

2 μm 工作波长下氮化硅槽波导特性研究

孙媛媛, 李 政, 钟咏兵, 陈丹强

空军航空大学, 吉林 长春

收稿日期: 2022年12月23日; 录用日期: 2023年3月5日; 发布日期: 2023年3月16日

摘 要

2 μm 波段在光通信、光传感等领域拥有巨大前景, 应用的蓬勃发展带来了与日俱增的器件需求, 其中低损耗的氮化硅波导备受关注。本文利用有限元模场求解法, 系统地研究了2 μm 工作波长下氮化硅槽波导的模式截止条件、模式分布特性、色散特性和偏振特性。研究表明, 氮化硅槽波导的氮化硅条宽度、槽宽度和波导高度均影响其模式截止条件、模式分布特性、色散特性和偏振特性。通过结构优化设计, 氮化硅槽波导的最高槽中功率限制因子可达16.5%, 氮化硅波导的色散特性可用于2 μm 波段的色散补偿, 氮化硅波导的偏振特性可用于2 μm 波段的偏振分束等。本文的工作可为2 μm 波段的波导器件提供一个有力候选, 为氮化硅槽波导在2 μm 波段的应用提供理论基础。

关键词

硅基集成, 氮化硅, 槽波导, 2 μm

Characteristics of Silicon Nitride Slot Waveguide at a Wavelength of 2 μm

Yuanyuan Sun, Zheng Li, Yongbing Zhong, Danqiang Chen

Aviation University of Air Force, Changchun Jilin

Received: Dec. 23rd, 2022; accepted: Mar. 5th, 2023; published: Mar. 16th, 2023

Abstract

The 2 μm band has great prospects in optical communication, optical sensing and other fields. With the rapid development of applications, the demand for devices is increasing day by day, among which the low loss silicon nitride waveguide is attracting more and more attention. In this paper, the mode cutoff conditions, mode distribution, dispersion characteristics and polarization characteristics of silicon nitride slot waveguides at 2 μm operating wavelength are systematically studied by means of finite element method. The results show that the width of the silicon nitride

slot waveguide, the width of the slot and the height of the waveguide all affect the mode cutoff condition, the mode distribution, the dispersion characteristics and the polarization characteristics. By optimizing the structure, the highest power confinement factor of the silicon nitride slot waveguide can reach 16.5%. The dispersion characteristics of the silicon nitride waveguide can be used for dispersion compensation in 2 μm band, and the polarization characteristics of the silicon nitride waveguide can be used for polarization beam splitting in 2 μm band. The work in this paper can provide a strong candidate for waveguide devices in 2 μm band and establish theoretical basis for the application of silicon nitride slot waveguides in 2 μm band.

Keywords

Silicon-Based Integration, Silicon Nitride, Slot Waveguide, 2 μm

Copyright © 2023 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

2 μm 波段位于近红外和中红外之间, 独特的光学特性使其在光通信和光学传感等领域凸显巨大的应用前景[1] [2]。2 μm 波段应用的蓬勃发展带来了与日俱增的器件需求。目前, 工作在 2 μm 波段的激光器、光放大器、调制器和光电探测器已被开发[3] [4] [5] [6], 但是, 与 1.55 μm 波段相比, 2 μm 波段的光子器件还十分缺乏。

在众多成熟的器件技术中, 硅光子器件技术与现有微电子工艺相兼容, 具有低成本和高集成密度等显著优势。随着硅基集成光子学的发展, 基于微电子加工工艺的硅基波导器件因其传输损耗小、器件尺寸小、稳定性强、便于大规模生产和低成本制作等优点, 在诸多领域得到了广泛研究。目前硅基集成光子学器件主要利用典型的绝缘体上硅(SOI, Silicon-on-Insulator)实现, 其波导层为硅材料, 衬底为二氧化硅材料。硅材料折射率比较高, 与包层和衬底的折射率对比度大, 有利于实现紧凑结构, 但是波导侧壁粗糙给它带来了较大的辐射损耗。另外, 虽然硅材料具有较大的非线性效应克尔系数, 但是硅材料本身存在双光子吸收和自由载流子吸收, 限制了它在非线性领域的应用。相比于硅波导, 一方面, 氮化硅波导损耗更低, 在光互连器件等方面独具优势。另一方面, 氮化硅材料中无双光子吸收, 是非线性器件的理想选材, 但是氮化硅波导器件尺寸较大, 波导中光场强度较低, 导致其非线性效应弱, 限制了它在非线性领域的应用。

受到硅波导结构优化的启发, 氮化硅槽波导结构被提出。槽波导可将光场主要集中在槽中, 若进一步在槽中填充高非线性材料, 可增强氮化硅波导的非线性效应, 使它应用于光通信和光传感等领域。刚开始, 氮化硅槽波导主要工作于 1.31 μm 波段[7]。随着光通信的发展, 氮化硅槽波导的工作集中于 1.55 μm 波段[8]。近年来, 光通信波长开始向近红外甚至中红外波段扩展, 2 μm 工作波长在通信、传感等领域受到了与日俱增的关注, 2 μm 波段的潜力开始被大幅度开发, 但是, 氮化硅槽波导在 2 μm 波段的研究较少, 仅有 2021 年法国的研究小组利用氮化硅槽波导实现了偏振分束功能[9]。总体而言, 氮化硅槽波导在 2 μm 波段的模式特性、色散特性和偏振特性等亟待补充。

本文采用有限元数值仿真方法, 研究氮化硅槽波导在 2 μm 工作波长下的模式截止条件、模场分布特性、色散特性和偏振特性, 有望为 2 μm 波段氮化硅槽波导的研究奠定理论基础, 为氮化硅材料在 2 μm 波段的应用提供理论指导。

2. 方法

氮化硅槽波导结构如图 1 所示，衬底为二氧化硅材料，包层为空气，两个氮化硅条互相靠近构成空气槽，从而构成槽波导，此处氮化硅槽波导取为对称结构，即槽两侧的氮化硅条的宽度相等，记为 W ，空气槽的宽度为 W_{slot} ，氮化硅槽波导的高度为 H 。在此模型中，氮化硅、二氧化硅和空气的折射率分别取为 1.96、1.44 和 1 [10]。氮化硅槽波导的工作波长取为 $2 \mu\text{m}$ 。

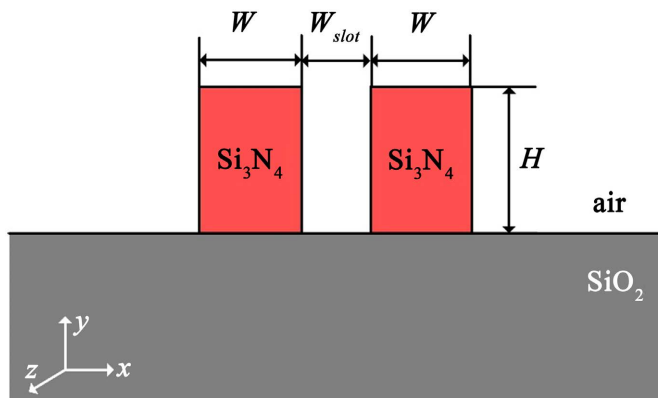


Figure 1. Diagram of the silicon nitride slot waveguide

图 1. 氮化硅槽波导示意图

对于图 1 中所示的氮化硅槽波导结构而言，槽的方向与光传输平面垂直，被称为垂直型槽波导。由于包层和衬底的材料不同，因此，波导中存在的模式非严格的横电模式和横磁模式，而是准横电(Quasi Transverse-Electric, Quasi-TE)模式和准横磁(Quasi Transverse- Magnetic, Quasi-TM)模式，以下分别简称为 TE 和 TM。其中，TM 模式的电场强度沿图 1 中 y 方向，在垂直于氮化硅和上空气包层交界面的方向上是不连续的，所以 TM 模式的光场并不会集中在槽区域中。而 TE 模式的电场强度沿图 1 中 x 方向，在垂直于氮化硅和槽交界面的方向上是不连续的，但是其电位移矢量是连续的，由物质方程可得

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (1)$$

其中 E_1 和 E_2 分别为界面处氮化硅中的电场强度和空气槽中的电场强度， n_1 和 n_2 分别为氮化硅材料和空气的折射率。由上式可知，由于氮化硅材料的折射率大于空气的折射率，所以槽中的电场强度要高于氮化硅中的电场强度，所以氮化硅槽波导可将光场主要集中在槽中，相比于氮化硅条波导，槽中光场强度被增强，光场的有效模式面积被减小，若进一步在槽中填充高非线性材料，可增强氮化硅波导的非线性效应，使其应用于光通信和光传感等领域。

3. 结果与讨论

3.1. 模式截止条件

为了对模式进行有效地限制和导引，波导的有效折射率应大于衬底二氧化硅的折射率，以减少光模式通过衬底的泄露。因此，下面分别研究氮化硅条宽度、槽宽度和波导高度对其 TE 模式有效折射率的影响，从而得到氮化硅槽波导的 TE 模式截止条件。氮化硅槽波导的初始参数分别为：氮化硅条宽度为 300 nm，槽宽度为 50 nm，波导高度为 400 nm。围绕着氮化硅槽波导的初始结构参数，采用了控制变量法逐次研究了不同结构参数对其 TE 模式有效折射率的影响，其中每个结构参数的取值范围参考了现有加工工艺水平下氮化硅波导器件的尺寸。

首先研究了氮化硅条宽度对氮化硅槽波导 TE 模式有效折射率的影响, 其变化情况如图 2 中红色正方形标识线所示, 此时槽宽度保持为 50 nm, 波导高度保持为 400 nm, 氮化硅条宽度从 700 nm 增加到 1000 nm, 步长为 50 nm。可以看出, 当控制其他结构参数不变时, 随着氮化硅条宽度增加, 氮化硅槽波导 TE 模式的有效折射率几乎为线性增加。此时有效折射率小于二氧化硅材料折射率的数据未显示, 所以由图可知此时 TE 模式的截止条件是氮化硅条宽度为 700 nm。

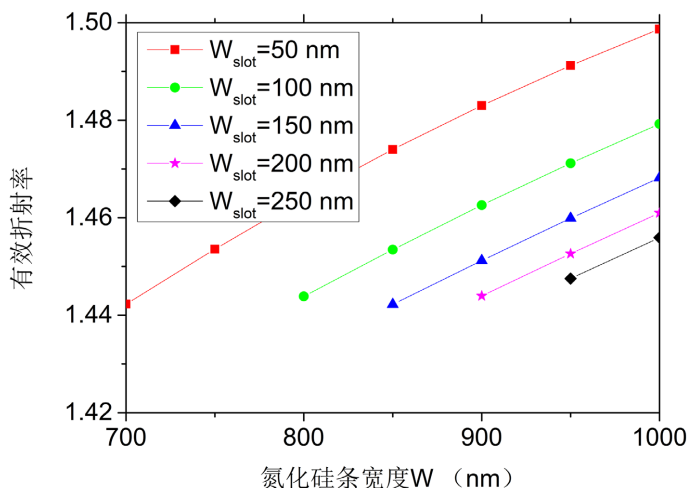


Figure 2. Variation of the effective refractive index with the slot width of the silicon nitride slot waveguide
图 2. 氮化硅槽波导的有效折射率随槽宽度的变化曲线

随后研究了槽宽度对氮化硅槽波导 TE 模式有效折射率的影响, 其变化情况如图 2 所示, 此时波导高度保持为 400 nm, 槽宽度从 50 nm 增加到 250 nm, 步长为 50 nm。可以看出, 当控制其他结构参数不变时, 随着槽宽的增加, 氮化硅槽波导 TE 模式的有效折射率减小。另外, 随着槽宽度从 50 nm 增大到 250 nm, TE 模式截止条件对应的氮化硅条宽度从 700 nm 增大到 950 nm, 即槽宽度的增大使 TE 模式截止条件对应的氮化硅条宽度增大。

最后研究了氮化硅槽波导高度对其有效折射率的影响, 其变化情况如图 3 所示, 此时槽宽度保持为 100 nm, 氮化硅槽波导高度从 400 nm 增加到 1000 nm, 步长为 100 nm。可见, 当控制其他结构参数不变时, 随着氮化硅波导高度的增加, 氮化硅槽波导的有效折射率增加。另外, 随着高度从 400 nm 增大到 1000 nm, TE 模式截止条件对应的氮化硅条宽度从 800 nm 减小到 550 nm 以下, 即高度的增大使 TE 模式截止条件对应的氮化硅条宽度减小。

3.2. 模场分布特性

此处主要研究氮化硅槽波导的氮化硅条宽度、槽宽度和波导高度对槽中光功率限制因子的影响规律。首先研究了槽宽度对槽中功率限制因子的影响, 其变化情况如图 4 所示。可以看出, 当控制其他结构参数不变时, 随着槽宽度从 50 nm 增加到 100 nm 时, 槽内的功率限制因子增加, 但是当槽宽度继续从 100 nm 增加到 250 nm 时, 槽内的功率限制因子逐渐减小, 这是由于随着槽宽度的继续增加, 槽对光场的限制作用被削弱。此时, W_{slot} 为 100 nm 时得到最大功率限制因子为 4.75%。

随后研究了波导高度对槽中功率限制因子的影响, 其变化情况如图 5 所示, 此时槽宽度取为 100 nm。可见, 当控制其他结构参数不变时, 随着波导高度的增加, 槽中的功率限制因子增加, 当波导高度从 400 nm 增加到 1000 nm 时, 槽中的功率限制因子从 4.75% 增加到 16.5%。

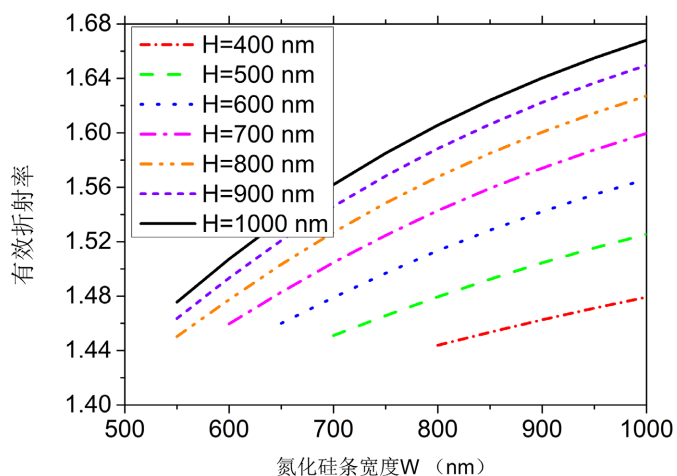


Figure 3. Variation of the effective refractive index with the height of the silicon nitride slot waveguide
图 3. 氮化硅槽波导的有效折射率随波导高度的变化曲线

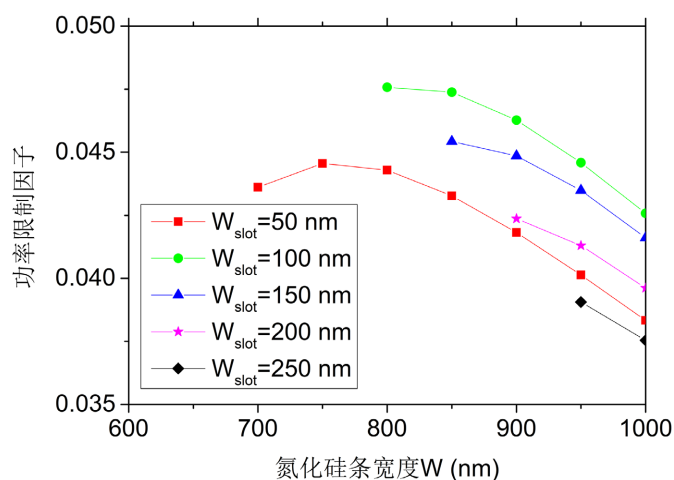


Figure 4. Variation of the power confinement factor with the slot width of the silicon nitride slot waveguide
图 4. 氮化硅槽波导的功率限制因子随槽宽度的变化曲线

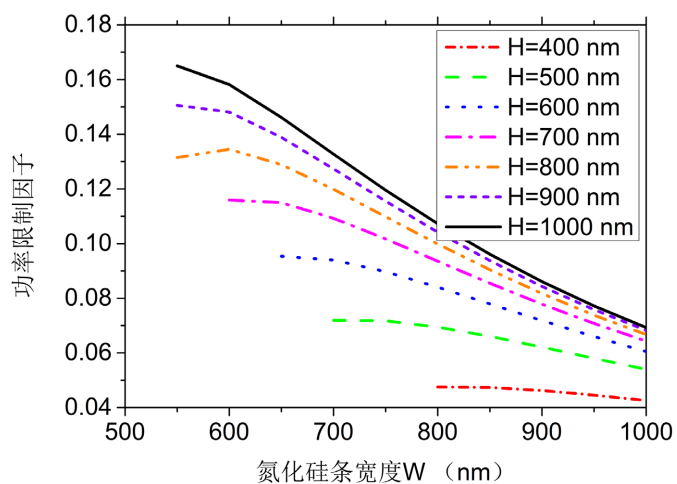


Figure 5. Variation of the power confinement factor with the height of the silicon nitride slot waveguide
图 5. 氮化硅槽波导的功率限制因子随波导高度的变化曲线

最后研究了氮化硅条宽度对槽中功率限制因子的影响，其变化情况如图 6 所示，此时槽宽度取为 100 nm，波导高度取为 1000 nm。从图 6 中可以看出，当控制其他结构参数不变时，当氮化硅条宽度增加时，氮化硅条中的功率占比增加，而衬底中的功率占比、包层中的功率占比以及槽中的功率占比均减小，这是因为随着氮化硅条宽度的增加，波导的有效折射率增明显加，波导对光的约束能力增强，大部分的光被限制在氮化硅条中，因而泄漏到衬底和包层的功率以及限制在槽中的功率均减少。当氮化硅条宽度从 550 nm 增加到 1000 nm，槽中的功率占比从 16.5% 减低至 6.9%。

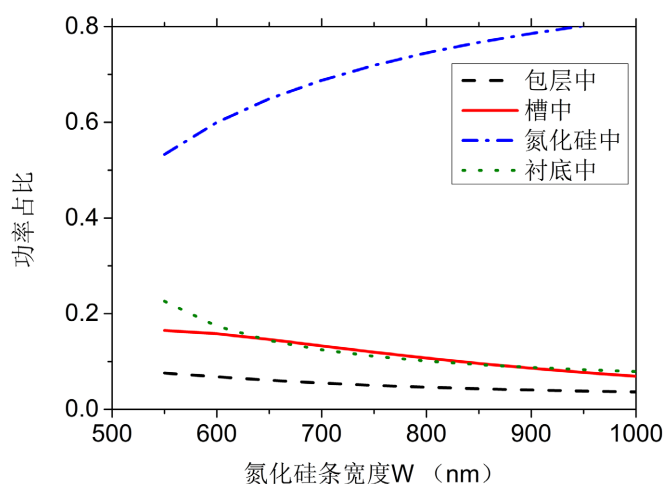


Figure 6. Variation of the power ratio in each region with the width of the silicon nitride strip
图 6. 氮化硅槽波导各区域功率占比随氮化硅条宽度的变化曲线

综上所述，氮化硅槽波导最大的槽中功率限制因子为 16.5%，此时槽宽度为 100 nm，波导高度为 1000 nm，氮化硅条宽度为 550 nm，但是此时氮化硅槽波导临近截止状态，因此损耗会比较大，当氮化硅条宽度 W 取 600 nm 时，波导离开了截止条件，功率限制因子也较大，为 15.8%。

3.3. 色散特性

波导的色散包括材料色散、波导色散和模间色散。本文中仅考虑 TE 基模，因此模式间色散可以忽略。对于本文工作中的氮化硅和二氧化硅材料而言，其材料色散可由 Sellmeier 方程计算得到[11]。对于给定的工作波长，材料折射率和材料色散是固定的，总色散的调节主要通过控制波导色散来实现。波导色散可由其有效折射率随波长的变化求出，即

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial \lambda^2} \quad (2)$$

其中 D 为波导色散系数， n_{eff} 为波导有效折射率， λ 为波长。

波导色散对波导的几何结构尺寸非常敏感，因此，我们讨论氮化硅槽波导的高度和氮化硅条宽度对其波导色散的影响。此时氮化硅槽波导结构参数取三组，槽宽均为 100 nm，第一组结构参数中波导高度为 1000 nm，氮化硅条宽度为 600 nm，此时槽中功率限制因子为 15.8%；第二组结构参数中波导高度为 900 nm，氮化硅条宽度为 600 nm，此时槽中功率限制因子为 14.8%；第三组结构参数中波导高度为 1000 nm，氮化硅条宽度为 650 nm，对应槽中功率限制因子为 14.6%。以上三组参数均可保证较高的槽中功率限制因子。

三组结构参数下的氮化硅槽波导的波导色散如图 7 所示，可见，三组结构参数下的结构色散均为负色散，且均随着波长的增加而绝对值逐渐增大。固定氮化硅波导高度为 1000 nm，当氮化硅条宽度从

600 nm 增加到 650 nm 时, 相同波长处的色散系数绝对值均减小; 固定氮化硅条宽度为 600 nm, 当氮化硅槽波导高度从 1000 nm 减小到 900 nm 时, 相同波长处的色散系数绝对值均增大。另外, 与氮化硅材料色散(~ 80 ps/nm/km)相比, 氮化硅槽波导波导色散占主导。以上结果表明, 氮化硅槽波导的色散特性可以通过结构参数的设计进行调节, 可用于色散补偿等应用。

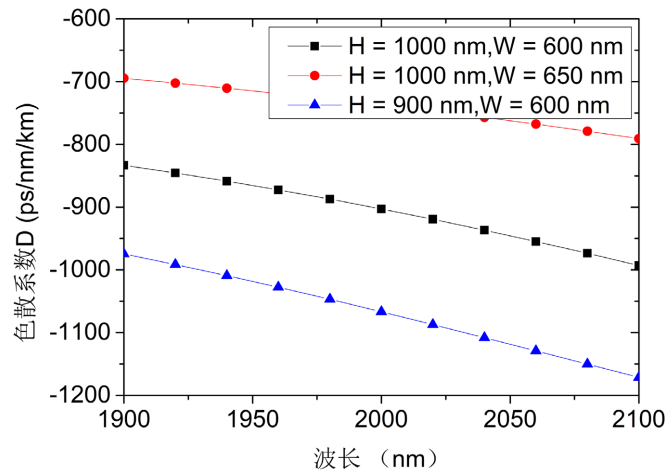


Figure 7. Dispersion characteristic of the silicon nitride slot waveguide
图 7. 氮化硅槽波导色散特性曲线

3.4. 偏振特性

由原理部分可知, 本文所研究的垂直槽型氮化硅槽波导的准横电模式 TE 可将光场限制在槽中。但在某些特定应用场景, TE 模式和 TM 模式的偏振特性也备受重视。此处主要研究氮化硅槽波导在不同结构参数下的偏振特性。

为了保证槽中的功率限制因子, 槽宽度固定为 100 nm, 为了找到偏振无关的结构参数, 我们计算了不同氮化硅条宽度和高度下的 TE 模式和 TM 模式的有效折射率, 其中氮化硅条宽度从 400 nm 扫描到 1000 nm, 步长为 50 nm, 波导高度从 400 nm 扫描到 1000 nm, 步长为 100 nm。最后得到了如图 8 所示的氮化硅槽波导不同模式有效折射率随结构参数的变化曲线。

根据图中可知, 当氮化硅条宽度增加时, TE 模式和 TM 模式的有效折射率均增大。如图 8(a)所示, 当 H 为 500 nm 时, TE 模式早于 TM 模式出现, 且 TE 模式的有效折射率随氮化硅条宽度的变化更快, 因此 TE 模式和 TM 模式的有效折射率不会相等, 不存在偏振无关的情况, 并且随着氮化硅条宽的增加, 氮化硅槽波导的 TE 模式和 TM 模式的偏振相关性更强。

如图 8(b)所示, 当 H 为 600 nm 时, TM 模式早于 TE 模式出现, 而 TE 模式的有效折射率随氮化硅条宽度的变化更快, 因此 TE 模式和 TM 模式的有效折射率曲线会相交, 当氮化硅条宽度 W 取 700 nm 时, TE 和 TM 模式的有效折射率相等, 即此时氮化硅波导偏振无关。当氮化硅条宽度越远离 700 nm, 氮化硅槽波导的 TE 模式和 TM 模式的偏振相关性越强, 但当氮化硅条宽度大于 950 nm 时, 会有高阶 TE 模式出现。

如图 8(c)所示, 当 H 为 700 nm 时, TM 模式早于 TE 模式出现, 而 TE 模式的有效折射率随氮化硅条宽度的变化更快, 因此 TE 模式和 TM 模式的有效折射率曲线会相交, 当氮化硅条宽度 W 取 800 nm 时, TE 和 TM 模式的有效折射率也相等, 即此时氮化硅波导也偏振无关。当氮化硅条宽度越远离 800 nm, 氮化硅槽波导的 TE 模式和 TM 模式的偏振相关性越强, 但当氮化硅条宽度大于 900 nm 时, 会有高阶 TE 模式出现。

阶 TE 模式和高阶 TM 模式出现, 因此利用此结构设计偏振相关器件(如偏振分束器)时, 尽量让氮化硅条宽度小于 800 nm。

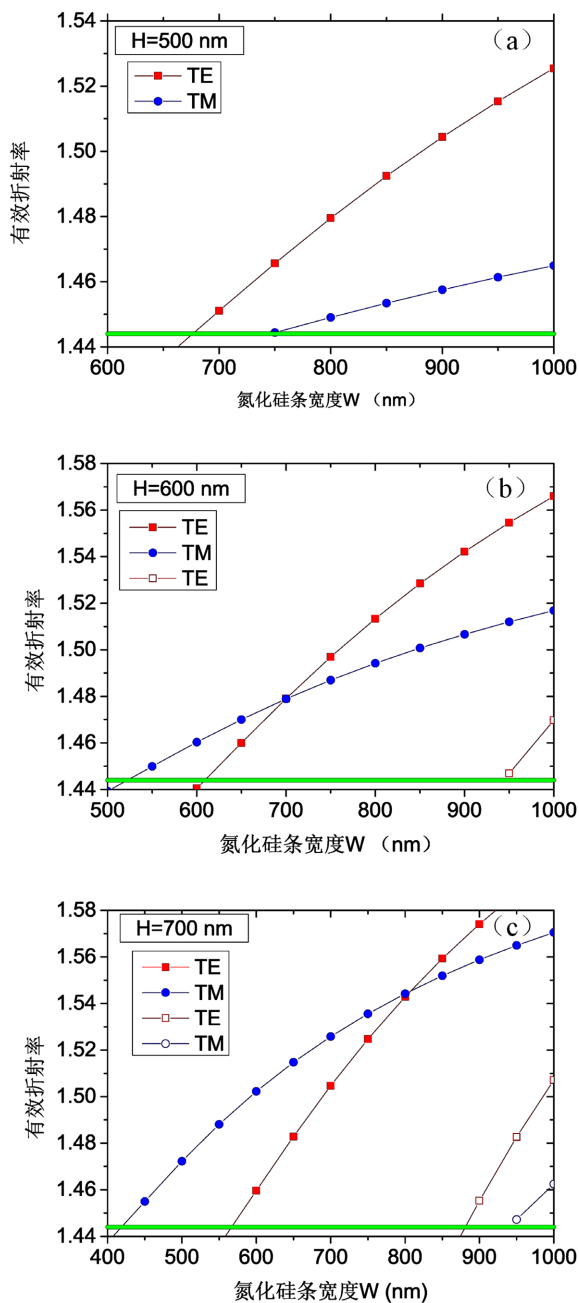


Figure 8. Variation of the effective refractive index for different modes with the structural parameters of the silicon nitride slot waveguide

图 8. 氮化硅槽波导不同模式有效折射率随结构参数的变化曲线

4. 结论

本文主要研究了 $2 \mu\text{m}$ 工作波长下氮化硅槽波导在不同结构参数下的模式截止条件、模场分布特性、色散特性和偏振特性。仿真结果表明, 氮化硅槽波导的有效折射率随着槽宽的增加而减小, 随着氮化硅

条宽的增加而增加,随着波导高度的增加而增加。氮化硅槽波导的槽中光功率限制因子随着氮化硅条宽度的增加而减小,随着槽宽增加先增加后减小,随着波导高度的增加而增加。氮化硅槽波导为负色散,其色散系数绝对值随着氮化硅条宽度减小、波导高度减小而增大。氮化硅槽波导的偏振相关和偏振无关均可以通过结构参数的设计而得到。本文的工作为 $2\ \mu\text{m}$ 工作波长下氮化硅槽波导的研究提供了理论基础,对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的色散补偿器件、偏振相关/无关器件的研制与开发具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Zhang, H., Kavanagh, N., Li Z., *et al.* (2015) 100 Gbit/s WDM Transmission at $2\ \mu\text{m}$: Transmission Studies in Both Low-Loss Hollow Core Photonic Bandgap Fiber and Solid Core Fiber. *Optics Express*, **23**, 4946-4951. <https://doi.org/10.1364/OE.23.004946>
- [2] Mizaikoff, B. (2013) Waveguide-Enhanced Mid-Infrared Chem/Bio Sensors. *Chemical Society Reviews*, **42**, 8683-8699. <https://doi.org/10.1039/c3cs60173k>
- [3] Wang, R., Sprengel, S., Boehm, G., *et al.* (2017) Broad Wavelength Coverage $2.3\ \mu\text{m}$ III-V-on-Silicon DFB Laser Array. *Optica*, **4**, 972-975. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.000972>
- [4] Heidt, A.M., Li, Z. and Richardson, D.J. (2014) High Power Diode-seeded Fiber Amplifiers at $2\ \mu\text{m}$ —From Architectures to Applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**, Article No. 3100612. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2312933>
- [5] Van Camp, M.A., Assefa, S., Gill, D.M., *et al.* (2012) Demonstration of Electrooptic Modulation at $2165\ \text{nm}$ Using a Silicon Mach-Zehnder Interferometer. *Optics Express*, **20**, 28009-28016. <https://doi.org/10.1364/OE.20.028009>
- [6] Dong, Y., Wang, W., Xu, S., *et al.* (2017) Two-Micron-Wavelength Germanium-Tin Photodiodes with Low Dark Current and Gigahertz Bandwidth. *Optics Express*, **25**, 15818-15827. <https://doi.org/10.1364/OE.25.015818>
- [7] Barrios, C.A., Gylfason, K.B., Snchez, B., *et al.* (2011) Integrated $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ Slot-Waveguide Microresonators. *33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication*, Berlin, Germany, 16-20 September 2007.
- [8] 杨敏. 基于 Si_3N_4 槽型波导的全光采样研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安邮电大学, 2018.
- [9] Koompai, N., Chaisakul P., Limsuwan, P., Le Roux, X., Vivien, L., and Marris-Morini, D. (2021) Design and Simulation Investigation of Si_3N_4 Photonics Circuits for Wideband On-Chip Optical Gas Sensing around $2\ \mu\text{m}$ Optical Wavelength. *Sensors*, **21**, Article No. 2513. <https://doi.org/10.3390/s21072513>
- [10] 郑又彬. 基于功能聚合物的氮化硅波导生化传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [11] Zhang, L., Agarwal, A.M., Kimerling L.C., *et al.* (2014) Nonlinear Group IV Photonics Based on Silicon and Germanium: From Near-Infrared to Mid-Infrared. *Nanophotonics*, **3**, 247-268. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2013-0020>