

2 μm 工作波长下高非线性氮化硅槽波导研究

孙媛媛¹, 李 政¹, 孙宝东², 肖树臣¹

¹空军航空大学, 吉林 长春

²中国人民解放军93656部队, 北京

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, 但是其非线性效应较弱, 限制了它在非线性领域的发展。本文利用非线性效应的全矢量模型和槽波导的有限元模场求解法, 系统地研究了2 μm 工作波长下氮化硅槽波导结构对其非线性效应和功率限制特性的影响。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非线性效应和功率限制特性。通过结构参数优化, 可同时实现高非线性系数和高功率限制, 分别为4.36/W/m和16.4%。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 波段的非线性应用提供了理论基础。

关键词

硅基集成, 氮化硅, 槽波导, 2 μm , 非线性

High Nonlinear Silicon Nitride Slot Waveguide at a Wavelength of 2 μm

Yuanyuan Sun¹, Zheng Li¹, Baodong Sun², Shuchen Xiao¹

¹Aviation University of Air Force, Changchun Jilin

²The 93656 Army of Chinese People's Liberation Army, Beijing

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. But its nonlinear effect is weak, which limits its development in nonlinear field. In this paper, the power

confinement factor, effective mode area, and nonlinear coefficient of silicon nitride slot waveguides at 2 μm operating wavelength are systematically studied by means of the full vector model of nonlinear effect and the 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 power confinement factor, the effective mode area, and the nonlinear coefficient. By optimizing the structure, the structure can achieve high nonlinear coefficient and high power confinement factor of 4.36/W/m and 16.4%, respectively. The work in this paper provides a strong candidate for waveguide devices in 2 μm band, and provides a theoretical basis for the nonlinear application of silicon nitride slot waveguide in 2 μm band.

Keywords

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

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

随着光通信技术的发展,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[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,要实现不同光模块之间的互连,功耗成为关键,面对未来光器件的需求,绿色低功耗特性成为了众多研究者的关注点。

硅基单片集成自从被提出就受到了举世瞩目的关注,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,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,并且硅材料本身存在双光子吸收和自由载流子吸收效应,以上均表明硅材料不能适应目前低功耗器件的需求[3]。相比于硅波导,氮化硅材料与包层和衬底的折射率对比度适中,器件尺寸略大,侧壁粗糙引起的辐射损耗较小,并且氮化硅材料中无双光子吸收,因此氮化硅波导损耗更低,更适应目前硅基集成器件低功耗的发展趋势和需求[4]。

虽然氮化硅波导具有低功耗的优势,但是氮化硅波导器件尺寸较大,波导中光场强度较低,且氮化硅材料的非线性系数($n_2 = 2.4 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$)比硅的非线性系数($n_2 = 4.5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$)低很多,导致其非线性效应弱,而非线性效应是实现波长转换、光频梳、光逻辑等的基础,因而氮化硅波导在非线性的应用受到了限制[5] [6]。

为了提高氮化硅波导的非线性效应,可利用氮化硅槽波导,相比于条波导和脊波导,氮化硅槽波导可将光场限制在低折射率的槽中,若在槽中填充具有高非线性系数的材料,可有效提高氮化硅槽波导的非线性效应。2021年,法国巴黎第十一大学的研究小组通过结构优化,在氮化硅槽波导中实现了30%以上的功率限制因子,但是未对其进行非线性效应的研究[7]。

本文采用非线性效应的全矢量模型和槽波导的有限元模场求解法,系统地研究了2 μm 工作波长下氮化硅槽波导结构参数对其非线性系数和功率限制因子的影响。主要研究了氮化硅条宽度、槽宽度和波导高度对功率限制因子、有效模式面积和非线性系数的影响,然后,通过结构与优化,得到最大的非线性系数和最大的功率约束因子。

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, 两个氮化硅条互相靠近从而构成槽波导, 最后在整个波导上方包括槽中填充具有高非线性系数的材料。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 , 槽的宽度为 W_{slot} , 氮化硅槽波导的高度为 H 。在我们的模型中, 包层材料选为 DDMEBT, 它在近红外波段具有较高的三阶非线性克尔系数和较低的材料吸收系数。氮化硅、二氧化硅和包层材料 DDMEBT 的折射率分别取为 1.96、1.44 和 1.8 [8] [9], DDMEBT 的非线性折射率系数在 $2 \mu\text{m}$ 工作波长下为 $0.89 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ [10], 比氮化硅和二氧化硅的非线性折射率系数分别高 2 和 3 个数量级。

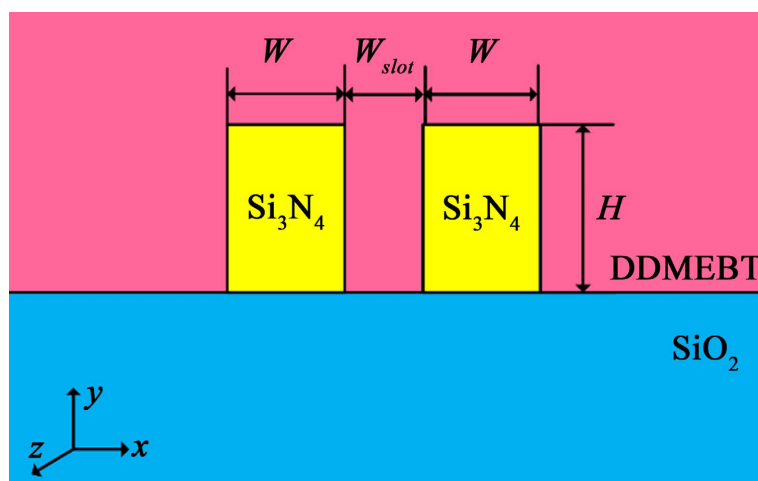


Figure 1. Diagram of the silicon nitride slot waveguide

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, 槽中的功率占比被称为槽波导的功率限制因子, 一般用 Γ 来表示。

波导中三阶非线性相互作用的强度由非线性参数 γ 描述, γ 取决于波导的几何形状和非线性材料的非线性折射率系数。为了准确地评价非线性, 本文采用全矢量模型, 将波导的非线性系数表示为[11]

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\overline{n_2}}{A_{eff}} \quad (2)$$

其中 λ 为工作波长, A_{eff} 为有效模式面积, \bar{n}_2 为平均非线性折射率。 A_{eff} 和 \bar{n}_2 的表达式为[11]

$$A_{eff} = \frac{\left| \int (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{e}_z dx dy \right|^2}{\int \left| (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{e}_z \right|^2 dx dy} \quad (3)$$

$$\bar{n}_2 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \frac{\int n^2(x, y) n_2(x, y) \left(2|\mathbf{E}|^4 + |\mathbf{E}^2|^2 \right) dx dy}{3 \int \left| (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{e}_z \right|^2 dx dy} \quad (4)$$

其中 E 和 H 分别为传播模的电场和磁场, \mathbf{e}_z 为指向正 z 方向的单位矢量, 也是导模的传播方向, ε_0 和 μ_0 分别为真空的介电常数和磁导率, $n(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 分别为线性和非线性折射率。由式(3)可知, n_2 可以看作是非线性折射率在一个非均匀截面上对场分布加权的平均。

根据公式(2)和(4)可知, 想要得到高非线性, 需要减小有效模场面积或提高非线性材料中的功率, 或两者同时进行。需要注意的是, 要充分发挥槽波导的优势, 必须保证槽区域的高功率限制。

3. 结果与讨论

3.1. 功率限制因子

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包层/衬底的折射率, 以减少光模式的泄露。氮化硅槽波导的初始参数分别为: 波导高度为 800 nm, 氮化硅条宽度为 300 nm, 槽宽度为 50 nm。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。

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。

首先研究了氮化硅条宽度对氮化硅槽波导功率限制因子的影响, 其变化情况如图 2 中黑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 800 nm, 氮化硅条宽度从 700 nm 增加到 1500 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 模式的功率限制因子几乎为线性减小, 这是因为随着氮化硅条宽度的增加, 波导的有效折射率明显增加, 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。

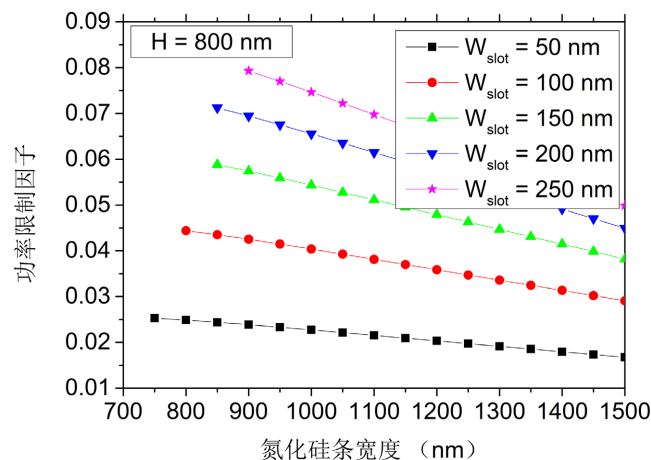


Figure 2. Variation of the power confinement factor with the slot width of the silicon nitride slot waveguide
图 2. 氮化硅槽波导的功率限制因子随槽宽度的变化曲线

随后研究了槽宽度对槽中功率限制因子的影响，波导高度保持为 800 nm，槽宽度从 50 nm 增加到 250 nm，步长为 50 nm，其变化情况如图 2 所示，此时有效折射率小于二氧化硅材料折射率的数据未显示。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 250 nm 时，槽内的功率限制因子增加，槽宽为 250 nm 时得到最大功率限制因子为 7.9%。这是因为随着槽宽度的增加，槽区面积增加，因而限制在槽中的功率增加，槽内的功率限制因子增加。

最后研究了氮化硅槽波导高度对其功率限制因子的影响，其变化情况如图 3 所示，此时槽宽度保持为 250 nm，氮化硅槽波导高度从 800 nm 增加到 1500 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，氮化硅槽波导的功率限制因子增加。当波导高度从 700 nm 增加到 1500 nm 时，槽中的功率限制因子从 7.9% 增加到 16.4%。这也是因为随着波导高度的增加，槽区面积增加，因而限制在槽中的功率增加，槽内的功率限制因子增加。

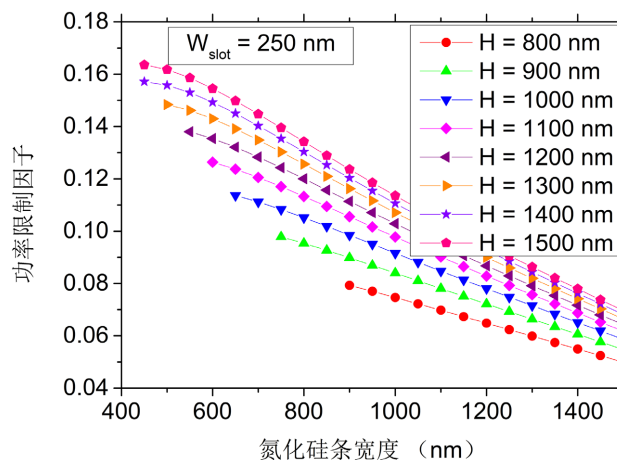


Figure 3. Variation of the power confinement factor with the height of the silicon nitride slot waveguide
图 3. 氮化硅槽波导的功率限制因子随波导高度的变化曲线

3.2. 有效模式面积

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氮化硅槽波导的氮化硅条宽度、槽宽度和波导高度对有效模场面积的影响规律。

首先研究了氮化硅条宽度对氮化硅槽波导有效模式面积的影响，其变化情况如图 4 中黑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 800 nm，氮化硅条宽度从 700 nm 增加到 1500 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，氮化硅槽波导的有效模式面积增加，这是因为随着氮化硅条宽度的增加，波导的有效折射率明显增加，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，因为模式的有效模式面积增加。

随后研究了槽宽度对有效模式面积的影响，波导高度保持为 800 nm，槽宽度从 50 nm 增加到 250 nm，步长为 50 nm，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 250 nm 时，有效模式面积增加，槽宽为 50 nm 时可得到最小有效模式面积为 $2.96 \mu\text{m}^2$ 。这是因为光场主要现在槽区内，槽区的面积为波导高度乘以槽宽度，随着槽宽度的增加，有效模式面积必然增加。

最后研究了氮化硅槽波导高度对其有效模式面积的影响，其变化情况如图 5 所示，此时槽宽度保持为 50 nm，氮化硅槽波导高度从 800 nm 增加到 1500 nm，步长为 100 nm。由图可见，当氮化硅波导高度从 800 nm 增加到 1000 nm 时，氮化硅槽波导的最小有效模式面积逐渐减小，均在氮化硅条宽度临界截止位置出现，当氮化硅波导高度从 1000 nm 增加到 1500 nm 时，最小有效模式面积几乎不变，对应的氮化

硅条宽度也几乎未变, 可得到最小有效模式面积为 $2.57 \mu\text{m}^2$, 此时氮化硅条宽度为 600 nm 。这是因为当波导高度小于 1000 nm 时, 随着波导高度的增加, 氮化硅条宽度允许出现的最小值减小, 因而最小有效模式面积减小, 当波导高度大于 1000 nm 时, 虽然波导高度继续增加, 但是最小模式面积出现时氮化硅条宽度几乎未变, 即模式分布未随波导高度而变化, 因此最小有效模式面积几乎未变。

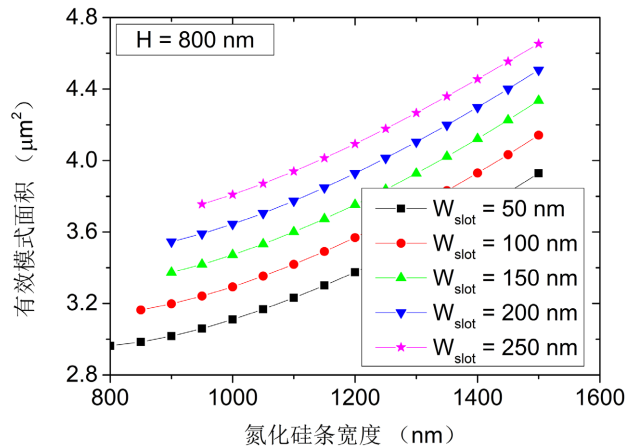


Figure 4. Variation of the effective mode area with the slot width of the silicon nitride slot waveguide
图 4. 氮化硅槽波导的有效模式面积随槽宽度的变化曲线

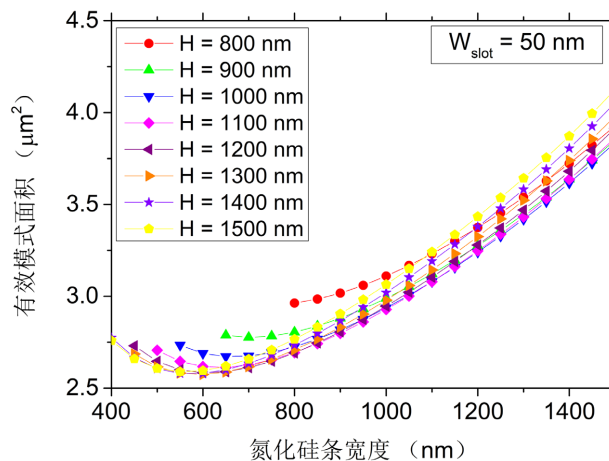


Figure 5. Variation of the effective mode area with the height of the silicon nitride slot waveguide
图 5. 氮化硅槽波导的有效模式面积随波导高度的变化曲线

3.3. 非线性克尔系数

在前两小节的研究基础上, 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氮化硅槽波导的氮化硅条宽度、槽宽度和波导高度对非线性系数的影响规律。

首先研究了氮化硅条宽度对氮化硅槽波导非线性系数的影响, 其变化情况如图 6 中黑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 800 nm , 氮化硅条宽度从 700 nm 增加到 1500 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, 氮化硅槽波导的非线性系数减小, 这是因为随着氮化硅条宽度的增加, 波导的有效模式面积增加, 导致非线性系数减小。

随后研究了槽宽度对非线性系数的影响, 波导高度保持为 800 nm , 槽宽度从 50 nm 增加到 250 nm , 步长为 50 nm , 其变化情况如图 6 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 250 nm 时,非线性系数增加,但是槽宽为 200 nm 的氮化硅波导晚于槽宽为 250 nm 的氮化硅波导截止,因此可得到最大非线性系数,为 3.05 /W/m。

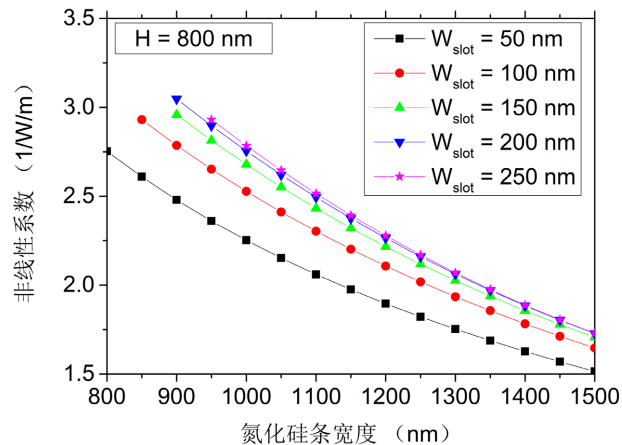


Figure 6. Variation of the nonlinear coefficient with the slot width of the silicon nitride slot waveguide
图 6. 氮化硅槽波导的非线性系数随槽宽度的变化曲线

最后研究了氮化硅槽波导高度对其非线性系数的影响,其变化情况如图 7 所示,此时槽宽度保持为 250 nm,氮化硅槽波导高度从 800 nm 增加到 1500 nm,步长为 100 nm。由图可见,虽然随着波导高度的增加,相同氮化硅条宽度对应的非线性系数减小,但是由于波导高度越高,波导的截止氮化硅条宽度越小,所以会得到更大的非线性系数,因此,当波导高度为 1400 nm 时,氮化硅条宽度为 450 nm 时,得到了最大非线性系数,为 4.36/W/m。

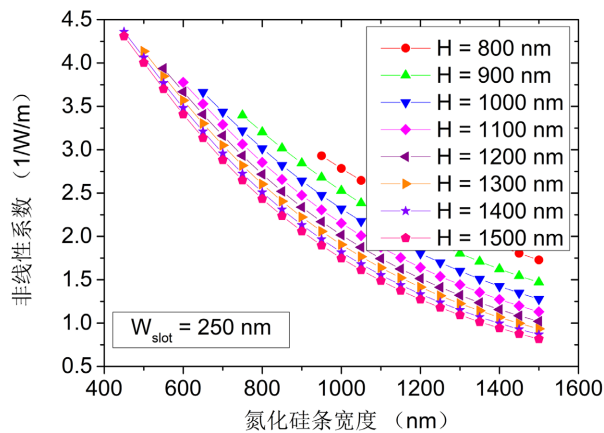


Figure 7. Variation of the nonlinear coefficient with the height of the silicon nitride slot waveguide
图 7. 氮化硅槽波导的非线性系数随波导高度的变化曲线

4. 结论

本文主要研究了 2 μm 工作波长下氮化硅槽波导在不同结构参数下的功率限制因子,有效模式面积和非线性系数。仿真结果表明,氮化硅槽波导的功率限制因子随着氮化硅条宽的减小、随着槽宽的增加、随着波导高度的增加而增加。氮化硅槽波导的有效模式面积随着氮化硅条宽度的减小和槽宽的减小而减小,但是当波导高度高于 1000 nm 后,最小有效模式面积和所对应的氮化硅条宽度几乎不变。氮化硅槽波导的非线性系数随着氮化硅条宽度的减小、随着槽宽的增加、随着波导高度的减小而增加,但是由于

高波导对应的截止氮化硅条宽度更小, 所以波导高度更高时可以得到更大的非线性系数。本文在槽宽为 250 nm, 氮化硅条宽度为 450 nm, 波导高度为 1500 nm 时, 可得到最大的功率限制因子和最小的非线性系数, 分别为 16.4%和 4.36/W/m, 此值与硅槽波导相比仍存在一定差距, 但是本文的工作为 2 μm 工作波长下氮化硅槽波导的研究提供了理论基础, 对基于氮化硅波导的非线性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 μm : 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] Ruan, Z., Shen, L., Zheng, S., *et al.* (2018) Subwavelength Grating slot (SWGS) Waveguide at 2 μm for Chip-Scale Data Transmission. *Nanophotonics*, **7**, 865-871. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0090>
- [3] 王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展[J]. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2015, 45(1): 1-31.
- [4] Xiang, C., Jin, W., Bowers, J.E. (2022) Silicon Nitride Passive and Active Photonic Integrated Circuits: Trends and Prospects. *Photonics Research*, **10**, A82-A96. <https://doi.org/10.1364/PRJ.452936>
- [5] Bristow, A.D., Rotenberg, N. and Van, D.H.M. (2007) Two-Photon Absorption and Kerr Coefficients of Silicon for 850-2200. *Applied Physics Letters*, **90**, Article No. 191104. <https://doi.org/10.1063/1.2737359>
- [6] Wang, Z., Liu, H., Huang, N., *et al.* (2012) Efficient Terahertz-Wave Generation via Four-Wave Mixing in Silicon Membrane Waveguides. *Optics Express*, **20**, 8920-8928. <https://doi.org/10.1364/OE.20.008920>
- [7] Koompai, N., Chaisakul, P., Limsuwan, P., Le Roux, X., Vivien, L. and Marris-Morini, D. (2021) Design and Simulation Investigation of Si₃N₄ Photonics Circuits for Wideband On-Chip Optical Gas Sensing around 2 μm Optical Wavelength. *Sensors*, **21**, Article No. 2513. <https://doi.org/10.3390/s21072513>
- [8] 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.
- [9] Michelle, S.F., Ivan, B., Benjamin, B. and François, D. (2011) Dense Small Molecule Assemblies for Third-Order Nonlinear Optics: DDMEBT. *CLEO: 2011—Laser Applications to Photonic Applications*, Baltimore, Maryland United States, 1-6 May 2011.
- [10] Tu, Z., Jin, Q., Li, X. and Gao, S. (2018) Mid-Infrared Nonlinear Silicon Hybrid Waveguide with High Figure of Merit. *Journal of the Optical Society of America B*, **35**, 1772-1779. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.35.001772>
- [11] Afshar, V.S. and Monroe, T.M. (2009) A Full Vectorial Model for Pulse Propagation in Emerging Waveguides with Subwavelength Structures Part I: Kerr Nonlinearity. *Optics Express*, **17**, 2298-2318. <https://doi.org/10.1364/OE.17.002298>