光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022041102

硅基集成光子器件先进设计方法

郜定山*，李书轶，蔡丽峰

（华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074）

摘　要： 硅基集成光子器件具有体积小、集成度高的突出优势，在光通信、数据中心光互连等领域具有广阔应用前景。然而，硅基波导耦合器件尺寸相对较大、工作带宽和工艺容差受限。硅基多模路由光子器件设计还面临挑战。文章介绍了近年来发展起来的两种硅基集成光子器件先进设计方法：绝热捷径法和变换光学方法，简要阐述其物理原理，并展示在硅基集成光子器件设计中的典型应用。

关键词： 硅基集成光子器件；绝热捷径法；变换光学方法

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0201－06

Advanced Designing Methods of Silicon Integrated Optical Devices

GAO Dingshan，LI Shuyi，CAI Lifeng

（Wuhan National Laboratory for Optoelectronics，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，CHN）

Abstract： Silicon based integrated optical devices have the outstanding advantages of small footprint and high integration level. They have broad application prospects in the fields of optical communication，data center optical interconnection and so on. However，the size of silicon-based waveguide coupler is relatively large，and the working bandwidth and process tolerance are limited. The design of silicon-based multimode routing photonic devices still faces big challenges. In this paper，two advanced design methods are introduced for silicon-based integrated optical devices developed in recent years：shortcuts to adiabaticity method and transformation optics method，their physical principles are briefly expounded，and typical applications in the design of silicon-based integrated optical devices are presented.

Key words： silicon-based integrated optical devices；shortcuts to adiabaticity；transformation optics

0　引言

硅基集成光子器件具有体积小、集成度高、制作工艺与微电子 CMOS 工艺兼容等突出优势，在高速光通信和数据中心光互连等重要领域有广阔的应用前景，成为国际光电子研究的前沿方向[1-12]。

为了提升光子集成芯片的信息处理容量和集成度，硅基集成光子器件已从单模波导器件拓展至多模波导器件，且亟需进一步缩小单元器件尺寸，提高工作带宽和工艺容差性。传统的硅基集成光子器件设计方法局限于单模波导，一些关键器件如定向耦合器、模式复用解复用器、模式转换器、偏振分束器等存在器件尺寸大、带宽窄、对工艺误差敏感等不足[13]。

本文将着重介绍近年来发展起来的两种硅基集成光子器件设计新方法：绝热捷径法和变换光学方法，及其在定向耦合分束器、模式复用解复用器、模式转换器、偏振分束器、多模交叉波导、多模弯曲波导等关键器件设计中的应用。

收稿日期：2022－04－11.

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFB2205202)；国家自然科学基金面上项目(61975062).

* **通信作者：**郜定山　**E-mail：** dsgao@hust.edu.cn

1 绝热捷径法

在导波光学中，许多器件是基于绝热演化原理来设计的，如喇叭口波导、Y 分支等。其中光在空间中的演化与本征模的演化密切相关。这些绝热光子器件依靠器件几何形状的逐渐变化来控制本征模，具有大带宽以及工艺误差不敏感的优势。然而，要满足绝热条件，器件通常需要较大的长度。

最近，人们利用一种称为“绝热捷径”(Shortcuts to Adiabaticity，STA)的新方法[14-15]，来加速缓慢的绝热演化过程，可以大幅缩短绝热光子器件的长度，并且提升器件性能的鲁棒性。

绝热捷径法根据所使用的数学处理方法不同，又可分为快速准绝热动力学法、基于不变量的逆向工程法。下面分别阐述这两种方法的基本原理及典型应用。

1.1 快速准绝热动力学法

1.1.1 基本原理

对于光波导中模序数为 m 和 n 的两种模式，沿矢量场演化区任意位置的绝热参数可定义为

$$c=\left|\frac{\int\left(\boldsymbol{E}_{mt}\times\frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{H}_{nt}^{*}\right)\hat{z}\mathrm{d}S}{\beta_m-\beta_n}\right| \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{E}_{mt}$ 和 $\boldsymbol{H}_{nt}$ 分别为光波导中 m 阶和 n 阶模式场的横向电场和横向磁场分量，β_m 和 β_n 为两个波导模式的传播常数，S 为整个波导的截面，z 为波导的传播方向。在模式过程中考虑一个单一的控制参数 $\gamma(z)$，可以将绝热参数 c 与控制参数 $\gamma(z)$ 联系起来：

$$c(z)=\left|\frac{\left\langle m\left|\frac{\partial}{\partial z}\right|n\right\rangle}{\beta_m-\beta_n}\right|=\left|\frac{\partial\gamma}{\partial z}\frac{\left\langle m\left|\frac{\partial}{\partial\gamma}\right|n\right\rangle}{\beta_m-\beta_n}\right|=\left|\frac{\partial\gamma}{\partial z}G(\gamma)\right| \tag{2}$$

快速准绝热动力学(Fast Quasiadiabatic Dynamics，FAQUAD)方法[16]的基本思想是，在整个器件长度 L 上均匀控制绝热参数为固定的小量，即 $c(z)=\epsilon\ll 1$。假设初始设置的参数 γ 随 z 线性变化，可以定义线性绝热参数：

$$c_{\mathrm{lin}}=\frac{\gamma_{\mathrm{e}}-\gamma_{\mathrm{i}}}{L}G(\gamma) \tag{3}$$

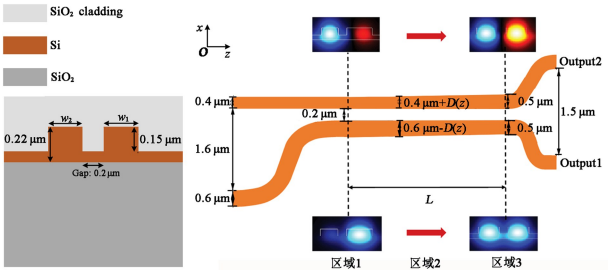
其中，γ_{i} 和 γ_{e} 分别为 $z=0$ 和 $z=L$ 时的控制参数值。经过简单推导，可得快速准绝热动力学设计的器件需满足：

$$z(\gamma)=\frac{L\int_{\gamma_{\mathrm{i}}}^{\gamma}c_{\mathrm{lin}}\mathrm{d}\gamma'}{\int_{\gamma_{\mathrm{i}}}^{\gamma_{\mathrm{e}}}c_{\mathrm{lin}}\mathrm{d}\gamma'} \tag{4}$$

FAQUAD 方法比较简单，但一般只能处理单个控制参数的情形。

1.1.2 光子器件设计应用

目前，利用 FAQUAD 方法可以设计多种集成光子器件。台湾国立中山大学 Hung 等报道了一种基于绝缘体上硅(Silicon-on-Insulator，SOI)脊波导的 2×2 宽带和制造容差性良好的 3 dB 耦合器[17]，器件结构如图 1(a)。利用定向耦合的两根波导的宽度渐变，实现了绝热系数的均匀分布。制作出的器件在 100 nm 带宽内分束比为(3±0.5) dB，工艺容差性良好。台湾国立成功大学 Chung 等展示了一个基于平台的准绝热偏振无关的 2×2 3 dB 耦合器[18]，如图 1(b)。在模式演化/耦合区采用准绝热锥形设计，TE 模式的演化得到加速，TM 模式的耦合在较短的耦合长度下实现。测得器件的工作带宽为 75 nm，耦合区长度仅为 11.7 μm。



(a) 硅脊波导 3 dB 耦合器横截面 (b) 绝热3 dB 耦合器

图 1 3 dB 耦合器示意图(插图显示了区域 2 输入和输出处耦合器的前两个本征模)

西班牙巴斯克大学的 Garaot 等利用 FAQUAD 方法设计了一种基于非对称 Y 分支的模式排序器[19]，在 200 nm 带宽内模式转换效率超过 99%。台湾国立成功大学 Chung 等利用 FAQUAD 方法设计了一种较短的非对称 Y 分支两模模式复用器[20]，器件长度仅 16 μm，模间串扰低于−34 dB，带宽可达 300 nm。该小组还提出了一种超短宽带硅模式转换偏振分离器旋转器(PSR)，它由一个锥形和一个 Y 分支组成，两个结构都是由 FAQUAD 方法设计的[21]。器件总长度为 39.2 μm，在 1.5～1.6 μm 的波长范围内，PSR 性能良好，透射率大于 88%，消光比大于 11.4 dB。

1.2 基于不变量的逆向工程法

1.2.1 基本原理

对于由两根波导构成的定向耦合器，根据麦克斯韦方程，可以推导出如下的绝热演化耦合方程：

$$\frac{\partial}{\partial z}\begin{bmatrix}A_1\\A_2\end{bmatrix}=-\mathrm{i}\begin{bmatrix}-\Delta & \kappa\\ \kappa & \Delta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_1\\A_2\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，A_1 和 A_2 分别为两根光波导中场振幅，$\Delta=(\beta_1-\beta_2)/2$ 为表征两根波导模式传播常数差异的量，κ 为两根波导间的耦合系数，z 为波导的传播方向。将上面的绝热演化耦合方程类比薛定谔方程，简记为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\varphi=\boldsymbol{H}\varphi \tag{6}$$

其中，

$$\boldsymbol{H}=-\mathrm{i}\begin{bmatrix}-\Delta & \kappa\\ \kappa & \Delta\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\varphi=\begin{bmatrix}A_1\\A_2\end{bmatrix} \tag{8}$$

对于一个函数矩阵 $\boldsymbol{I}(z)$，作用在 φ 上，假设满足条件：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\boldsymbol{I}+[\boldsymbol{I},\boldsymbol{H}]=0 \tag{9}$$

则可以得到

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}(\boldsymbol{I}\varphi)=\boldsymbol{H}\boldsymbol{I}\varphi \tag{10}$$

即，$\boldsymbol{I}\varphi$ 也是微分方程的解，可以知道 $\bar{\boldsymbol{I}}$ 是不变量。根据 Lewis-Riesenfeld 不变量法的理论[22]，矩阵 $\boldsymbol{I}(z)$ 的形式可以取为

$$\boldsymbol{I}(z)=\begin{bmatrix}\cos\theta(z) & \exp[\mathrm{i}\varphi(z)]\sin\theta(z)\\ \exp[-\mathrm{i}\varphi(z)]\sin\theta(z) & -\cos\theta(z)\end{bmatrix} \tag{11}$$

其中，$\theta(z)$ 和 $\varphi(z)$ 都是实函数。将矩阵 $\boldsymbol{I}(z)$ 的形式(9)代入式(7)，得到：

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}z}=2\kappa\sin\varphi \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}z}=2\Delta+2\kappa\cos\varphi\cot\theta \tag{13}$$

反之，可导出

$$\kappa=\frac{\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}z}{2\sin\varphi} \tag{14}$$

$$\Delta=\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}z}-\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}z}\cot\varphi\cot\theta \tag{15}$$

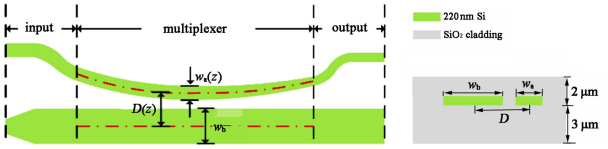
所以，若已知 $\theta(z)$ 和 $\varphi(z)$，则可以得到耦合器的 $\kappa(z)$ 和 $\Delta(z)$。实际可根据边界条件来构造 $\theta(z)$ 和 $\varphi(z)$ 的函数形式，再结合对器件性能的要求对函数形式进行优化，来逆向设计出快速绝热演化的器件。

基于不变量的逆向工程法，相比 FAQUAD 方法更复杂，但可以处理多个控制参数的优化设计，功能更强。

1.2.2 光子器件设计应用

基于不变量的逆向工程法，可以设计多种集成光子器件。台湾国立成功大学 Tseng 等基于 Lewis-Riesenfeld 不变量理论，提出了一种尺寸短、工艺误差不敏感的定向耦合器[23]。结合基于不变量的逆工程和微扰理论，讨论了定向耦合器的工艺误差不敏感优化设计。该小组还利用基于不变量的逆向工程法设计并制作了一系列宽带、任意分束比的硅波导分束器[24]。所制作的器件在 1.47～1.62 μm 的宽波长范围内具有宽带响应，并且对 8 inch 晶圆上的制造误差具有极好的鲁棒性。

中科院半导体所 Guo 等基于不变量的绝热捷径法设计和制作了宽带、低损耗、低串扰的硅基模式复用/解复用器[25]，如图 2。制作的四模式 MDM 复用器测量的插入损耗小于 1.3 dB，串扰低于－23 dB。



(a) 俯视图　　(b) 侧视图

图 2 使用 STA 原理优化设计的模式(解)复用器的示意图

2 变换光学方法

利用模式复用来拓展硅基集成光子芯片的信息处理容量是近年来的重要前沿方向。然而，一些关键的多模光子器件，如多模弯曲波导、多模波导交叉等，在设计上面临挑战。如何对多模波导中各阶模式波前进行灵活操控是核心问题。

变换光学根据麦克斯韦方程在坐标变换下的形式不变性，灵活利用空间网格变换来实现特定的波导外形，并保持变换前后的光传输特性。该方法在多模光场操控方面具有独特的优势。

2.1 基本原理

假设变换之前的物理空间为 (x,y,z) 空间，变换后的虚空间为 (u,v,w) 空间，则有

$$\begin{bmatrix}\mathrm{d}u\\ \mathrm{d}v\\ \mathrm{d}w\end{bmatrix}=\boldsymbol{P}\begin{bmatrix}\mathrm{d}x\\ \mathrm{d}y\\ \mathrm{d}z\end{bmatrix} \tag{16}$$

其中，$\boldsymbol{P}$ 为 Jacobian 矩阵，用于描述坐标微元的变换

关系：

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \\ w_x & w_y & w_z \end{bmatrix} \tag{17}$$

根据麦克斯韦方程的形式不变性(或称“协变性”)，曲线坐标系的坐标变换对于频域有源线性介质麦克斯韦方程的形式不改变，但是需要对源、介电常数和磁导率进行改变。其中介质的变换公式为

$$\varepsilon'=\frac{\boldsymbol{P}\varepsilon\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}}{\det(\boldsymbol{P})}$$
$$\mu'=\frac{\boldsymbol{P}\mu\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}}{\det(\boldsymbol{P})} \tag{18}$$

其中，ε 和 μ 为 (x,y,z) 空间的介电常数和磁导率，而 ε' 和 μ' 为 (u,v,w) 空间的介电常数和磁导率。当坐标变换为保角变换时[26]，可简化为折射率的变换关系

$$n'=\frac{\boldsymbol{P}n\boldsymbol{P}}{\det(\boldsymbol{P})} \tag{19}$$

即在保角变换时，实空间与虚空间之间只是折射率分布发生改变，而不需要引入材料的各向异性。这样一来，非常适合在各向同性介质材料体系中设计平面光波导型的集成变换光学器件。

2.2 集成光子器件设计应用

美国宾夕法尼亚州立大学 Wu 等从理论上揭示了借助变换光学原理，利用梯度折射率材料可以设计出许多新器件，例如光源准直器、波导适配器和波导交叉，在集成光子芯片中有着广泛的应用[27]。美国康奈尔大学 Gabrielli 等利用准保角变换结合优化方法，设计了硅基多模弯曲波导[28]，弯曲半径为 78.8 μm，可支持 3 个 TE 模式。该小组利用电子束灰度曝光技术制作了器件，但由于制作工艺误差导致性能不佳。该小组利用的准保角方法仍会导致材料各向异性，因此弯曲半径仍较大。

我们利用保角变换方法，将麦克斯韦鱼眼变形，使之与多模波导模式波前匹配、折射率匹配，实现了片上 4 通道、3 模式的多模波导交叉[29]，如图 3。理论仿真证明，在 1 308～1 702 nm 的超宽带范围内，所有模式的损耗都低于－1.14 dB，模间串扰值均低于－21 dB。我们还利用电子束灰度曝光技术，在 SOI 晶片上制作了梯度折射率鱼眼多模波导交叉器件[29]，如图 4。还利用保角变换和虚空间波导外形优化方法，设计了一种结构紧凑、宽带的多模弯曲波导[30]，如图 5。

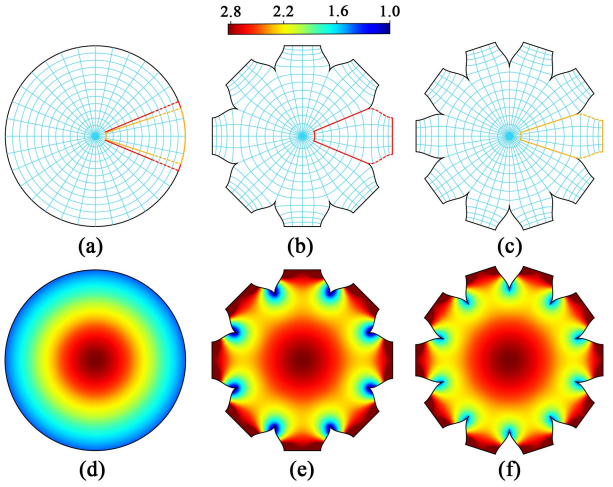


图 3 利用保角变换从麦克斯韦鱼眼变形为多通道多模波导交叉示意图。(a)～(c)变换前后空间网格分布；(d)～(f)变换前后空间折射率分布

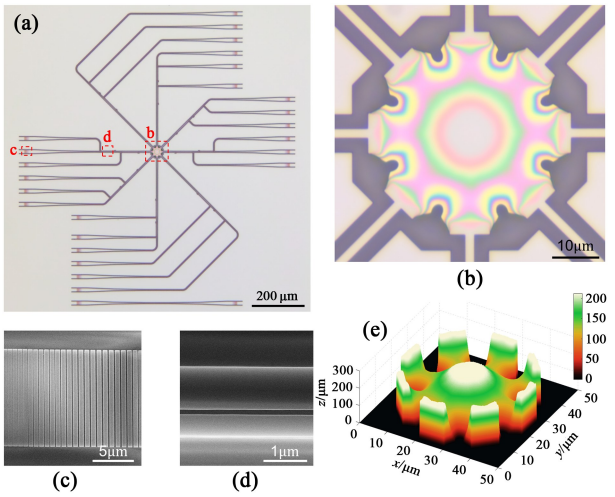


图 4 梯度折射率鱼眼多模波导交叉器件示意图。(a)显微镜照片；(b)局部结构；(c)垂直光栅耦合器结构；(d)模式复用解复用器；(e)原子力显微镜测量得到鱼眼 3D 结构

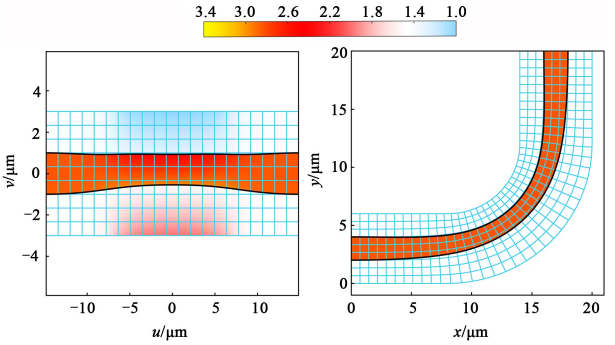


图 5 多模弯曲波导(a)虚空间边界外形优化的多模波导；(b)实空间多模弯曲波导结构

理论仿真结果表明，在 1.16～1.66 的超宽带范

围内，所有模式的损耗均低于 0.1 dB，模间串扰均低于－20 dB。在 SOI 平台上制作了变换光学设计的多模弯曲波导，实验测得在 1 550 nm 的中心波长下，TE_0，TE_1，TE_2 和 TE_3 模的超额损耗分别为 0.232，0.327，0.477 和 0.546 dB，模间串扰均低于－17 dB。

3　展望

硅基集成光学平台为缩小单元光子器件尺寸、实现大规模高密度光子集成奠定了基础。然而，硅基光波导的高折射率差特性，使得器件性能对工艺误差异常敏感，且多个波导模式的操控更加困难。本文对近年来发展起来的两种先进硅基光子器件设计方法，即绝热捷径法和变换光学方法进行了总结和分析。绝热捷径法突破了谐振耦合型器件的窄带、工艺敏感局限，同时克服了传统绝热光子器件的大尺寸缺点，在基于耦合模理论的定向耦合分束器、模式复用解复用器、模式转换器、偏振分束旋转器等方面展现出独特的优势和潜力。而变换光学器件可以从虚空间性能已知的原型器件出发，设计支持多个波导模式的弯曲、交叉等路由光子器件，在多模式波前协同操控方面有明显优势。未来，还需发展各种新颖的集成光子器件设计理论方法，并结合工艺误差分析和高效多参数优化方法，设计出性能优越、工艺容差性好的集成光子器件。

参考文献：

[1] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics [J]. J. Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4600-4615.

[2] Borghi M, Castellan C, Signorini S, et al. Nonlinear silicon photonics[J]. J. Opt., 2017, 19(9): 093002.

[3] Chiles J, Fathpour S. Silicon photonics beyond silicon-on-insulator[J]. J. Opt., 2017, 19(5): 053001.

[4] Leuthold J, Koos C, Freude W. Nonlinear silicon photonics [J]. Nat. Photonics, 2010, 4(8): 535-544.

[5] Li C, Liu D, Dai D. Multimode silicon photonics [J]. Nanophotonics, 2019, 8(2): 227-247.

[6] Liang D, Roelkens G, Baets R, et al. Hybrid integrated platforms for silicon photonics[J]. Materials, 2010, 3(3): 1782-1802.

[7] Lim A E-J, Song J, Fang Q, et al. Review of silicon photonics foundry efforts[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2014, 20(4): 8300112.

[8] Lin H, Luo Z, Gu T, et al. Mid-infrared integrated photonics on silicon: A perspective[J]. Nanophotonics, 2018, 7(2): 393-420.

[9] Pavesi L. Thirty years in silicon photonics: A personal view [J]. Front. Phys., 2021, 9: 786028.

[10] Siew S Y, Li B, Gao F, et al. Review of silicon photonics technology and platform development [J]. J. Lightwave Technol., 2021, 39(13): 4374-4389.

[11] Yuan Y, Tossoun B, Huang Z, et al. Avalanche photodiodes on silicon photonics [J]. J. Semicond., 2022, 43(2): 021301.

[12] Zhou Z, Yin B, Michel J. On-chip light sources for silicon photonics[J]. Light-Sci. Appl., 2015, 4: e358.

[13] Bogaerts W, Chrostowski L. Silicon photonics circuit design: Methods, tools and challenges[J]. Laser Photonics Rev., 2018, 12(4): 1700237.

[14] Torrontegui E, Ibanez S, Martinez-Garaot S, et al. Shortcuts to Adiabaticity[M]. San Diego: Elsevier Academic Press Inc, 2013: 117-169.

[15] Guery-Odelin D, Ruschhaupt A, Kiely A, et al. Shortcuts to adiabaticity: Concepts, methods, and applications[J]. Rev. Mod. Phys., 2019, 91(4): 54045001.

[16] Chung H C, Martinez-Garaot S, Chen X, et al. Shortcuts to adiabaticity in optical waveguides[J]. Epl, 2019, 127(3): 734001.

[17] Hung Y J, Li Z Y, Chung H C, et al. Mode-evolution-based silicon-on-insulator 3 dB coupler using fast quasiadiabatic dynamics[J]. Opt. Lett., 2019, 44(4): 815-818.

[18] Chung H C, Chen C H, Hung Y, et al. Compact polarization-independent quasi-adiabatic 2×2 3 dB coupler on silicon[J]. Opt. Express, 2022, 30(2): 995-1002.

[19] Martinez-Garaot S, Muga J G , Tseng S Y. Shortcuts to adiabaticity in optical waveguides using fast quasiadiabatic dynamics[J]. Opt. Express, 2017, 25(1): 159-167.

[20] Chung H C, Lee K S, Tseng S Y. Short and broadband silicon asymmetric Y-junction two-mode (de) multiplexer using fast quasiadiabatic dynamics[J]. Opt. Express, 2017, 25(12): 13626-13634.

[21] Chung H C, Tseng S Y. Ultrashort and broadband silicon polarization splitter-rotator using fast quasiadiabatic dynamics [J]. Opt. Express, 2018, 26(8): 9655-9665.

[22] Jr. H R L, Riesenfeld W B. An exact quantum theory of the time-dependent harmonic oscillator and of a charged particle in a time-dependent electromagnetic field [J]. J. Math. Phys., 1969, 10(8): 1458-1473.

[23] Tseng S Y, Wen R D, Chiu Y F, et al. Short and robust directional couplers designed by shortcuts to adiabaticity[J]. Opt. Express, 2014, 22(16): 18849-18859.

[24] Chung H C, Wang T C, Hung Y J, et al. Robust silicon arbitrary ratio power splitters using shortcuts to adiabaticity [J]. Opt. Express, 2020, 28(7): 10350-10362.

[25] Guo D F, Chu T. Silicon mode (de) multiplexers with parameters optimized using shortcuts to adiabaticity [J]. Opt. Express, 2017, 25(8): 9160-9170.

[26] Xu L, Chen H Y. Conformal transformation optics[J]. Nat. Photonics, 2015, 9(1): 15-23.

[27] Wu Q, Turpin J P, Werner D H. Integrated photonic systems based on transformation optics enabled gradient index devices[J]. Light-Sci. Appl., 2012, 1: 6e38.

[28] Gabrielli L H, Liu D, Johnson S G, et al. On-chip transformation optics for multimode waveguide bends[J]. Nat. Commun., 2012, 3: 61217.

[29] Li Shuyi, Zhou Yangyang, Dong Jianji, et al. Universal multimode waveguide crossing based on transformation optics [J]. Optica, 2018, 5(12): 1549-1556.

[30] Li Shuyi, Cai LifengF, Gao Dingshan, et al. Compact and broadband multimode waveguide bend by shape-optimizing with transformation optics[J]. Photon. Research, 2020, 8 (12): 1843-1849.

作者简介:

郜定山(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事硅基集成光电子学、纳米光学研究,曾在法国巴黎南大学做高级访问学者,已在 Optica, Physical Review Letters 等期刊上发表学术论文 80 余篇;担任中法 PHOTONET 光电子国际合作联合研究网络中方联络人;

李书轶(1992—),男,博士,主要从事硅基集成光电子学研究,目前在新加坡南洋理工大学从事博士后研究。