和非均匀光栅耦合器耦合效率与波长的关系如图 8 所示,均匀光栅在波长 1550 nm 处 99.1% 的光能向上衍射出去,整个耦合效率为 86.5%,3 dB 带宽为 88 nm,向上衍射光的场分布与光纤高斯模式场分

布之间的模式匹配程度为 87.3%;非均匀光栅在波长 1550 nm 处 95.6% 的光能向上衍射出去,整个耦合效率为 93.1%,3 dB 带宽为 82 nm,向上衍射光的场分布与光纤高斯模式场分布之间的模式匹配程度为 97.3%。非均匀光栅相对均匀光栅而言,明显提升模式匹配程度进而提高耦合效率但同时降低为带宽。

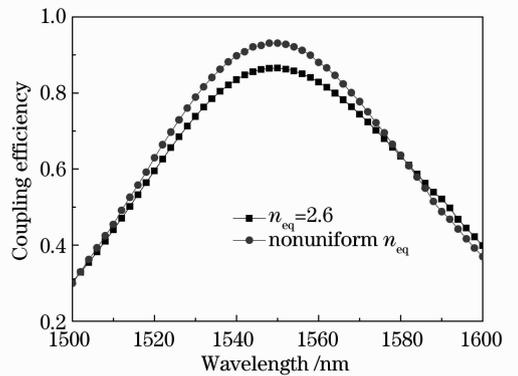


图 8 集成底部金反射镜时均匀和非均匀光栅槽折射率的光栅耦合器对不同波长光的耦合效率

Fig. 8 Coupling efficiency of uniform and nonuniform grating couplers with bottom gold mirror versus wavelength

#### 5 结 论

设计了等效折射率人工剪裁的光栅耦合器,通过亚波长结构剪裁光栅槽的等效折射率形成均匀和非均匀的光栅耦合器,同时对光栅耦合器集成底部金反射镜对衍射至衬底方向的光进行高反射,从而

提高光栅的方向性。模拟结果显示通过剪裁光栅槽的等效折射率为 2.6 时形成的均匀光栅耦合器对 1550 nm 波长光的最高耦合效率为 86.5%, 3 dB 带宽为 88 nm。通过剪裁光栅槽的等效折射率分布形成非均匀光栅来实现衍射光模式与光纤高斯模式的匹配后, 在 1550 nm 波长处得到的最高耦合效率为 93.1%, 3 dB 带宽为 82 nm。

## 参 考 文 献

- 1 T Baehr-Jones, T Pinguet, P L Guo-Qiang, *et al.*. Myths and rumours of silicon photonics [J]. *Nat Photonics*, 2012, 6(4): 206–208.
- 2 D X Xu, J H Schmid, G T Reed, *et al.*. Silicon photonic integration platform—have we found the sweet spot? [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20(4): 8100217.
- 3 G Roelkens, D Vermeulen, S Selvaraja, *et al.*. Grating-based optical fiber interfaces for silicon-on-insulator photonic integrated circuits [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2011, 17(3): 571–580.
- 4 G Roelkens, D Vermeulen, F Van Laere, *et al.*. Grating-based optical fiber interfaces for silicon-on-insulator photonic integrated circuits [J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2010, 10(3): 1551–1562.
- 5 Wu Hua, Guo Xia, Han Mingfu. Design of high efficiency grating coupler for vertical coupling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 777–781.  
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.
- 6 X Chen, C Li, C K Fung, *et al.*. Apodized waveguide grating couplers for efficient coupling to optical fibers [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2010, 22(15): 1156–1158.

- 7 Y B Tang, Z C Wang, L Wosinski, *et al.*. Highly efficient nonuniform grating coupler for silicon-on-insulator nanophotonic circuits [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(8): 1290–1292.
- 8 S K Selvaraja, D Vermeulen, M Schaekers, *et al.*. Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit [C]. *Proc of CLEO*, 2009:CTuC6.
- 9 F Van Laere, G Roelkens, M Ayre, *et al.*. Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(1): 151–156.
- 10 P Lalanne, D Lemerrier-Lalanne. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures [J]. *J Mod Optic*, 1996, 43(10): 2063–2085.
- 11 D F G Gallagher, T P Felici. Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics-Pros and Cons [C]. *SPIE*, 2003, 4987: 69–82.
- 12 P Bienstman, H Derudder, R Baets, *et al.*. Analysis of cylindrical waveguide discontinuities using vectorial eigenmodes and perfectly matched layers [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2001, 49(2): 349–354.
- 13 D Taillaert. Grating Couplers as Interface Between Optical Fibres and Nanophotonic Waveguides [D]. Ghent University, 2004. 23–51.
- 14 R Halir, P Cheben, J H Schmid, *et al.*. Continuously apodized fiber-to-chip surface grating coupler with refractive index engineered subwavelength structure [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(19): 3243–3245.
- 15 T Tamir, S T Peng. Analysis and design of grating couplers [J]. *Appl Phys*, 1977, 14(3): 235–254.
- 16 D S Gao, Z P Zhou. Nonlinear equation method for band structure calculations of photonic crystal slabs [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(16): 163105.
- 17 D Taillaert, P Bienstman, R Baets. Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(23): 2749–2751.

栏目编辑: 殷建芳