

太赫兹边缘耦合器的研究

罗远大

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月21日; 录用日期: 2024年5月21日; 发布日期: 2024年5月29日

摘要

硅基集成平台具有较高的折射率差, 非常适用于大规模、小尺寸、高密度器件的集成。本文提出了一种新型的太赫兹边缘耦合器, 该研究旨在实现高效的太赫兹波在波导中的耦合和传输, 为太赫兹波在集成芯片中的应用提供了重要基础。通过设计和制备边缘耦合器件, 本研究放宽了水平对准容差的要求, 提高了太赫兹波与波导之间的耦合效率。工作波长在180~200 GHz范围, 通过改变输入光的波长可以输出不同强度的能量。所提出的器件减小了实现高耦合效率所需的水平对准容差, 并适用于被动对准组装。实验结果显示, 该边缘耦合器件具有良好的性能和制造可扩展性。

关键词

太赫兹, 耦合器, 集成波导

Research on Terahertz Edge Coupler

Yuanda Luo

School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 21st, 2024; accepted: May. 21st, 2024; published: May. 29th, 2024

Abstract

The silicon-based integrated platform has a high refractive index difference and is very suitable for the integration of large scale, small size and high density devices. In this paper, a new terahertz edge coupler is proposed, which aims to realize efficient terahertz wave coupling and transmission in waveguides, and provides an important basis for the application of terahertz waves in integrated chips. By designing and fabricating edge couplers, the requirement of horizontal alignment tolerance is relaxed, and the coupling efficiency between terahertz wave and waveguide is improved. The operating wavelength is in the range of 180~200 GHz, and different intensity of energy can be output by changing the wavelength of the input light. The proposed device reduces

文章引用: 罗远大. 太赫兹边缘耦合器的研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2881-2887.

DOI: 10.12677/mos.2024.133261

the horizontal alignment tolerance required to achieve high coupling efficiency and is suitable for passive alignment assembly. The experimental results show that the edge-coupled device has good performance and manufacturing scalability.

Keywords

Terahertz, Coupler, Integrated Waveguide

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波段指的是频率范围在 0.1 到 10 THz 之间的电磁波,对应的波长范围是 3 mm 至 30 μm 。太赫兹波位于微波和红外之间,处于电子学和光子学之间的过渡阶段[1]。在 20 世纪 80 年代之前,尽管在微波和红外领域取得了一定进展,但对太赫兹波段的研究仍然相对不足,主要是由于缺乏太赫兹波的源和检测手段,这使得对太赫兹波辐射性质的全面研究受到了限制,因此出现了所谓的太赫兹间隙[2]。近年来,随着光电子技术和半导体加工技术的进步,相关的太赫兹辐射源设备和检测设备得到了迅速发展,推动了太赫兹科学技术的蓬勃发展。太赫兹波在电磁波谱中的地位相对特殊,相比其他波段具有更加独特的电磁特性[3]。随着太赫兹技术受到研究人员的重点关注并得到迅速发展,人们开始认识到太赫兹波在安检技术[4]、生物医疗[5]、通信技术[6]以及军用和太空领域[7] [8]有着广阔的前景。

近些年以来,国内外众多科研工作者投入到太赫兹领域中,促进了太赫兹领域相关器件的发展,太赫兹器件的材料有很多种,如石墨烯、石英、硅、蓝宝石等。本文选择硅及其衍生物作为太赫兹器件的材料,因为科研人员对其有很深的了解,积累了大量的技术经验和完善的工艺产业能力。在太赫兹领域中,硅材料具有许多优势,例如:硅具有较低的损耗和较高的折射率,对光的限制作用较强,硅基集成芯片采用的耦合方式多样,可以直接在芯片上进行测试,从而大大降低了芯片的测试成本等。

边缘耦合[9] [10]是一种光学耦合技术,通常用于将光从一个光学波导(通常是光纤或波导)传输到另一个,基本原理是通过将光波导的边缘与另一个光学元件(如另一波导或光纤)接触,实现光的传输。这可以通过光波导的一侧接触到目标元件的侧面或端面来实现。边缘耦合的耦合效率通常取决于波导之间的几何形状、折射率差异以及对准精度。在一些情况下,为了提高耦合效率,可能需要使用适当的耦合器件,如透镜或光栅。边缘耦合技术广泛应用于光纤通信、光学传感器、集成光子学器件等领域。在集成光子学中,边缘耦合可用于将光从一块芯片传输到另一块芯片,或者从芯片传输到外部光纤。

在传统的边缘耦合结构中,接收波导被设计为单模态。当波导模式的场分布与光源的轮廓匹配时,可以实现高耦合效率[11]。当光源的中心与耦合波导的中心完全对准时,这个条件可以得到很好的满足。然而两个元素之间的错位会导致耦合效率降低。通过在芯片上在平面尺寸上扩展光束,例如通过将波导变宽至远大于激光束的宽度来减少对横向错位的敏感度。不过这会导致在完全对准时插入效率降低。因此,在简单的边缘耦合情况下,峰值插入效率和对准容差这两个指标相互抵消。在系统中,输入光束的自由度,即其中心位置,必须通过接收芯片上的光束的一个自由度来适应,以保持高插入效率。本文提出一种太赫兹波段的边缘耦合器,器件减小了实现高耦合效率所需的水平对准容差,并适用于被动对准组装。具有几乎相同的功率耦合效率,但具有可变的相对相位,以适应激光二极管和耦合器件之间的

横向错位，并适用于平行光学发射机的实现。

2. 耦合器的耦合原理

光波导在硅基光子集成芯片中扮演着至关重要的角色，它是实现光传输与光互连的基本组件。对光波导的常用分析方法包括几何光学理论和波动光学理论。几何光学理论适用于简单直观地分析光在波导中的基本传输特性。在理想情况下，光波导的模式满足正交性和完备性，各模式独立传播，不存在能量交换。但在非理想情况下，会发生模式之间或不同波导之间的光场能量转移，即模式耦合[12]现象。为了解决光波导的耦合问题，通常采用耦合模理论进行分析。

纵向耦合通常用于波导之间的对接，例如光纤与波导、激光器与波导之间的耦合等。这里以圆柱形波导为例，通过耦合模理论来分析两个波导之间的纵向耦合过程。如图 1 所示是两个波导之间的纵向耦合，波导 1 耦合进波导 2。假设波导 1 有效折射率为 n_1 ，半径为 r_1 ，波导中的光场表示为 $E_1(x, y)$ ；波导 2 的有效折射率为 n_2 ，半径为 r_2 ，光场表示为 $E_2(x, y)$ 。



Figure 1. Coupling diagram

图 1. 耦合示意图

假设输入光近似高斯光束，偏振方向为 x 方向，则输入光场表示为[13]：

$$E_1 = E_1^x x = xR(r) \exp(jn_1 k_0 z) \quad (1)$$

其中， $R(r)$ 为径向光场的分布函数，由于输入光场是高斯光束，则：

$$R(r) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right] \quad (2)$$

我们假设高斯光束的束腰半径与入射波导半径相同，即为 r_1 。则入射光的总功率为：

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{4} \iint_{\infty} (E_1 \times H_1^* - H_1 \times E_1^*) dS \\ &= \frac{\pi}{2} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{\frac{1}{2}} n_1 r_1^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中， H 是光波的磁场分量，满足：

$$H_1 = H_1^y y = n_1 \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{\frac{1}{2}} z \times E_1 \quad (4)$$

当入射光到达两个波导的分界面时，由于两个波导的有效折射率不同，就会发生折射率的突变，导致光波在分界面处发生透射和反射。透射光将进入输出波导，激发基模、高阶模、辐射模等多种模式。为确保输出波导中仅存在基模，输出波导通常被设计为单模结构。反射光则会重新反射回输入波导中，影响输入波导的原始光场分布，从而对波导间的耦合效率产生影响。这种反射会引起波导内的多模干涉，可能导致输出波导中的模式混叠。为了最大程度地保持单模输出，需要采取一些措施，如设计合适的波导结构、引入适当的折射率匹配层等，以减少反射光的影响，确保输出波导中只有所需的基模存在。这

样可以提高波导间的耦合效率，保持光信号的纯度和稳定性。因此，入射光到达分界面处的光场表示为：

$$E_1(x, y) = \sum_j A_j E_2^j(x, y) + E_2^r(x, y) \quad (5)$$

其中， $E_2^j(x, y)$ 表示输出波导中的第 j 阶模， A_j 表示第 j 阶模的振幅， $E_2^r(x, y)$ 表示辐射模。假设分界面处的偏振不发生改变，则：

$$A_j = \frac{\iint_{\infty} (E_1 \times H_2^{j*}) dS}{\iint_{\infty} (E_2^j \times H_2^{j*}) dS} = \frac{\iint_{\infty} E_1^x E_{2-x}^{j*} dS}{\iint_{\infty} |E_{2-x}^{j*}|^2 dS} \quad (6)$$

输出波导中被激发的第 j 阶模式的功率为：

$$\begin{aligned} P_2^j &= \iint_{\infty} (A_j E_2^j) \times (A_j H_2^j)^* \cdot dS = |A_j|^2 \iint_{\infty} (E_1 \times H_2^j) \cdot dS \\ &= \frac{n_2}{2} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left| \iint_{\infty} E_1^x E_{2-x}^{j*} dA \right|^2}{\iint_{\infty} |E_{2-x}^{j*}|^2 dA} \end{aligned} \quad (7)$$

其中， E_{2-x}^j 表示输出波导中第 j 阶模式在偏振方向 x 的电场分量。我们假设输出波导中只支持基模传输，并且场分布为高斯光束，则输出波导中的第 j 阶模式在偏振方向 x 的电场分量为：

$$E_2^j = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \right] \quad (8)$$

另外，假设 $n_1 = n_2$ ，即输入和输出的波导有相同的有效折射率，则两个波导之间的纵向耦合的耦合效率为：

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{2r_1 r_2}{r_1^2 + r_2^2} \right)^2 \quad (9)$$

由上式可知，当 $r_1 = r_2$ 时，即输入光束的模斑半径与输出光束的模斑半径相同时，耦合效率等于 1；否则模式失配，耦合效率小于 1 [14]。所以，模式失配和波导之间的有效折射率差是影响波导端面对接耦合效率的主要原因。

3. 边缘耦合器的设计与仿真

3.1. 器件设计

边缘耦合器主要由波导和包层两部分组成，硅基的边缘耦合器是以硅材料为波导介质。本文在文献 [15] 的基础上设计了太赫兹波段的边缘耦合器。选取频段 180~200 GHz 作为此器件的工作频段，在这些工作条件下，光场能很好的在波导中传输。首先通过 SolidWorks 建模软件对波导和包层进行建模，我们设计了一个长 $h = 124.2$ mm，宽 $w = 16.88$ mm，高 $h = 10$ mm 的空气包层，并在其中设计硅波导，两侧波导的间距分别为 $d_1 = 2$ mm， $d_2 = 10$ mm，这样在两个波导之间给出相对相位，可以减小水平对准容差。周围的包层设置为空气，对于波导的边缘耦合设计方案通常选择一个逆锥形，逐渐减小波导宽度远低于芯片截面的单模条件。这种减小允许波导模式的扩展，以匹配激光束在垂直和水平方向上的尺寸，从而实现高耦合效率 [16]。所以本设计也是基于逆锥形，向边缘逐渐减小波导宽度以提高耦合效率，如图 2 所示。

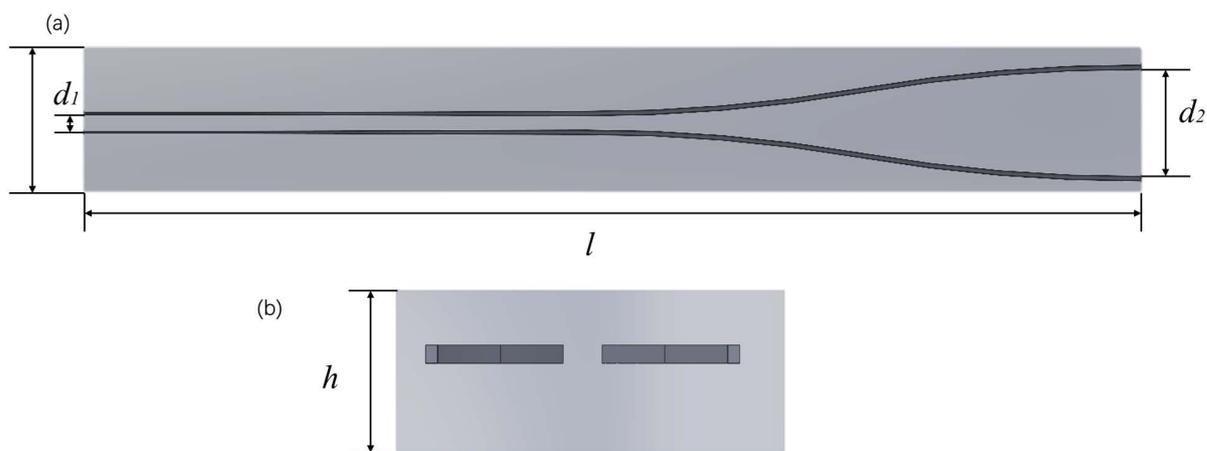


Figure 2. (a) Overhead structure diagram of the edge coupler; (b) Side view structure diagram of the edge coupler
图 2. (a) 边缘耦合器件的俯视结构图; (b) 边缘耦合器件的侧视结构图

3.2. 器件仿真

将上述结构导入 FDTD 仿真软件对其进行电磁场的仿真，导入的三维结构如图 3 所示。包层设置为空气，折射率设为 1，将波导设置为硅，折射率设为 3.42，并在两波导之间设置光源，频率设置为 180 GHz。

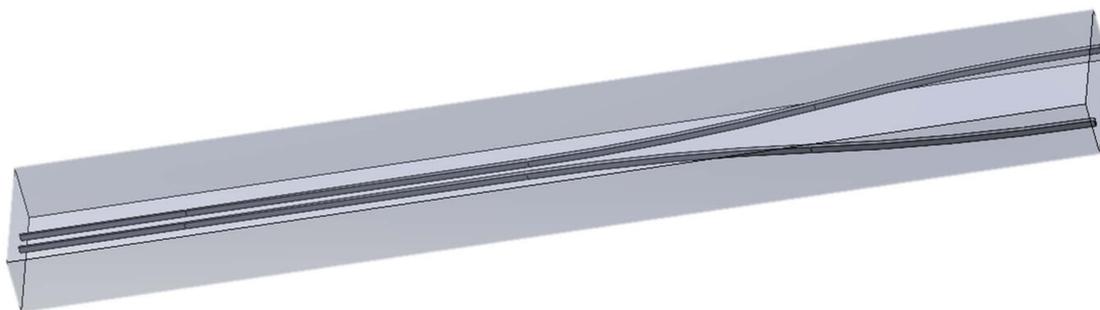


Figure 3. 3D structure diagram of edge coupler
图 3. 边缘耦合器的三维结构图

仿真结果如图 4 所示，展示了 180 GHz 频率下边缘耦合器仿真后的电场分布。从图中可以看出，输入光场经过耦合器后，基本实现了均匀分光，这意味着光能够有效地从波导中输出到目标区域。通过观察右侧的监视器，进一步验证了此结论。

为了了解其性能，我们绘制了边缘耦合器在 180 GHz 频率下的功率图。结果如图 5 所示。右侧的监视器显示了光场在相应区域的功率强度分布情况。通过分析监视器记录的数据，可以确定光场在左右两侧的输出是否均匀，并且确认边缘耦合器的性能是否符合预期。综合图 4 和图 5 监视器的数据，可以得出边缘耦合器在目标频率范围内的性能良好，基本能够实现光场的有效耦合和分配。

最后我们仿真扫描了 180 GHz 至 200 GHz 频段，通过处理波导两端的功率数据，并通过公式 $\eta = \frac{P_1}{P_2}$

可以计算出边缘耦合器在不同频率下的耦合效率，并将结果绘制成图 6， P_1 为输出端口的功率， P_2 为输入端口的功率。从图中可以观察到，在 180 GHz 时，空气包层中的效率最高能达到 42% 左右。此结果对于设备的性能优化和应用选择提供了重要信息。这种频率依赖的耦合效率可能受到波导尺寸、材料特性和设计参数等因素的影响。因此，根据这些结果，我们可以进一步调整和优化边缘耦合器的设计参数，

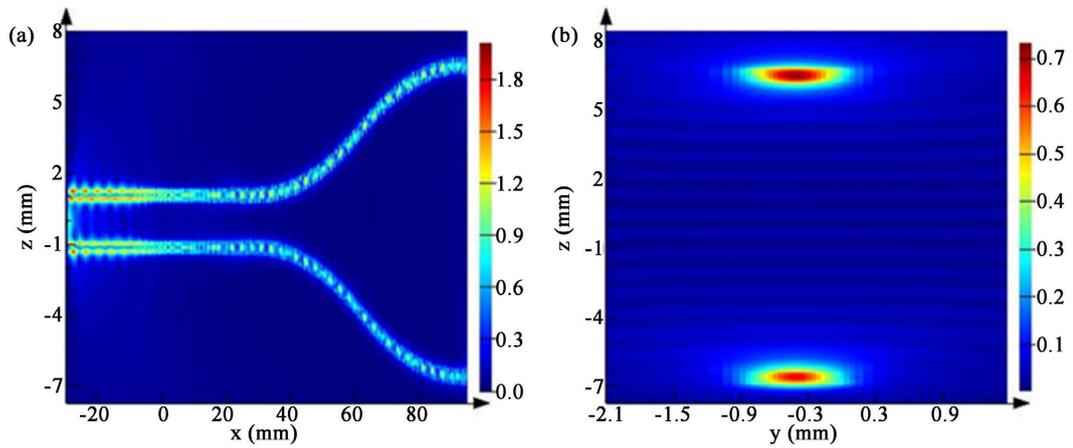


Figure 4. (a) Overlooking electric field diagram of the air cladding edge coupler; (b) electric field diagram of the right side of the air cladding edge coupler

图 4. (a) 边缘耦合器件俯视电场图; (b) 边缘耦合器件右侧电场图

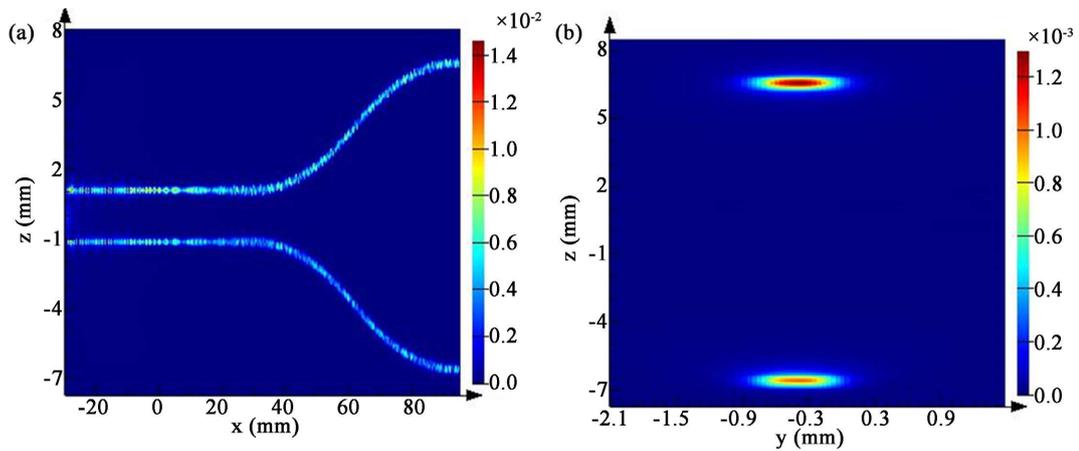


Figure 5. (a) Overhead power diagram of the air cladding edge coupler; (b) Overhead power diagram of the air cladding edge coupler

图 5. (a) 边缘耦合器件俯视功率图; (b) 边缘耦合器件右侧功率图

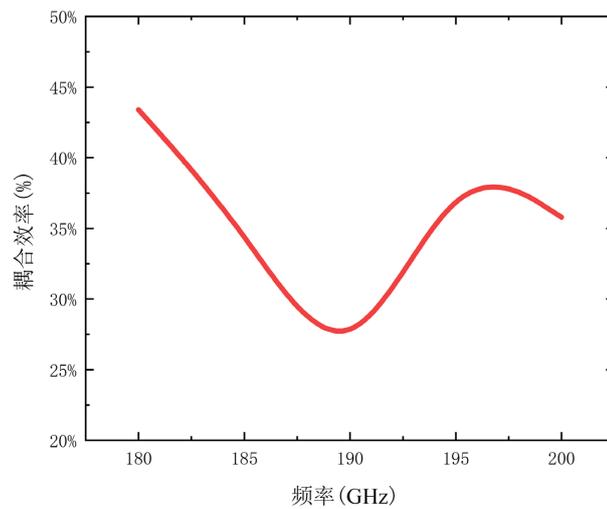


Figure 6. Efficiency diagram of edge coupler

图 6. 边缘耦合器件的效率图

以提高其在目标频段的性能。同时，这也提示了我们在选择工作频率时，需要考虑光场在波导中的传输特性，以及波导与外部环境的耦合效率。

4. 结论

本文通过耦合理论以及 FDTD solution 仿真软件的结合，设计出应用于太赫兹波段的边缘耦合器，通过逆锥形结构提高了耦合效率，通过观察其电场以及功率分布，确定其仿真电场传输的可行性，之后对其在 180~200 GHz 频段进行扫描优化并计算其耦合效率，得出了在 180 GHz 左右，器件的性能可达到最高效率约为 42%。仿真结果验证了所提方法的有效性，这种方法为之后在太赫兹波段的边缘耦合提供了新的思路。

参考文献

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006(1): 7-12.
- [2] Nagatsuma, T. (2009) Generating Millimeter and Terahertz Waves. *IEEE Microwave Magazine*, **10**, 64-74. <https://doi.org/10.1109/MMM.2009.932283>
- [3] 梁培龙, 戴景民. 太赫兹科学技术的综述[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(6): 1-8.
- [4] Takida, Y., Nawata, K. and Minamide, H. (2021) Security Screening System Based on Terahertz-Wave Spectroscopic Gas Detection. *Optics Express*, **29**, Article 2529. <https://doi.org/10.1364/OE.413201>
- [5] Yu, L., Hao, L., Tang, M., *et al.* (2019) The Medical Application of Terahertz Technology in Noninvasive Detection of Cells and Tissues: Opportunities and Challenges. *RSC Advances*, **9**, 9354-9363. <https://doi.org/10.1039/C8RA10605C>
- [6] Sung, M., Moon, S.-R., Kim, E.-S., *et al.* (2021) Design Considerations of Photonic THz Communications for 6G Networks. *IEEE Wireless Communications*, **28**, 185-191. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100002>
- [7] Yang, Q., Qin, Y., Zhang, K., *et al.* (2017) Experimental Research on Vehicle-Borne SAR Imaging with THz Radar: *Microwave and Optical Technology Letters*, **59**, 2048-2052. <https://doi.org/10.1002/mop.30668>
- [8] Ding, Y., Shi, X., Gao, S., *et al.* (2017) Analysis of Tracking-Pointing Error and Platform Vibration Effect in Inter-Satellite Terahertz Communication System. *Chinese Automation Congress (CAC)*, **2017**, 430-434. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8242806>
- [9] Bock, P.J., Cheben, P., Schmid, J.H., *et al.* (2010) Subwavelength Grating Periodic Structures in Silicon-On Insulator: A New Type of Microphotonic Waveguide. *Optics Express*, **18**, 20251-20262. <https://doi.org/10.1364/OE.18.020251>
- [10] Ren, G., Chen, S., Cheng, Y., *et al.* (2011) Study on Inverse Taper Based Mode Transformer for Low Loss Coupling between Silicon Wire Waveguide and Lensed Fiber. *Optics Communications*, **284**, 4782-4788. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.05.072>
- [11] Snyderand, A.W. and Love, J.D. (1983) *Optical Waveguide Theory*. Chapman & Hall, London.
- [12] 周治平. 硅基光电子[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [13] 伍晓明, 章燕申. 高斯光束-光波导的耦合[J] 光电子激光, 2002(2): 162-164.
- [14] 赵浩. 硅基单片集成芯片中III-V族半导体激光器输出光耦合结构的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021
- [15] Romero-Garcia, S., Marzban, B., Merget, F., *et al.* (2014) Edge Couplers with Relaxed Alignment Tolerance for Pick-and-Place Hybrid Integration of III-V Lasers with SOI Waveguides. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**, 369-379. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2292523>
- [16] Shoji, T., Tsuchizawa, T., Watanabe, T., *et al.* (2002) Low Loss Mode Size Converter from 0.3 μm Square Si Wire Waveguides to Single Mode Fibres. *Electronics Letters*, **3**, 1669-1670. <https://doi.org/10.1049/el:20021185>