

引用格式: ZHOU Yue, SUN Yaohui, WU Haoyu, et al. Design of Low Loss Silicon Waveguide Bend with Width and Curvature Variations[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0823002

周悦, 孙耀辉, 吴浩宇, 等. 宽度与曲率双渐变型低损耗硅基弯曲光波导设计[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0823002

# 宽度与曲率双渐变型低损耗硅基 弯曲光波导设计

周悦, 孙耀辉, 吴浩宇, 陆梦佳, 胡国华, 恽斌峰, 崔一平

(东南大学 电子科学与工程学院 先进光子学中心, 南京 210096)

**摘 要:** 采用内、外曲线分别为圆形弯曲和欧拉-圆形弯曲曲线, 以及内、外曲线分别为欧拉-圆形弯曲和欧拉弯曲曲线, 提出并优化了两种曲率与宽度双渐变的硅基单模弯曲光波导结构。采用有限时域差分对提出的两种弯曲光波导结构进行了仿真优化, 并与圆形弯曲、欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲光波导的性能进行了比较。结果表明在等效弯曲半径为  $2\ \mu\text{m}$  时, 内、外曲线分别为圆形弯曲和欧拉-圆形弯曲的弯曲光波导损耗值仅为  $0.0056\ \text{dB}/90^\circ$ , 且具有低的损耗波长相关性。

**关键词:** 绝缘体上硅; 弯曲光波导; 曲率渐变; 宽度渐变; 低损耗

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235208.0823002

## 0 引言

集成光路在数据通信领域发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>, 并有力推动了天文学<sup>[3-4]</sup>、生物传感<sup>[5-6]</sup>、医学诊断<sup>[7-8]</sup>和量子光学<sup>[9]</sup>等领域的发展。近些年, 光芯片在朝着微小型、高集成度的方向发展。弯曲光波导作为其中重要组成结构, 尽管单个弯曲光波导的损耗较小, 但是芯片中积累的总损耗可能会大大恶化芯片的插损性能。另一方面, 虽然增大弯曲光波导的弯曲半径可以降低弯曲损耗, 但是这又将降低芯片的集成度。为了提高光芯片的性能表征及集成度, 降低器件的尺寸和成本, 低损耗、小尺寸的弯曲光波导得到了广泛研究。

目前已经报道了一些减少弯曲光波导弯曲损耗的方法。2006年, QIAN Yusheng 等和 SOLEHMAINEN K 等分别提出采用全内反射 (Total Internal Reflection, TIR)<sup>[10]</sup> 和在光波导结构外部引入刻蚀槽<sup>[11]</sup> 两种方案, 通过减少向光波导外部的场泄漏从而减少弯曲损耗。但是, 二者都需要特殊的制造过程, 增加了制造的成本。使用渐变光波导<sup>[12]</sup> 或者偏移直光波导的位置, 可以有效改善直光波导和弯曲光波导的模场匹配程度<sup>[13-15]</sup>。但是, 该方案工艺容差小, 难以实际应用。为了在减小弯曲光波导损耗的同时, 兼顾集成度和工艺容差, 目前较为主流的设计思路是采用特殊的弯曲曲线形状, 包括贝塞尔弯曲<sup>[16]</sup>、欧拉弯曲<sup>[17-19]</sup>、欧拉-圆形弯曲<sup>[20]</sup>、绝热弯曲<sup>[21-22]</sup> 以及基于其他特殊函数设计的低损耗弯曲<sup>[23]</sup> 等。当等效弯曲半径超过  $3\ \mu\text{m}$  时, 上述弯曲光波导相较于圆形弯曲, 总损耗可以得到有效降低; 但是, 当等效弯曲半径小于  $3\ \mu\text{m}$  时, 其损耗优势并不明显, 甚至有些方案会导致损耗值劣化。

2020年, SONG J H 等<sup>[24]</sup> 提出了结合增大波导宽度、横向偏移和弯曲半径渐变的弯曲光波导结构, 在弯曲半径仅  $1\ \mu\text{m}$  的情况下实验得到了  $0.38\ \text{dB}/90^\circ$  的低损耗值。对于该方案, 增大光波导的宽度可以增加光场在弯曲处的束缚能力, 以降低弯曲光波导的辐射损耗。横向偏移和变化弯曲半径均是为了降低直光波导与弯曲光波导连接处的模式失配损耗。然而, 该方案设计的优化参数较多, 寻找最小弯曲损耗结构参数组合的难度较大; 且优化变量与实际器件的结构参数之间的关系比较抽象, 难以设计出完全符合预期的弯曲

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62171118)

第一作者: 周悦, 220211709@seu.edu.cn

通讯作者: 恽斌峰, ybf@seu.edu.cn

收稿日期: 2023-01-15; 录用日期: 2023-04-04

<http://www.photon.ac.cn>

光波导。

为了实现小尺寸、低损耗的弯曲光波导,本文提出了两种基于不同内外曲线实现宽度渐变的硅基单模 $90^\circ$ 弯曲光波导结构。弯曲光波导 I 由圆形弯曲的内曲线和欧拉-圆形弯曲的外曲线组合而成,弯曲光波导 II 由欧拉-圆形弯曲的内曲线和欧拉弯曲的外曲线组合而成。一方面,根据内、外曲线的曲率半径的差异性,通过对设计参数进行相应的优化,可以调节欧拉-圆形曲线的曲线占比,使得弯曲光波导内的宽度渐变,以有效束缚光能量,降低弯曲光波导的辐射损耗;另一方面,弯曲光波导 I 和 II 中的欧拉-圆形弯曲或欧拉弯曲的曲率均从零开始变化,降低了直光波导和弯曲光波导连接处的模式失配损耗,进一步降低弯曲损耗。在加工工艺上,本文所提出结构无特殊的工艺要求,加工难度较低。通过 3D-FDTD 对提出的这两种弯曲光波导结构进行了仿真和优化,弯曲光波导 I 在等效弯曲半径( $R_0$ )为  $2\ \mu\text{m}$  时损耗值仅为  $0.0056\ \text{dB}/90^\circ$ 。弯曲光波导 II 在  $R_0=4\ \mu\text{m}$  和  $5\ \mu\text{m}$  时,其损耗值比已报道的圆形弯曲、欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲都要低一个量级。

## 1 弯曲光波导结构

### 1.1 欧拉弯曲

欧拉弯曲结构示意图如图 1(a) 所示。其中,两个端点  $P_0$  和  $P_1$  是坐标分别为  $(0,0)$  和  $(R_0, R_0)$  的固定点,  $R_0$  是弯曲半径,  $P_2$  点是曲线的中点,其位于沿曲线的一半长度 ( $s_{\text{mid}}$ ) 处。该弯曲的每一半(即  $P_0P_2$  和  $P_2P_1$ ) 均属于欧拉螺旋。该曲线的曲率沿曲线线性变化,从起始点  $P_0$  到末端  $P_1$  的曲率如图 1(b) 所示。其中,  $P_0P_2$  段与  $P_2P_1$  段是对称的,欧拉  $90^\circ$  弯曲的曲率最大点在点  $P_2$  处。由于  $P_0$  和  $P_1$  的曲率为 0,可以与直光波导的模场完美匹配,因此引入欧拉弯曲可以有效降低直光波导和弯曲光波导连接处的模式失配损耗。

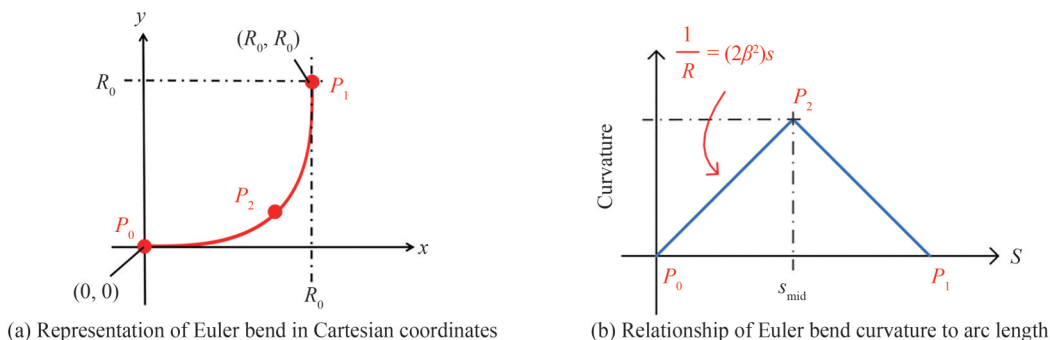


图 1 欧拉弯曲数学模型

Fig. 1 Mathematical model of Euler bend

欧拉弯曲的曲率半径定义为<sup>[23]</sup>

$$\frac{1}{R} = (2\beta^2)s \quad (1)$$

式中,  $\beta$  是欧拉弯曲的参数,  $s$  是沿曲线的长度参数。弯曲处的前半部分(即  $P_0P_2$ ) 的  $x$  和  $y$  坐标为

$$x(s) = \frac{1}{\beta} \int_0^{\beta s} \cos t^2 dt \quad (2)$$

$$y(s) = \frac{1}{\beta} \int_0^{\beta s} \sin t^2 dt \quad (3)$$

为了确定弯曲的参数,使其从  $P_0$  到  $P_1$ , 采取步骤:

1) 用最小曲率半径和半长来计算  $\beta$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2R_{\text{min}}s_{\text{mid}}}} \quad (4)$$

2) 在中点  $P_2$  处, 与弯曲相关的切向量必须与线  $y = R_0 - x$  正交, 因此有

$$\frac{dy}{ds} = \frac{dx}{ds} \quad (5)$$

从而得

$$s_{\text{mid}} = \frac{\pi}{2} R_{\text{min}} \quad (6)$$

3)通过求解 $P_2$ 中点处的关系式(7),找到 $s_{\text{mid}}$

$$y(s_{\text{mid}}) = R - x(s_{\text{mid}}) \quad (7)$$

综合式(1)~(7),可以最终推导出求 $R_{\text{min}}$ 的表达式为

$$R_{\text{min}} = \frac{R_0}{\sqrt{\pi} \int_0^{\frac{\sqrt{\pi}}{2}} (\sin t^2 + \cos t^2) dt} \quad (8)$$

由式(8)可知, $R_{\text{min}}$ 与 $R_0$ 一一映射,即当 $R_0$ 确定时,欧拉曲线也唯一确定。由图1(b)可知, $P_0$ 点对应于坐标原点, $(c,s)=(0,0)$ ,其中 $c=1/R$ 为曲率;在 $P_0P_2$ 段, $c$ 关于 $s$ 线性变化;在 $P_2$ 点, $s=s_{\text{mid}}$ , $c$ 到达峰值,即 $1/R_{\text{min}}$ 。由式(6)、式(4)分别可得 $s_{\text{mid}}$ 与 $\beta$ 。根据式(2)和(3),遍历 $P_0P_2$ 段的 $s$ 值,绘制出 $P_0P_2$ 段对应的直角坐标系中的欧拉曲线的一半。图1(b)关于直线 $s=s_{\text{mid}}$ 对称,因此完整的欧拉曲线关于 $y=R_0-x$ 对称,由此通过 $P_0P_2$ 段的欧拉曲线可以快速绘制出 $P_2P_1$ 段曲线。

## 1.2 欧拉-圆形弯曲

如果将曲线分成两部分:一部分是在两个端点处提供曲率匹配的欧拉曲线,另一部分是将两段欧拉弯曲连接在一起的圆形弯曲,这种曲线则为欧拉-圆形弯曲<sup>[20]</sup>。其结构示意图如图2(a)所示,曲率图如图2(b)所示。其中,两个端点 $P_0$ 和 $P_1$ 是坐标分别为 $(0,0)$ 和 $(R_0,R_0)$ 的固定点, $P_0P_2$ 和 $P_3P_1$ 段是欧拉弯曲,而 $P_2P_3$ 段是曲率恒定的圆形弯曲。通过对比图2(b)和图1(b),发现欧拉-圆形弯曲在中间段的曲率比欧拉弯曲低,因此欧拉-圆形弯曲在中间处的曲率半径是大于欧拉弯曲的曲率半径的。辐射损耗随着弯曲半径的减小而增大,因此,相对于欧拉弯曲,欧拉-圆形弯曲可以降低中间段小弯曲半径时的辐射损耗。相对于圆形弯曲而言,在同样弯曲半径的前提下,欧拉-圆形弯曲可以降低模式失配损耗,更好地实现弯曲光波导损耗性能的平衡。

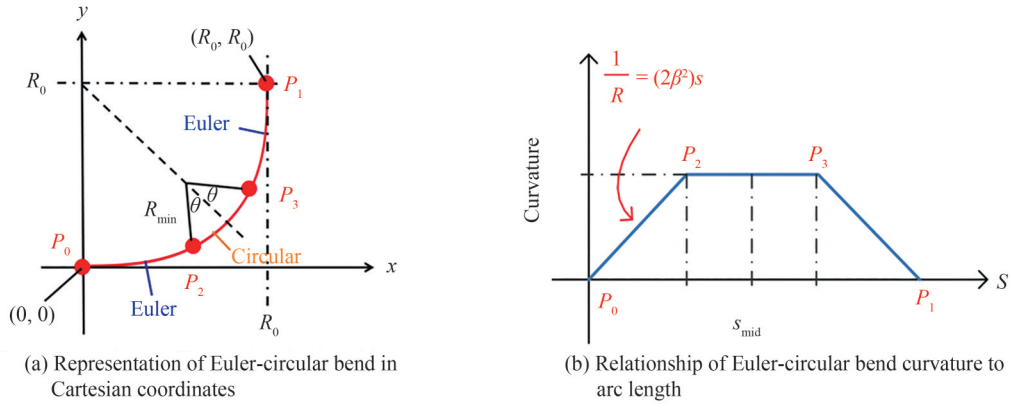


图2 欧拉-圆形弯曲数学模型  
Fig. 2 Mathematical model of Euler-circular bend

若圆形弯曲部分在曲率上设置一个上限,并且不允许它超出这个限制,该限制由圆形弯曲的长度 $2s_c$ 与欧拉弯曲的长度 $2s_e$ 的比值决定<sup>[23]</sup>

$$r = \frac{2s_c}{2s_e} \quad (9)$$

通过式(9)可知欧拉弯曲的长度( $2s_e$ )占整个欧拉-圆形曲线( $2s_c+2s_e$ )的比值( $p$ )为

$$p = \frac{2s_e}{2s_c + 2s_e} \quad (10)$$

联立式(9)和式(10)可得

$$r = \frac{1-p}{p} \quad (11)$$

为了确定弯曲的参数,使其从 $P_0$ 到 $P_2$ 为欧拉弯曲,同时从 $P_2$ 到 $P_3$ 为圆形弯曲,采取步骤:

1)根据 $P_0P_2$ 的长度表示出欧拉弯曲的 $\beta$ 参数为

$$\beta \times s_e = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4}}{1+2r}} \quad (12)$$

2)通过在 $P_2$ 和 $P_3$ 处的平滑连接,将 $\theta$ (如图2(a)所示的圆形弯曲的角度)用 $s_e$ 表示,得

$$\theta = 2r \times (\beta s_e)^2 \quad (13)$$

3)将 $P_2P_3$ 段的圆形弯曲的曲率半径(也是欧拉部分的最小曲率半径)写为

$$R_{\min} \times \theta = r s_e \quad (14)$$

4)在 $P_2P_3$ 段的圆形弯曲部分与线 $y = R_0 - x$ 的交点处通过对称条件来求解 $s_e$ .

$$x_{P_2} + y_{P_2} = R_0 - \sqrt{2} R_{\min} \sin \theta \quad (15)$$

其中,弯曲处的前半部分(即 $P_0P_2$ )的 $x$ 和 $y$ 坐标为

$$\begin{cases} x_{P_2} = \int_0^{s_e} \cos(\beta u)^2 du \\ y_{P_2} = \int_0^{s_e} \sin(\beta u)^2 du \end{cases} \quad (16)$$

5)倒推求出 $\beta$ 后,然后利用式(17)和式(18)来确定欧拉部分。

$$x(s) = \frac{1}{\beta} \int_0^{\beta s} \cos t^2 dt \quad (17)$$

$$y(s) = \frac{1}{\beta} \int_0^{\beta s} \sin t^2 dt \quad (18)$$

6)从式(19)中求出 $P_2P_3$ 段的圆形弯曲部分的 $x$ 和 $y$ 分量。

$$\begin{cases} x(\phi) = x_{P_2} + R_{\min} \left( \cos \phi - \cos \left( \frac{\pi}{4} + \theta \right) \right) \\ y(\phi) = y_{P_2} + R_{\min} \left( \sin \phi - \sin \left( \frac{\pi}{4} + \theta \right) \right) \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $-\frac{\pi}{4} - \theta < \phi < -\frac{\pi}{4}$ 。

7)根据对称性,求出另一半弯曲。

综合式(9)和式(12)~(19),可以最终推导出

$$\int_0^{s_e} \left\{ \cos \left( \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4}}{1+2r}} u / s_e \right)^2 + \sin \left( \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4}}{1+2r}} u / s_e \right)^2 \right\} du = R_0 - \frac{2\sqrt{2}(1+2r)}{\pi} s_e \times \sin \left( \frac{\pi r}{2(1+2r)} \right) \quad (20)$$

对于式(20)来说, $R_0$ 的值已知,通过式(11)可以知道 $p$ 与 $r$ 的关系, $p$ 可通过损耗最小值确定,即 $p$ 相当于是已知量,那么 $r$ 的值也就确定了。在上文中已给出 $u$ 是积分变量,则整个式只有 $s_e$ 是未知的。通过对式(20)进行数值求解可以得到 $s_e$ 的值。将其值代入式(12)可得到 $\beta$ 的值,从而通过式(13)~(14)可得到 $R_{\min}$ 的值。根据式(17)和式(18)绘制出 $P_0P_2$ 段。通过对 $\phi$ 在 $(-\pi/4-\theta) \sim -\pi/4$ 进行遍历,利用式(19)绘制出圆形曲线的一半。最后,利用对称关系绘制出另一半的欧拉曲线和圆形曲线。

### 1.3 宽度与曲率双渐变弯曲光波导

曲率渐变可以减小直波导与弯曲波导连接处的模式失配损耗,而增大波导宽度可以使模式更好地被限制住,从而减小辐射损耗。因此,基于弯曲光波导曲率和波导宽度双渐变的设计思路,设计了弯曲光波导 I:内曲线为圆形弯曲和外曲线为欧拉-圆形弯曲的结构。其结构示意图如图3所示。图中, $w_{\min}$ 为最小宽度, $w_{\max}$ 为最

大宽度,  $d$  为圆心到欧拉-圆形曲线的距离,  $R_0$  是该结构的等效弯曲半径,  $R_1$  是欧拉-圆形弯曲的弯曲半径。

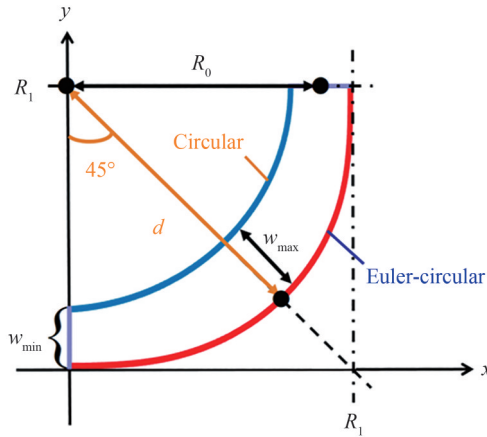


图3 弯曲光波导 I (内曲线为圆形弯曲和外曲线为欧拉-圆形弯曲) 的结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of bent optical waveguide I (inner curve: Circular bend, outer curve: Euler-circular bend)

弯曲光波导 I 设计结构参数包括: 等效弯曲半径  $R_0$ , 最小宽度  $w_{\min}$  和最大宽度  $w_{\max}$ 。如图 3 所示, 该结构内曲线为圆形弯曲线。当等效弯曲半径  $R_0$  和最小宽度  $w_{\min}$  确定时, 根据式 (21) 可以得出该圆形弯曲线的弯曲半径  $R_{\text{inner}}$ , 其半径为

$$R_{\text{inner}} = R_0 - w_{\min}/2 \quad (21)$$

从而绘制出弯曲光波导 I 的内曲线。

该结构的外曲线为欧拉-圆形曲线, 其等效弯曲半径为

$$R_1 = R_0 + w_{\min}/2 \quad (22)$$

根据欧拉-圆形的图形特性, 确定唯一的欧拉-圆形曲线还需要确定  $p$  值。不同  $p$  值下, 外侧曲线  $45^\circ$  对称点到等效弯曲半径圆心的距离  $d$  不同, 且  $p$  值和  $d$  值二者一一对应。由欧拉-圆形曲线的几何特性可得, 其关于过圆心的  $45^\circ$  直线对称, 内侧为圆形弯曲线, 结合最大宽度可得  $d$  的表达式为

$$d = R_0 - w_{\min}/2 + w_{\max} \quad (23)$$

通过式 (23) 确定  $d$  值后, 通过数值求解找到与此距离对应的  $p$  值, 从而唯一确定弯曲光波导 I 的外曲线-欧拉-圆形曲线。

采用类似弯曲光波导 I 的设计原理, 提出了另一种弯曲光波导 II: 内外曲线分别为欧拉-圆形弯曲线和欧拉弯曲线的弯曲光波导结构。其结构示意图如图 4 所示 (其中,  $w_{\min}$  为最小宽度,  $w_{\max}$  为最大宽度,  $d_0$  为圆心到欧拉-圆形曲线的距离,  $d$  为圆心到欧拉曲线的距离,  $R_0$  是该结构的等效弯曲半径,  $R_1$  是欧拉弯曲的弯曲半径)。

弯曲光波导 II 设计结构参数包括: 等效弯曲半径  $R_0$ , 最小宽度  $w_{\min}$  和最大宽度  $w_{\max}$ 。如图 4 所示, 该结构外曲线为欧拉曲线。当等效弯曲半径  $R_0$  和最小宽度  $w_{\min}$  已知时, 通过式 (8) 知可以唯一地绘制出欧拉曲线以作为弯曲光波导 II 的外曲线。当外曲线确定时, 可得其在  $45^\circ$  对称轴处和曲线的交点, 与等效弯曲半径圆心的距离  $d$ 。

该结构的内曲线为欧拉-圆形曲线, 其与起点间的距离为

$$d_0 = d - w_{\max} \quad (24)$$

同理于弯曲光波导 I 中欧拉-圆形曲线的绘制流程, 通过求解  $d(p) = d_0$  的方程可唯一确定  $p$  值, 从而获得内

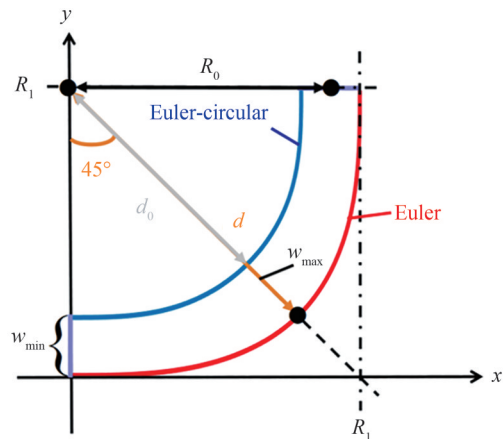


图4 弯曲光波导 II (内曲线为欧拉-圆形弯曲线和外曲线为欧拉弯曲线) 的结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of bent optical waveguide II (inner curve: Euler-circular bend, outer curve: Euler bend)

侧的欧拉-圆形曲线。

## 2 优化设计与仿真

本文使用有限时域差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD),并在 ANSYS Lumerical 公司提供的 光学仿真软件中建模和仿真。对于波导芯层宽度和厚度分别为 450 nm 和 220 nm 的 SOI 光波导,在中心 波长为 1 550 nm 处, $\text{SiO}_2$ 和 Si 的折射率分别为 1.444 和 3.477。对等效弯曲半径  $R_0=2 \mu\text{m}$  的弯曲光波导 I 和 II,首先通过在输出端口处设置透过率监视器以获得光在输出端口的透过率( $T$ ),再通过式  $\text{Loss} = -10\lg T$  计算得到光损耗。仿真得到了弯曲光波导最大宽度  $w_{\text{max}}$  与弯曲损耗的关系,如图 5 所示。图中可以看出,对于弯曲光波导 I 而言,当等效弯曲半径  $R_0=2 \mu\text{m}$  时,其最佳  $w_{\text{max}}$  值为  $0.625 \mu\text{m}$ ;对于弯曲光波导 II 而言,其最佳  $w_{\text{max}}$  值为  $0.56 \mu\text{m}$ 。

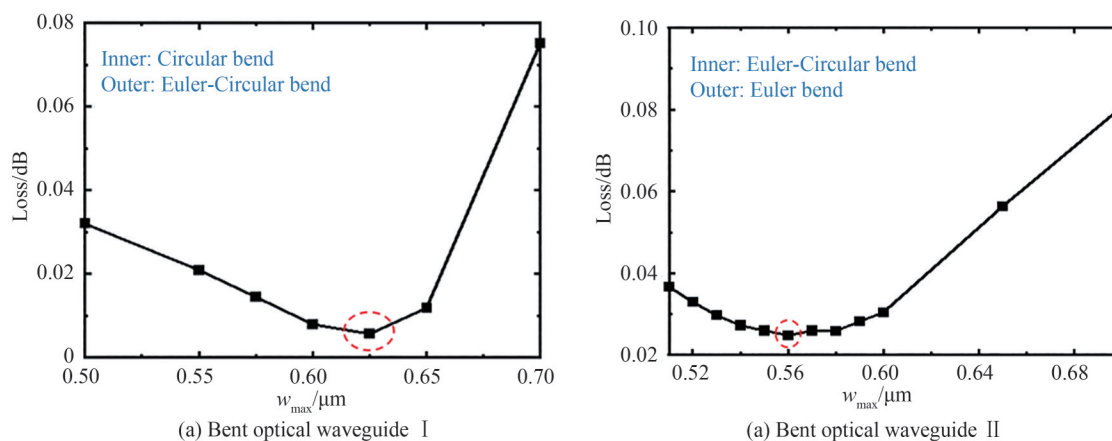


图 5 弯曲光波导 I-II 损耗与  $w_{\text{max}}$  的关系

Fig. 5 Relationship between  $w_{\text{max}}$  and loss of I-II in bent optical waveguide

采用同样方法,对不同等效弯曲半径  $R_0$  的弯曲光波导 I 和 II 的  $w_{\text{max}}$  值进行优化,得到的最佳  $w_{\text{max}}$  值分别如表 1 所示。

表 1 不同  $R_0$  的弯曲光波导 I 和 II 的最佳  $w_{\text{max}}$  值

Table 1 Optimum  $w_{\text{max}}$  values of bent optical waveguides I and II with different  $R_0$

$R_0/\mu\text{m}$	I $w_{\text{max}}/\mu\text{m}$	II $w_{\text{max}}/\mu\text{m}$
2	0.625	0.56
3	0.675	0.55
4	0.7	0.54
5	0.7	0.54

为了表现本设计的优越性,本文也在相同的仿真条件下,对已报道的圆形弯曲、欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲结构进行了仿真。针对不同等效弯曲半径  $R_0$ ,在中心波长为 1 550 nm 处,通过 3D-FDTD 分别对优化后的各种单模弯曲光波导进行仿真,仿真得到不同弯曲光波导损耗与等效弯曲半径  $R_0$  的关系曲线如图 6 所示,具体的弯曲损耗值如表 2 所示。

从表 2 可以清晰地看出,当  $R_0 \leq 3 \mu\text{m}$  时,所设计的弯曲光波导 I 的损耗最低;当  $R_0 > 3 \mu\text{m}$  时,所设计的弯曲光波导 II 的损耗最低。

从图 6 及表 2 中可以看出,弯曲光波导 I 和 II 的损耗随着  $R_0$  的增大而减小。当等效弯曲半径  $R_0$  为 2~5  $\mu\text{m}$  时,弯曲光波导 I 的损耗始终低于已报道的圆形弯曲、欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲结构。当  $R_0=2 \mu\text{m}$  时,其损耗值很小,在  $10^{-3}$  量级。当波导弯曲半径在 1~3  $\mu\text{m}$  时,弯曲损耗以模式失配损耗为主<sup>[23]</sup>。根据弯曲光波导 I 的结构特点可知,外侧引入的欧拉-圆形曲线保证了弯曲光波导的曲率变化较为平稳,因此在弯曲光波导任意截面前后的模场分布差异小,从而对弯曲光波导的模式失配损耗进行有效的控制;另一

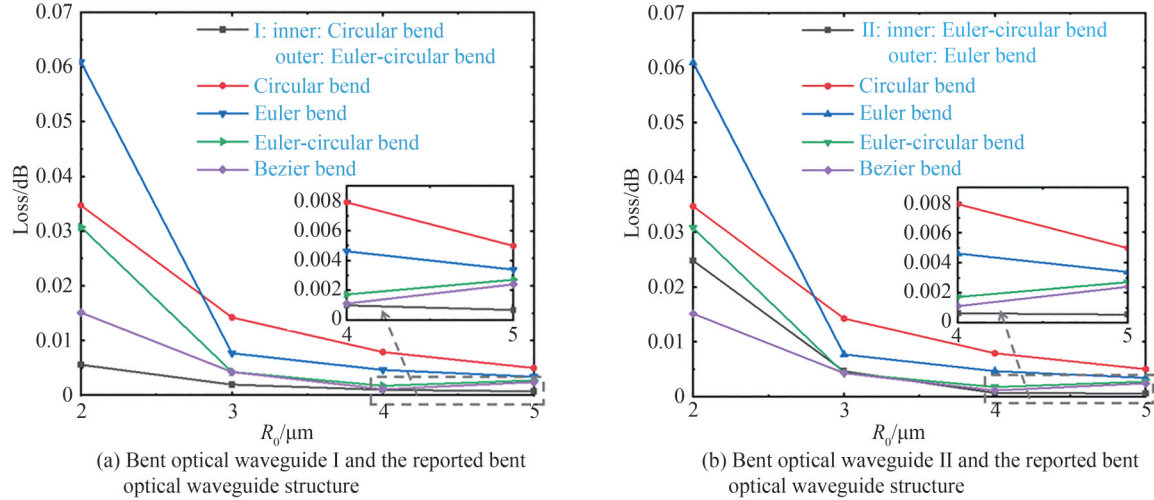
图6 弯曲损耗与 $R_0$ 的关系曲线Fig. 6 Relation curve between bending loss and  $R_0$ 

表2 硅基单模弯曲光波导的损耗

Table 2 Loss of silicon-based single mode bent optical waveguide

$R_0/\mu\text{m}$	Bend loss (dB/90°)					
	Circular bend	Euler bend	Euler-circular bend	Bezier bend	Waveguide I	Waveguide II
2	0.034 7	0.061 0	0.030 8	0.015 1	<b>0.005 6</b>	0.024 8
3	0.014 2	0.007 6	0.004 3	0.004 3	<b>0.001 9</b>	0.004 6
4	0.007 9	0.004 6	0.001 7	0.001 1	0.001 0	<b>0.000 6</b>
5	0.005 0	0.003 4	0.002 7	0.002 4	0.000 7	<b>0.000 5</b>

方面,在控制了模式失配损耗后,辐射损耗成为此时的主要损耗,其值较大的位置出现在 $45^\circ$ 对称轴处,通过在该位置增加波导宽度,可以提高对该处光场的束缚能力,从而有效降低辐射损耗。当波导弯曲半径在 $4\sim 10\ \mu\text{m}$ 时,模式失配损耗与辐射损耗比重接近<sup>[23]</sup>。对于弯曲光波导II,当 $R_0\geq 4\ \mu\text{m}$ 时,其损耗性能要比已报道的圆形弯曲、欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲结构的损耗性能更优,甚至超过了本文提出的弯曲光波导I。相较于圆形弯曲而言,所提出的弯曲光波导II在辐射损耗与模式失配损耗上均有优化,因此弯曲光波导II的损耗性能更优。相较于欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲以及贝塞尔弯曲结构而言,弯曲光波导II与它们在降低模式失配损耗上的策略和降低效果相当,不同的是弯曲光波导II在这三种结构的基础上通过增加光波导的宽度使得辐射损耗得到进一步降低,因此总体的损耗更小。弯曲光波导I和II在降低辐射损耗上的策略与降低效果相当,但弯曲光波导II因其能更好的降低模式失配损耗而获得了更优的损耗性能。

进一步地,当 $R_0=2\ \mu\text{m}$ 时,对于表2中曲率恒定、宽度为 $450\ \text{nm}$ 的圆形弯曲光波导和曲率渐变、宽度为 $450\ \text{nm}$ 的欧拉-圆形弯曲光波导,由曲率渐变引起的弯曲损耗降低量为 $0.003\ 9\ \text{dB}/90^\circ$ 。对于表2中宽度恒定、曲率渐变的欧拉-圆形弯曲光波导和本文所提出的曲率和波导宽度都渐变的弯曲光波导I和II,由波导宽度渐变引起的弯曲损耗降低量分别为 $0.025\ 2\ \text{dB}/90^\circ$ 和 $0.006\ \text{dB}/90^\circ$ 。可以看出,由波导宽度渐变引起的弯曲损耗降低量均大于由曲率渐变引起的弯曲损耗降低量。因此,当 $R_0=2\ \mu\text{m}$ 时,相比于曲率渐变,此时波导宽度渐变对于降低弯曲损耗的影响更大。同理,当 $R_0>2\ \mu\text{m}$ 时,通过表2可以发现圆形弯曲光波导到欧拉-圆形弯曲光波导的损耗优化值均大于欧拉-圆形弯曲光波导到弯曲光波导I和弯曲光波导II的损耗优化值,即由曲率渐变引起的弯曲损耗降低量大于由波导宽度渐变引起的弯曲损耗降低量。因此,当 $R_0>2\ \mu\text{m}$ 时,相比于波导宽度渐变,此时曲率渐变对于降低弯曲损耗的影响更大。

图7是在 $R_0=2\ \mu\text{m}$ 时,通过3D-FDTD仿真得到的弯曲光波导的TE基模输入时,波导内的电场分布图。需要注意的是,图中电场强度值已取对数。图中可见,当 $R_0=2\ \mu\text{m}$ 时,弯曲光波导I在弯曲处辐射场最不明显,对应于最小的辐射损耗。但由于在弯曲光波导中,波导宽度影响辐射损耗,而宽度及曲率均会影响模式失配损耗,二者无法分离,因此此处仅进行定性分析。

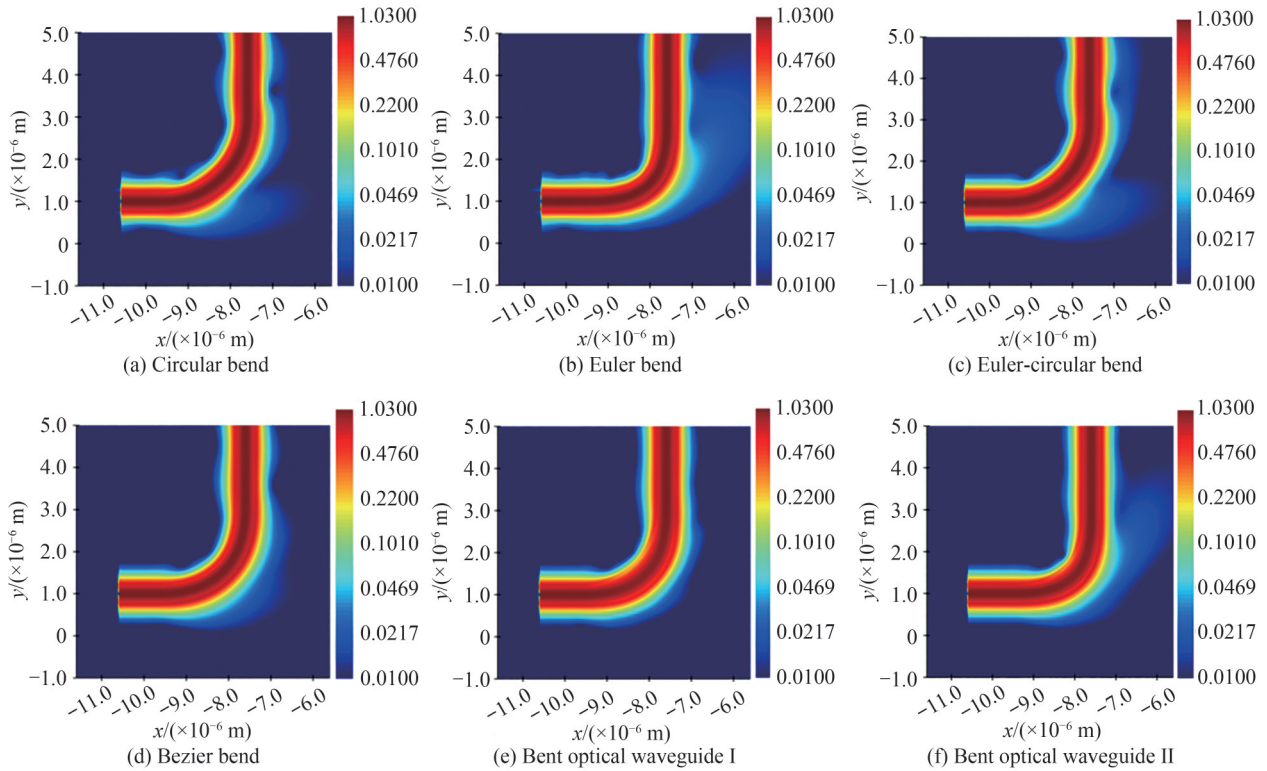


图7 弯曲光波导的电场分布  
Fig. 7 Electric field distribution of bent optical waveguide

另外,弯曲光波导损耗的波长相关性也非常重要,本文对  $R_0=2\ \mu\text{m}$  的各种单模弯曲光波导在  $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$  波段范围的损耗的波长相关性进行了仿真,得到的损耗与波长的关系图如图8所示。

从图8中可以看出,当  $R_0=2\ \mu\text{m}$  时,弯曲光波导 I 损耗的波长相关性最小。相对于已报道的圆形弯曲、

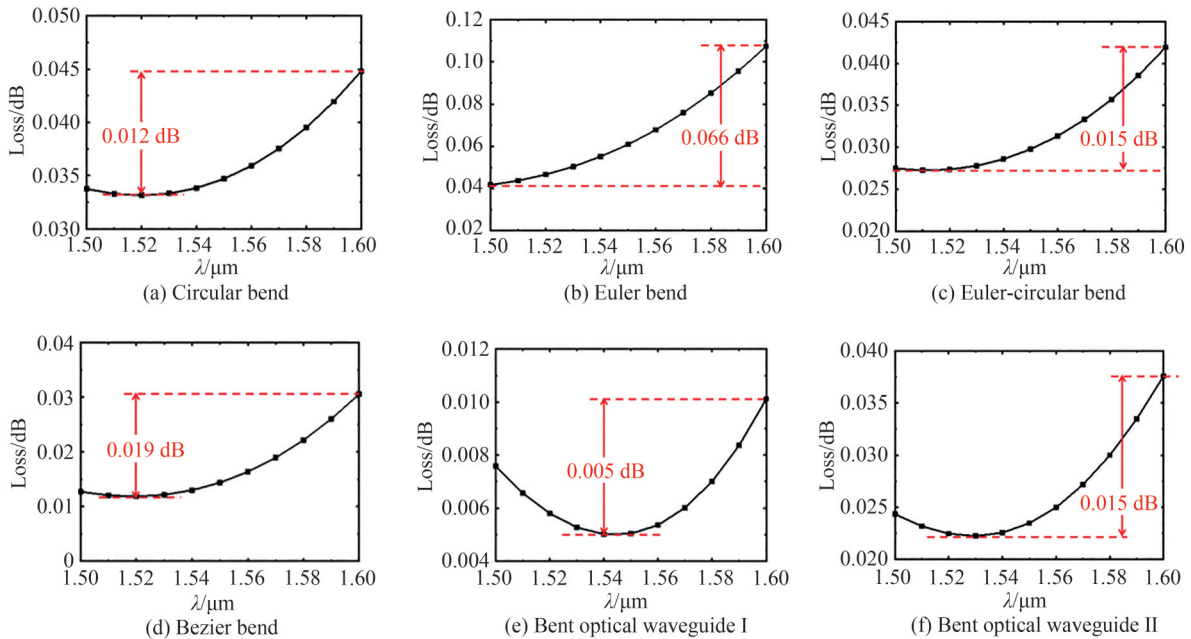


图8 单模弯曲光波导的损耗与波长的关系  
Fig. 8 Diagram of loss and wavelength in a single mode bent optical waveguide



欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲而言,弯曲光波导Ⅱ损耗的波长相关性也处于较低水平。这可能是由于波导宽度增加使得波导传输的色散降低,从而使整个损耗的波长相关性更小。

### 3 结论

基于小尺寸、低损耗的弯曲光波导设计目标,本文提出并优化了内、外曲线分别为圆形弯曲和欧拉-圆形弯曲曲线的弯曲光波导Ⅰ和内、外曲线分别为欧拉-圆形弯曲和欧拉弯曲曲线的弯曲光波导Ⅱ。仿真结果表明,当等效弯曲半径 $R_0$ 为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 时,弯曲光波导Ⅰ的损耗均小于已报道的圆形弯曲、欧拉弯曲、欧拉-圆形弯曲和贝塞尔弯曲光波导。特别地,在 $R_0=2\ \mu\text{m}$ 时,可得到损耗值仅为 $0.0056\ \text{dB}/90^\circ$ 的弯曲光波导,其损耗的波长相关性也较低。当 $R_0=4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 时,弯曲光波导Ⅱ的损耗比上述弯曲光波导的损耗低一个量级。综上,本文所提出的弯曲光波导Ⅰ和Ⅱ具有小尺寸、低损耗的优点,且在未来的紧凑型大规模集成光子芯片中具有较大的应用潜力。

#### 参考文献

- [1] VLASOV Y A. Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100G[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): s67-s72.
- [2] CHENG Q, BAHADORI M, GLICK M, et al. Recent advances in optical technologies for data centers: a review[J]. Optica, 2018, 5(11): 1354.
- [3] BLAND-HAWTHORN J, KERN P. Astrophotonics: a new era for astronomical instruments[J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1880-1884.
- [4] NORRIS B, BLAND-HAWTHORN J. Astrophotonics: the rise of integrated photonics in astronomy[J]. Optics and Photonics News, 2019, 30(5): 26.
- [5] CIMINELLI C, DELL'OLIO F, CONTEDEUCA D, et al. Silicon photonic biosensors[J]. IET Optoelectronics, 2019, 13(2): 48-54.
- [6] JANS H, O'BRIEN P, ARTUNDO I, et al. Integrated bio-photonics to revolutionize health care enabled through PIX4life and PIXAPP[C]. SPIE, 2018.
- [7] TALEBI FARD S, GRIST S M, DONZELLA V, et al. Label-free silicon photonic biosensors for use in clinical diagnostics[C]. SPIE, 2013.
- [8] HAINBERGER R, MUELLNER P, NEVLACSIL S, et al. Silicon-nitride waveguide-based integrated photonic circuits for medical diagnostic and other sensing applications[C]. SPIE, 2019.
- [9] LENZINI F, GRUHLER N, WALTER N, et al. Diamond as a platform for integrated quantum photonics[J]. Advanced Quantum Technologies, 2018, 1(3): 1800061.
- [10] QIAN Y, KIM S, SONG J, et al. Compact and low loss silicon-on-insulator rib waveguide 90 degrees bend[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 6020-6028.
- [11] SOLEHMAINEN K, AALTO T, DEKKER J, et al. Development of multi-step processing in silicon-on-insulator for optical waveguide applications[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2006, 8(7): S455-S460.
- [12] SHEN H, FAN L, WANG J, et al. A taper to reduce the straight-to-bend transition loss in compact silicon waveguides [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(15): 1174-1176.
- [13] SMIT M K, PENNING S E C M, BLOK H. A normalized approach to the design of low-loss optical waveguide bends [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(11): 1737-1742.
- [14] DAI D, SHI Y. Deeply etched  $\text{SiO}_2$  ridge waveguide for sharp bends[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 5019-5024.
- [15] SEO C, CHEN J C. Low transition losses in bent rib waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(10): 2255-2259.
- [16] BAZARGANI H P, FLUECKIGER J, CHROSTOWSKI L, et al. Microring resonator design with improved quality factors using quarter Bezier curves[J]. OSA, 2015.
- [17] VOGELBACHER F, NEVLACSIL S, SAGMEISTER M, et al. Analysis of silicon nitride partial Euler waveguide bends[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31394-31604.
- [18] CHERCHI M, YLINEN S, HARJANNE M, et al. Dramatic size reduction of waveguide bends on a micron-scale silicon photonic platform[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17814-17823.
- [19] JIANG X, WU H, DAI D. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17680-17689.
- [20] FUJISAWA T, MAKINO S, SATO T, et al. Low-loss, compact, and fabrication-tolerant Si-wire  $90^\circ$  waveguide bend using clothoid and normal curves for large scale photonic integrated circuits[J]. Optics Express, 2017, 25(8):

9150–9159.

- [21] CHEN T, LEE H, LI J, et al. A general design algorithm for low optical loss adiabatic connections in waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22819–22829.
- [22] BOGAERTS W, SELVARAJA S K. Compact single-mode silicon hybrid rib/strip waveguide with adiabatic bends[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(3): 422–432.
- [23] BAHADORI M, NIKDAST M, CHENG Q, et al. Universal design of waveguide bends in silicon-on-insulator photonics platform[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3044–3054.
- [24] SONG J H, KONGNYUY T D, De HEYN P, et al. Low-loss waveguide bends by advanced shape for photonic integrated circuits[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(12): 3273–3279.

## Design of Low Loss Silicon Waveguide Bend with Width and Curvature Variations

ZHOU Yue, SUN Yaohui, WU Haoyu, LU Mengjia, HU Guohua,  
YUN Binfeng, CUI Yiping

(Advanced Photonics Center, School of Electronic Science and Engineering, Southeast University,  
Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As a newly-developing direction, integrated optics have played a strong role in promoting astronomy, biosensing, quantum computing, etc. Silicon photonics is very promising since silicon has several metrics, such as transparency in the main communication bands, high refractive index contrast for high density integration, compatibility with Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) process for volume production and so on. Silicon waveguide bend is one of the important components for silicon photonics. Although the loss of a single silicon waveguide bend is relatively small, the accumulative effect in a large-scale integrated optical circuit can enhance the total loss and may lead to a significant deterioration of the device's performance. Usually, increasing the bend radius of silicon waveguide bends can effectively reduce the loss, but this will degrade the integration density of the chip. It is very important to achieve silicon waveguide bends with compact size and low loss simultaneously. Some solutions to achieve this goal for silicon waveguide bends have been proposed, such as introducing deep etching slots or introducing offset on straight optical waveguides, which have small fabrication tolerance and are difficult to fabricate. In contrast, the special curve-based waveguide bend does not require special fabrication processes and has good process compatibility.

The Euler curve, as a special curve used in optical waveguide bends, has a gradual change in curvature from 0 to the maximum value. This scheme effectively reduces the mode mismatch loss between a straight optical waveguide and a bent optical waveguide. In addition, the mode evolution within the bent optical waveguide is limited at the same time. Thus, the overall loss of the bent optical waveguide can be optimized well. However, when the curvature of the Euler curve grows to a maximum value, the corresponding radius of curvature reaches a minimum, where a large radiation loss will exist.

As known, by widening the width of the waveguide, the confinement of the optical field can be enhanced, which is an effective way to decrease the radiation loss. To achieve a smaller size and a lower loss, two silicon-based single-mode 90° waveguide bend structures based on different inner and outer curves to realize width gradient are proposed in this paper. The waveguide bend I consists of a circular inner curve and an Euler-circular outer curve, and the waveguide bend II combines an Euler-circular inner curve and an Euler outer curve. On the one hand, according to the variability of the radius of curvature of the inner and outer curves, the curve proportion of the Euler-circular curve can be adjusted by optimizing the design parameters accordingly, making the width inside the waveguide bend changes gradually to effectively reducing the radiation loss. On the other hand, the curvature of an Euler-circular curve or an Euler curve in waveguide bend I and II increases from zero, which reduces the mode mismatch loss at the connections of the straight optical waveguides and the bent optical waveguides, further decreasing the bending loss. In terms of fabrication, the proposed structure has no special process requirements and is easy to fabricate.

The proposed two silicon waveguide bend structures are simulated and optimized by three dimensional finite difference time domain (3D-FDTD) method. The simulation results show that the loss of the waveguide bend I is smaller than those of the circular bend, Euler bend, Euler-circular bend, and Bezier bend when the equivalent bending radius  $R_0$  is in the range of 2 to 5  $\mu\text{m}$ . In particular, when  $R_0=2 \mu\text{m}$ , a silicon waveguide bend with bending loss of only 0.005 6 dB/90° is obtained, and low wavelength dependence of the loss is achieved. When  $R_0=4 \mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$ , the loss of the waveguide bend II is also one order of magnitude lower than the above mentioned waveguide bends. In summary, the proposed silicon waveguide bend I and II have the advantages of compact size and low loss, which are very promising for future applications in compact and large-scale silicon photonic chips.

**Key words:** Silicon on insulator; Optical waveguide bend; Curvature variation; Width variation; Low bending loss

**OCIS Codes:** 230.3120; 130.3120; 130.2790; 130.1750; 130.5990