

波导光栅中引入缺陷的影响机制研究

王腾蛟

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

为了研究波导光栅在引入缺陷时所产生的影响, 丰富硅基集成器件参数的调控机制, 通过有限时域差分法, 仿真分析了波导光栅分别在引入对称和非对称米氏散射体结构形成缺陷时所造成的影响。仿真结果表明: 对于对称的米氏散射体, 槽刻蚀的深度控制反射的幅度, 深度越大, 反射越强, 当其为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时反射率达到0.0268, 但需注意避免槽刻蚀深度过大导致导波模式损耗; 对于非对称米氏散射体, 透射率较高, 峰值为0.8561, 槽刻蚀深度所造成的影响与对称米氏散射体类似, 但是会导致缺陷左右两侧 r_1 和 r_2 的反射系数不同, 引入非互易耦合。此类具有可控缺陷结构的波导光栅为新型硅基集成器件开发提供了多功能平台, 可提升高灵敏度传感器检测极限等关键性能指标, 并拓展片上功能元件的应用场景。

关键词

高阻硅, 波导光栅, 散射体, 缺陷结构

Study on the Mechanism of Defect Introduction in Waveguide Gratings

Tengjiao Wang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

In order to study the effect of introducing defects in waveguide gratings and extend the reference range of design parameters of silicon-based integrated devices, the effects of introducing defects in symmetric and asymmetric Mie scatterers are simulated and analyzed by finite-difference time-domain method. The simulation results show that the depth of the groove etch controls the amplitude of reflection for symmetric Mie scatterers. The greater the depth, the stronger the reflection. When the depth

reaches 200 μm , the reflectance is 0.0268, but attention should be paid to avoid the loss of guided wave mode caused by excessive groove etch depth. For asymmetric Mie scatterers, the transmittance is high, with a peak value of 0.8561. The effect of groove etching depth is similar to that of symmetric Mie scatterers, but the reflection coefficients of r_1 and r_2 on the left and right sides of the defect are different, and non-reciprocal coupling is introduced. The influence of different structural defects can provide a design basis for terahertz communication and high-sensitivity sensors.

Keywords

High Resistance Silicon, Waveguide Grating, Scatterer, Defective Structure

Copyright © 2025 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

硅材料在太赫兹波段相较于其他材料具有低损耗、可集成、支持多种模式、工艺成熟等优势[1], 现被广泛运用于滤波器、传感器、调制器、超透镜等集成器件[2]-[5], 为电子和光子器件的片上集成提供了保障。硅波导通常以微孔结构波导、光子晶体、条形波导、平板波导和脊型波导的形式制备, 其中脊型波导相较于其他各类型结构, 其强场限制能力强、支持宽带宽、传导损耗较低、集成起来更加紧凑, 常见的硅基集成器件, 如光子滤波器[6]和微环光开关[7], 都采用脊型波导。通过精确调控脊型结构的几何参数, 如波导宽度、刻蚀深度, 可在太赫兹波段实现高效的电场调控。其中, 带有周期性变化的波导则形成了波导光栅结构。

波导光栅的研究极为广泛。基本原理是通过刻槽或者折射率变化导致光栅的周期性排列, 当光在波导中传播时, 光栅的周期性会引发布拉格衍射, 导致特定波长即满足布拉格条件的光发生反射或耦合到其他模式, 被广泛用于集成光路中, 比如阵列波导光栅[8]、多模干涉耦合器[9]、光栅耦合器[10]。目前研究比较普遍的是表面光栅, 即光栅刻蚀在波导表面, 比如硅波导顶部或侧面, 通过周期性凹凸结构实现折射率调制, 该波导光栅受周期、占空比、刻蚀深度、表面散射等影响。

波导光栅中的缺陷结构是一项值得研究的内容, 一个光栅周期由凹槽和齿组成, 通常产生缺陷的方法有两种, 一种是将周期光栅中的一个齿加长, 使其破坏周期性结构[11], 另一种是去掉其中一个光栅, 周期上的体现为增加了一个凹槽[12], 这些缺陷结构的长度由 $\lambda/4$ 决定, 因为此结构改变了光栅的周期, 所以缺陷光栅也称之为相移布拉格光栅。本文基于侧面刻蚀波导光栅即光栅高度等于波导高度的情况, 引入对称米氏散射体(如矩形缺陷)和非对称米氏散射体(如直角三角形缺陷) [13], 通过有限时域差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)对波导光栅带有不同的缺陷结构进行仿真分析, 仿真频段为 160 GHz~190 GHz, 时间步长为纳秒量级, 并采用完美匹配层(PML)边界条件, 主要针对对称和非对称米氏散射体结构, 分析了其缺陷深度对透射、反射率、场分布以及不同端口的透射率变化所带来的影响。

2. 侧面刻蚀光栅结构

布拉格条件(Bragg Condition)是指在周期性结构中, 入射波与反射波因周期性排列的散射体产生相长干涉现象。当满足该条件时, 特定波长的光会被强烈反射或衍射, 形成明显的反射峰或衍射峰。形成布拉格条件的公式为:

$$m\lambda = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

式中, m 为衍射级次, λ 为布拉格波长即反射峰的中心波长, n_{eff} 为有效折射率, 若光波在周期性结构中则采用等效折射率, Λ 为光栅周期, 布拉格相位匹配是指周期性结构的每个周期 Λ 对入射光产生反射。当相邻周期的反射光相位差为 2π 的整数倍时, 所有反射波同相位叠加, 形成相长干涉。布拉格波矢匹配是指入射波 β_1 和反射波 β_2 的波矢需满足动量守恒:

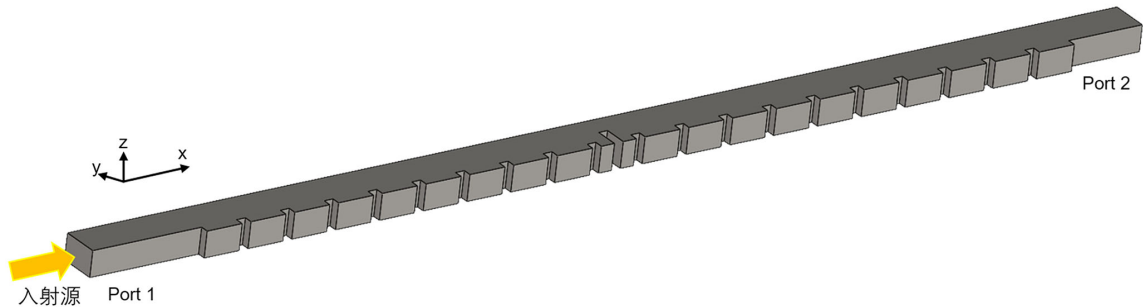
$$\beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\Lambda \quad (1)$$

影响布拉格条件的主要因素有温度、波导结构和材料的折射率。

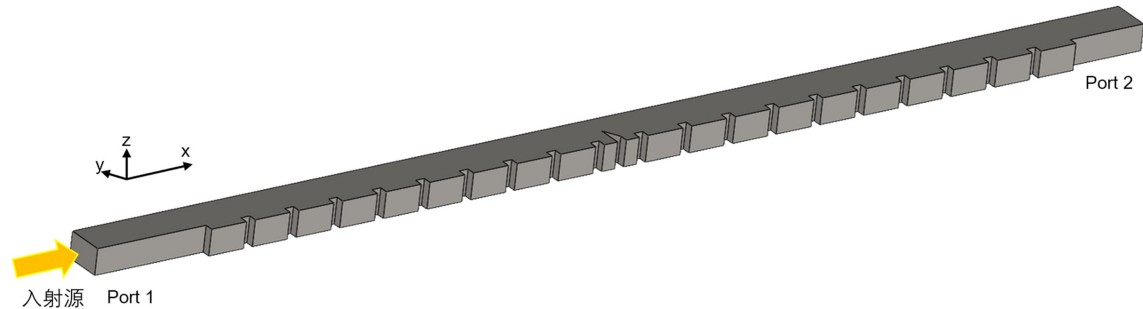
一阶光栅透射或反射效率最高, 广泛用于光纤通信、传感, 而二阶光栅与一阶相比需要更大的周期 Λ 来实现相同波长的反射[14], 其反射带宽更窄, 但高阶次光栅可能引入多模耦合或杂散反射。二阶光栅拥有两个方向的衍射光, 一个与入射光方向垂直, 为一级衍射光, 另一个与其相反, 称作二级衍射光。本文研究的波导光栅为二阶布拉格光栅, 二阶光栅的光栅周期大约为一阶光栅的 2 倍, 根据二阶布拉格光栅公式:

$$\lambda = n_{eff} \cdot \Lambda \quad (3)$$

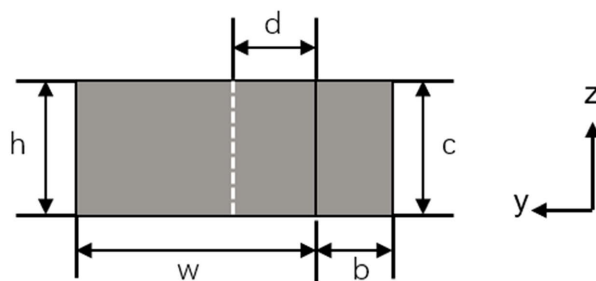
输入源为横磁(Transverse Magnetic, TM)模式, 波导光栅的有效折射率 n_{eff} 约为 2.71, 频率范围为 160~190 GHz, 光栅周期设置为 614.5 μm 。波导光栅采用高阻硅材料, 折射率 n_1 为 3.42, 宽度 w 为 500 μm , 厚度 h 为 340 μm ; 覆盖层为空气, 折射率 n_2 为 1; 缺陷位置在光栅中间, 缺陷槽刻蚀深度 d 为 200 μm , 宽度 w_2 为 122.9 μm , 槽刻蚀后左右光栅对称, 为了更好地探究波导中的缺陷结构(矩形缺陷和三角形缺陷)对透射谱、反射谱的影响, 二阶布拉格光栅的占空比为 0.25, 在此占空比下反向辐射效率最高[15]。光栅高度与直波导相等, 置于波导侧面, 光栅的长宽高 $a \times b \times c$ 设计为 491.57 $\times$ 110 $\times$ 340 μm , 光栅个数设置为 20 个。其结构示意图如图 1 所示。



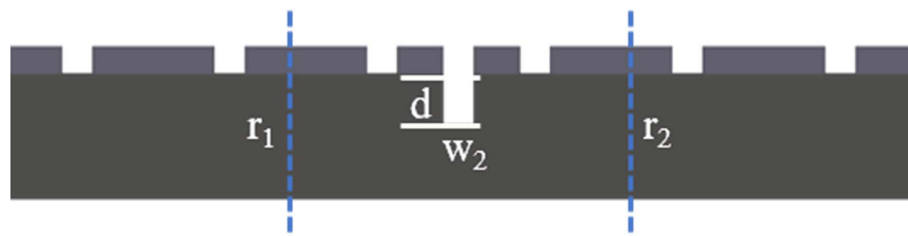
(a) 矩形缺陷



(b) 三角形缺陷



(c) 刻蚀截面图



(d) 缺陷示意图

Figure 1. Grating structure diagram**图 1.** 光栅结构示意图

3. 仿真结果分析

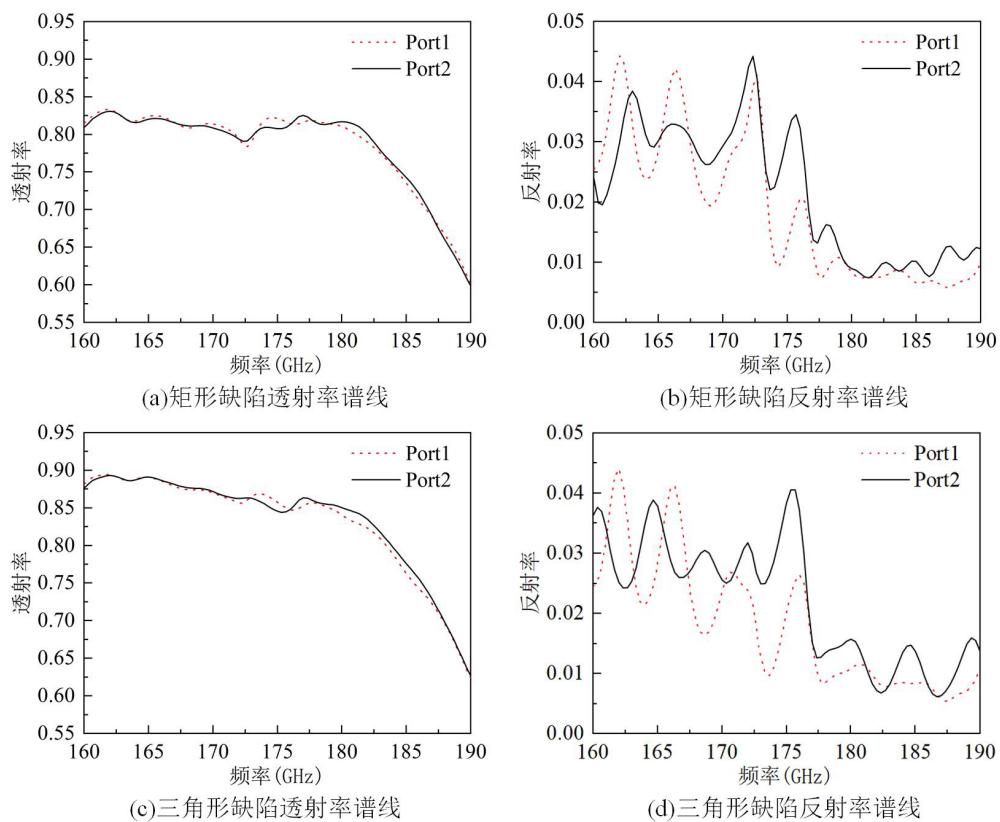
**Figure 2.** Rectangular and triangular defect spectral lines**图 2.** 矩形缺陷和三角形缺陷谱线

图2显示了矩形缺陷结构和直角三角形缺陷结构在槽刻蚀深度 d 为 $200\mu\text{m}$ ，入射源在光栅不同端口 Port 1 和 Port 2 入射时的透射谱、反射谱。

此外，槽刻蚀深度对透射谱、反射谱的影响如图3所示：

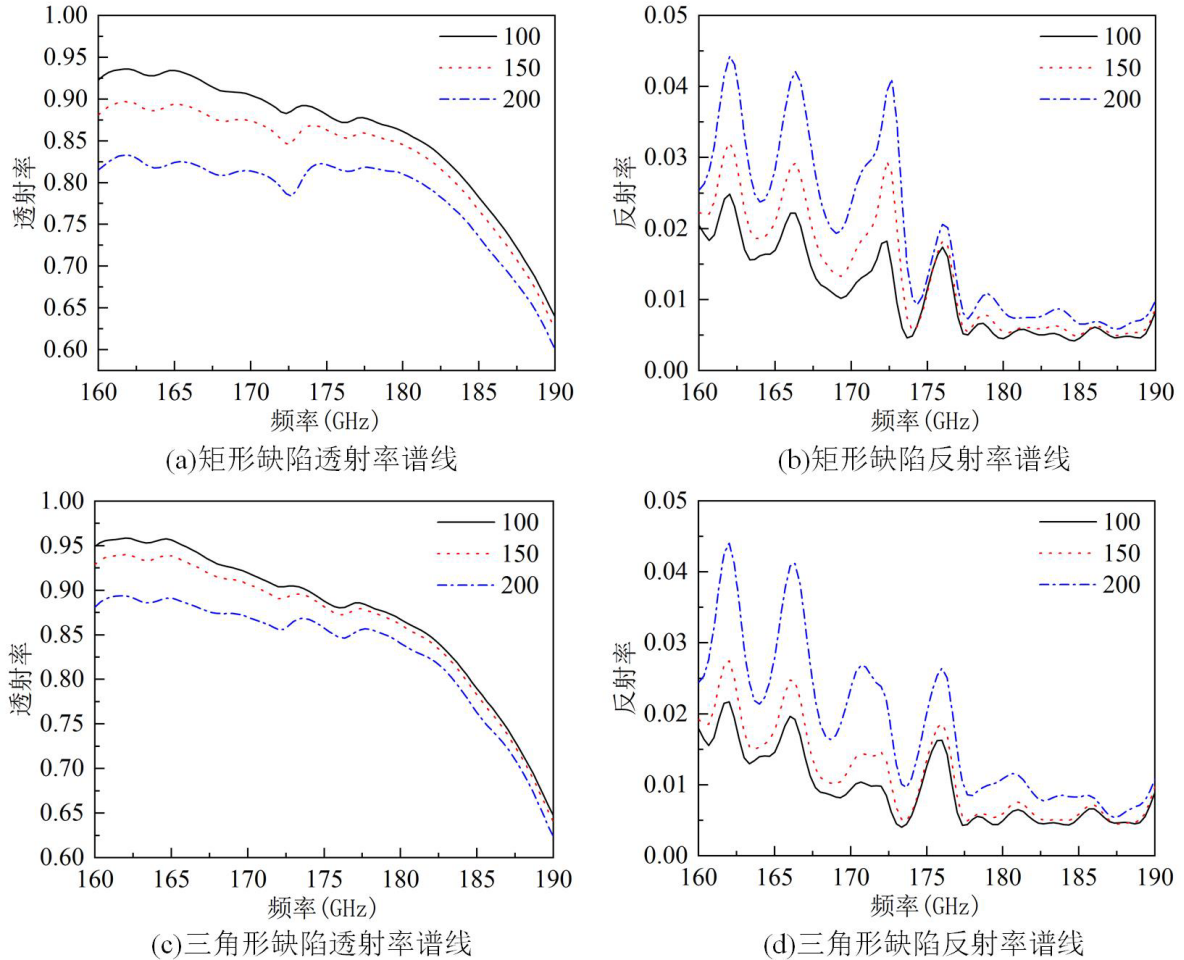


Figure 3. Influence of different depths on transmission and reflection

图3. 不同槽刻蚀深度 d 对透射、反射的影响

图3(a)、图3(b)展示了槽刻蚀为矩形对称式缺陷，槽刻蚀深度 d 分别为 100 、 150 、 $200\mu\text{m}$ 时波导光栅透射谱、反射谱的变化，观察到透射率随着槽刻蚀深度的增加逐渐递减，反射率逐渐升高，布拉格峰值也随之增大。从图3(c)、图3(d)可以看出槽刻蚀为三角形非对称式缺陷时，波导光栅整体透过率受到的影响和矩形缺陷相比相对较弱，这是因为在非对称式缺陷中，缺陷左右两侧 r_1 和 r_2 的反射系数不同，导致产生非互易性耦合。因此，如果希望在波导光栅中产生能量较强的回波，可以采用制造矩形槽缺陷刻蚀的方法。

场分布作为波导光栅的重要参数，为了更好地表征不同缺陷对波导光栅的影响，图4显示了 d 为 $200\mu\text{m}$ 波导光栅在布拉格反射峰处的横向截面电场强度分布。

对比图4(a)和图4(b)，矩形槽刻蚀对波导内 TM 模式约束能力相对较弱，三角形结构模式约束能力更强，导模沿着光栅的位置更均匀。从图4(b)中可以看出，能量经过光栅缺陷后，三角形缺陷结构在中后端传输的能量较强。其余频点电场分布与 $d = 200\mu\text{m}$ 类似，均在缺陷后形成明显强度差异。

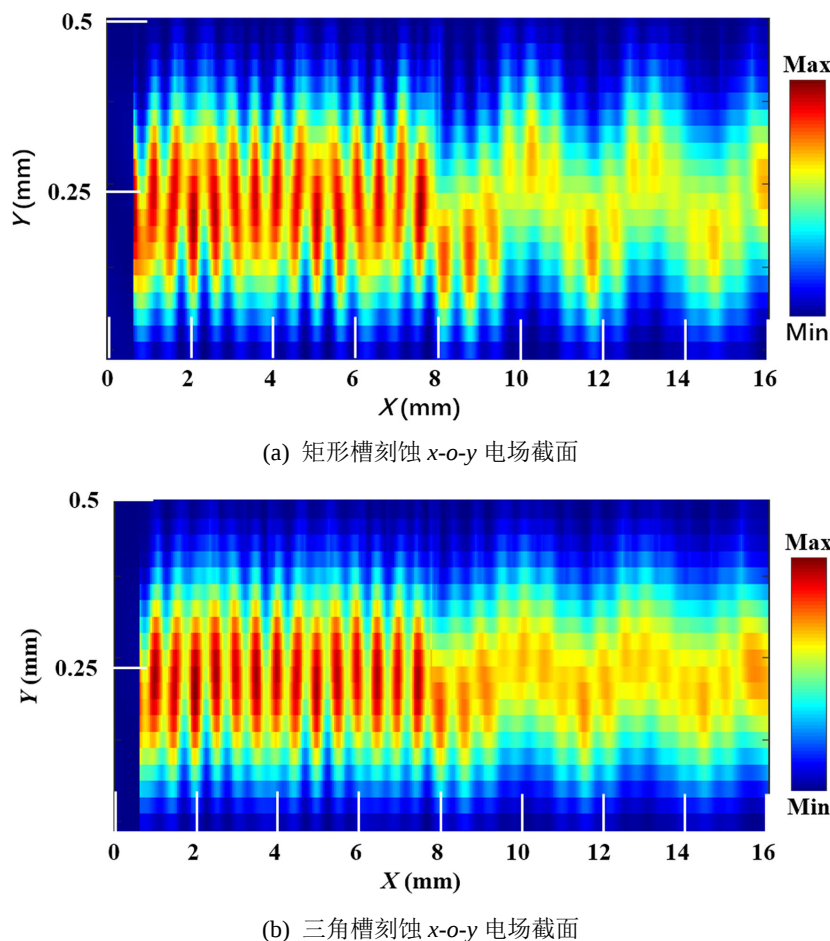


Figure 4. x - o - y electric field cross section distribution of waveguide grating
图 4. 波导光栅 x - o - y 电场截面分布

4. 结论

本文通过仿真分析了二阶布拉格光栅中引入对称与非对称米氏散射体缺陷的影响机制。矩形凹槽的对称缺陷通过均匀反射抑制随机散射，显著增强布拉格反射率，透射率随槽刻蚀深度 d 增加而减弱，电场局域性较弱，但反射集中性更优。适用于高反射、低透射场景，如滤波器设计。直角三角形凹槽的非对称缺陷引入非互易耦合，导致正反向入射下反射谱出现显著差异，电场分布中表现出更强的模式约束能力且能量分布更均匀，适合宽带宽、低损耗传输应用。其次，非对称缺陷对槽刻蚀深度的敏感性较低，透射性能更稳定，为通信系统中的非互易器件提供新的设计思路。未来可结合实验验证缺陷结构的实际性能，并探索混合缺陷设计，如对称与非对称缺陷组合，以进一步优化光栅响应。本研究为波导光栅的缺陷问题提供了仿真分析，有助于新型硅基集成器件的进一步探索。

参考文献

- [1] Dai, J., Zhang, J., Zhang, W. and Grischkowsky, D. (2004) Terahertz Time-Domain Spectroscopy Characterization of the Far-Infrared Absorption and Index of Refraction of High-Resistivity, Float-Zone Silicon. *Journal of the Optical Society of America B*, **21**, 1379-1386. <https://doi.org/10.1364/josab.21.001379>
- [2] Endo, A., Karatsu, K., Laguna, A.P., Mirzaei, B., Huiting, R., Thoen, D.J., et al. (2019) Wideband On-Chip Terahertz Spectrometer Based on a Superconducting Filterbank. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and SYSTEMS*,

- 5, Article ID: 035004. <https://doi.org/10.1117/1.jatis.5.3.035004>
- [3] Wang, X. (2020) CMOS Fully Integrated Terahertz Thermal Detector Using Metamaterial Absorber and Proportional-To-Absolute Temperature Sensor. *Optical Engineering*, **59**, Article ID: 097106. <https://doi.org/10.1117/1.oe.59.9.097106>
 - [4] Tian, Z., Azad, A.K., Lu, X., Gu, J., Han, J., Xing, Q., *et al.* (2010) Large Dynamic Resonance Transition between Surface Plasmon and Localized Surface Plasmon Modes. *Optics Express*, **18**, 12482-12488. <https://doi.org/10.1364/oe.18.012482>
 - [5] Sun, B., Zang, X., Lu, B., Chi, H., Zhou, Y., Zhu, Y., *et al.* (2023) Generalized Terahertz Perfect Vortices with Transmutable Intensity Profiles Based on Spin-Decoupled Geometric Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article ID: 2301048. <https://doi.org/10.1002/adom.202301048>
 - [6] Qiu, H., Zhang, X., Zhou, F., Qie, J., Yao, Y., Hu, X., *et al.* (2018) A Continuously Tunable Sub-Gigahertz Microwave Photonic Bandpass Filter Based on an Ultra-High-Q Silicon Microring Resonator. *Journal of Lightwave Technology*, **36**, 4312-4318. <https://doi.org/10.1109/jlt.2018.2822829>
 - [7] Ali, N., Panepucci, R.R., Xie, Y., Dai, D. and Kumar, R. (2021) Electrically Controlled 1×2 Tunable Switch Using a Phase Change Material Embedded Silicon Microring. *Applied Optics*, **60**, 3559-3568. <https://doi.org/10.1364/ao.418358>
 - [8] Pathak, S., Van Thourhout, D. and Bogaerts, W. (2013) Design Trade-Offs for Silicon-On-Insulator-Based AWGs for (de)multiplexer Applications. *Optics Letters*, **38**, 2961-2964. <https://doi.org/10.1364/ol.38.002961>
 - [9] Zhou, H., Song, J., Li, C., Zhang, H. and Lo, P.G. (2013) A Library of Ultra-Compact Multimode Interference Optical Couplers on Soi. *IEEE Photonics Technology Letters*, **25**, 1149-1152. <https://doi.org/10.1109/lpt.2013.2261193>
 - [10] Zhang, H., Liang, C., Song, J., Fu, C., Zang, X., Chen, L., *et al.* (2022) Terahertz Out-of-Plane Coupler Based on Compact Spot-Size Converter. *Chinese Optics Letters*, **20**, Article ID: 021301. <https://doi.org/10.3788/col202220.021301>
 - [11] Zhang, W., Li, W. and Yao, J. (2014) Optical Differentiator Based on an Integrated Sidewall Phase-Shifted Bragg Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, **26**, 2383-2386. <https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2357418>
 - [12] Wang, X. and Madsen, C.K. (2013) Highly Sensitive Compact Refractive Index Sensor Based on Phase-Shifted Sidewall Bragg Gratings in Slot Waveguide. *Applied Optics*, **53**, 96-103. <https://doi.org/10.1364/ao.53.000096>
 - [13] Lee, H., Kecebas, A., Wang, F., Chang, L., Özdemir, S.K. and Gu, T. (2023) Chiral Exceptional Point and Coherent Suppression of Backscattering in Silicon Microring with Low Loss Mie Scatterer. *eLight*, **3**, Article No. 20. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00043-5>
 - [14] 冯国庆. 808 nm 分布反馈半导体激光器的光栅制备与研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2014.
 - [15] 叶淑娟, 秦莉, 戚晓东, 等. 二阶光栅分布反馈半导体激光器的出光特性[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2371-2375.