

DOI: 10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.4.13

硅波导拉曼增益的优化

陈世恩, 翁亚滨

(莆田学院 信息工程学院, 福建 莆田 351100)

摘要: 硅波导尺寸与波导的有效模场面积成正比关系, 减小有效模场面积有助于提高拉曼增益, 但模场面积的减小会导致自由载流子吸收效应的加强, 自由载流子吸收效应的加强又会降低拉曼增益。通过研究波导尺寸与硅波导拉曼增益之间的关系, 进而得出合适的波导尺寸有助于拉曼增益的提高。

关键词: 波导尺寸; 拉曼效应; 硅

中图分类号: TN 432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)04-0390-03

Optimization of silicon waveguide Raman gain

CHEN Shien, WENG Yabin

(College of Information Engineering, Putian University, Putian 351100, China)

Abstract: The size of the silicon waveguide is proportional to its effective mode field area, while the decreasing of the area may help to increase the Raman gain. The area reduction may strengthen the free carrier absorption but decrease the Raman gain. By studying the relationship between the size of the silicon waveguide and Raman gain, we study how to improve the Raman gain with a suitable waveguide dimensions.

Key words: size of waveguide; Raman effect; silicon.

0 引言

随着硅的光学特性研究的深入, 硅的非线性特性及其成熟的制作工艺使得硅在光学应用上得到快速发展^[1]。硅的特有属性使得人们可以在同一个芯片上制作电子器件和光学器件, 从而制成有特殊光电性能的光电集成电路^[2]。硅的光器件的发展有助于推动光子集成电路的发展。目前利用硅的非线性拉曼效应制作了放大器、波长转换

器、激光器等光器件^[3-4]。在拉曼放大器的性能中, 增益是其关键。减小硅波导的有效模场面积, 可以增加功率密度, 功率密度的增加有利于获得更高的拉曼增益。但是随着功率密度的增加, 双光子吸收(TPA)效应也随之增加。TPA 效应增加导致波导中自由载流子的增加, 自由载流子的增加会引起自由载流子吸收(FCA)效应的加强, FCA 效应加强会导致功率的减小。所以一味地减小尺寸并不能获得最优的拉曼增益。通过优化

收稿日期: 2018-04-17

基金项目: 福建省教育厅项目(JK2016036)

作者简介: 陈世恩(1988-), 男, 汉族, 福建莆田人, 莆田学院助教, 硕士, 主要从事硅波导及光子集成方向研究, E-mail: chenshien0924@126.com.

波导尺寸可以使波导中的自由载流子寿命减小, 自由载流子寿命的减小有助于获得较大的拉曼增益。文中通过数值研究波导尺寸与拉曼增益间的关系, 计算不同的波导尺寸, 获得不同的拉曼增益值, 结果表明, 优化波导尺寸可以获得更好的拉曼增益。

1 尺寸对模场面积及载流子寿命的影响

在 SOI 中减小有效模场面积 A_{eff} 可以获得更高的拉曼增益, 但是减小模场面积也会导致 FCA 效应的增强, FCA 效应的增强会减小拉曼增益。减小自由载流子寿命 τ_c 可以减小 FCA 效应, 在 SOI 波导中有效载流子寿命取决于表面复合和扩散。表面复合、扩散、有效模场面积都与波导尺寸有关^[5]。通过调整波导尺寸参数, 可以得到不同尺寸下 A_{eff} 和 τ_c 的参数值, 进而计算出最优的拉曼增益。SOI 波导结构如图 1 所示。

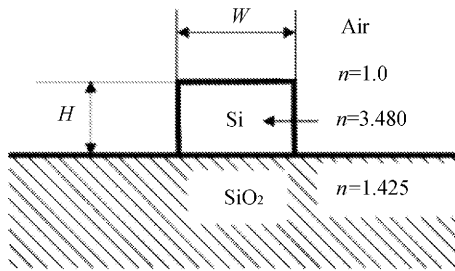
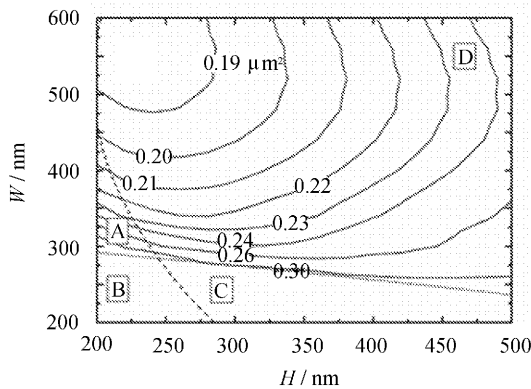
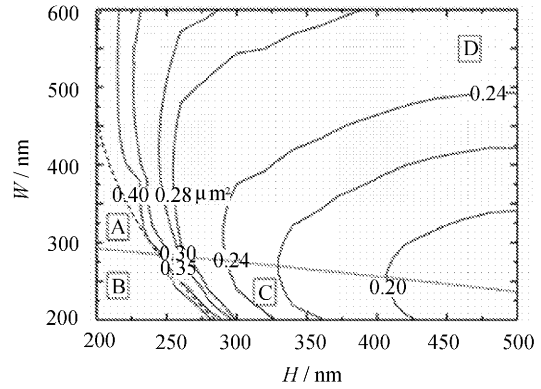


图 1 波导结构

图 1 尺寸参数有: 波导宽度 W 和波导高度 H 。通过全矢量有限差分模式求解器^[6] 计算出波导的有效模场面积。设定泵浦波长 $\lambda_p = 1\ 557\ \text{nm}$, 并且计算不同的尺寸参数, 获得 A_{eff} 与波导尺寸之间的关系如图 2 所示。



(a) TE 模



(b) TM 模

图 2 有效模场面积与波导尺寸的关系图

图中, 区域 A 没有受限制的 TM 模存在; 区域 B 没有受限制的模存在; 区域 C 没有受限制的 TE 模存在; 区域 D 受限制的 TE 模和 TM 模都存在。

图 2 在泵浦波长 $\lambda_p = 1\ 557\ \text{nm}$ 的情况下, 可以获得 A_{eff} 一个最小的值约为 $0.184\ \mu\text{m}^2$ 。

SOI 波导中有效载流子寿命主要取决于波导表面和 Si-SiO₂ 接触面的复合作用。忽略扩散的影响载流子寿命 τ_c 可以由下式计算得到^[5]:

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{H}S + \left(\frac{1}{H} + \frac{2}{W}\right)S' \quad (1)$$

式中: τ_b ——体硅复合时间;

S, S' ——分别为界面复合速度和表面复合速度。

在仿真中 S 和 S' 取值为 $8\ 000\ \text{cm/s}$, τ_b 取值为 $2.3\ \mu\text{s}$ ^[5]。

载流子寿命的仿真结果如图 3 所示。

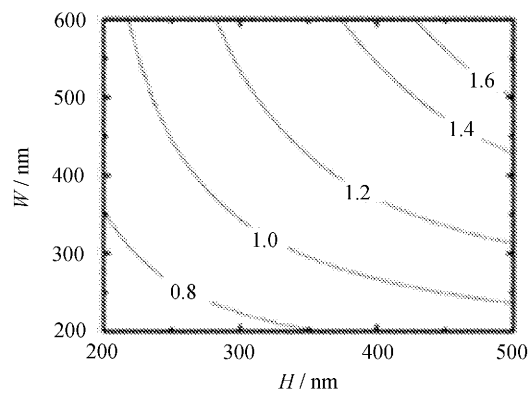


图 3 不同尺寸下载流子寿命

当减小波导尺寸的时候, 波导的有效折射率也会随着减小。因此, 减小尺寸波导的 FCA 损耗减小的同时, 因为折射率减小的缘故, 波导的传输

损耗将增加。

根据图 2 和图 3 所示的数据,假设同极化输入拉曼泵浦和信号,通过下式可以计算出整体的拉曼增益^[7]:

$$I_s(z) = \frac{I(z)}{1 + \left(\frac{I_{p0}}{I_{s0}}\right) \exp[-\gamma I_0 L_{\text{eff}}(z)]} \quad (2)$$

计算过程中,设定拉曼增益系数 $g_R = 20 \text{ cm/GW}$, TPA 系数 $\beta_{\text{TPA}} = 0.5 \text{ cm/GW}$, 信号波长 $\lambda_s = 1694 \text{ nm}$, 波导长度为 1 cm , 波导的损耗设定为 $\alpha = 1.0 \text{ dB/cm}$ 。设定拉曼泵浦功率为 100 mW , 信号功率为 0.1 mW 。根据以上参数,仿真得到的拉曼增益与尺寸的关系如图 4 所示。

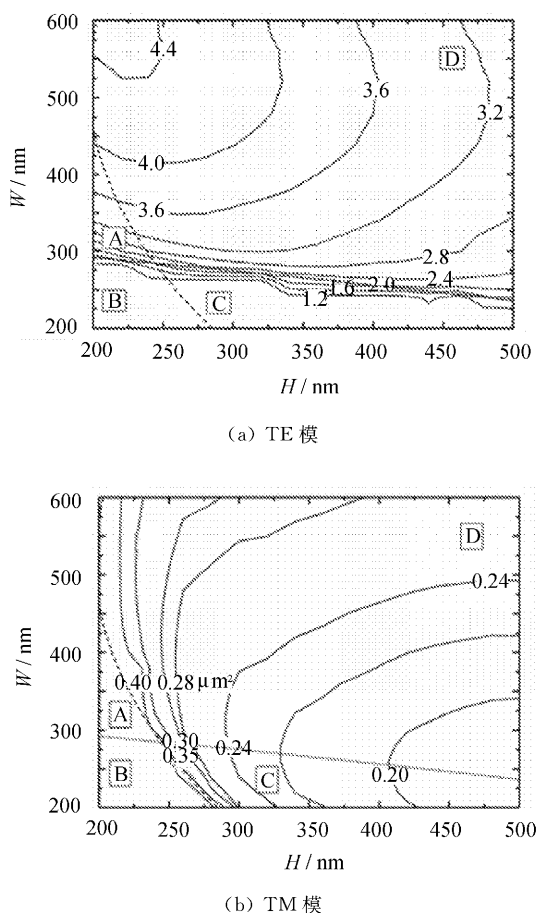


图 4 拉曼增益与尺寸关系图

结合图 3 和图 4 数据,可以得出最大的拉曼增益约为 3.5 dB ,这时候的波导尺寸为

$$W \times H \approx 300 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$$

2 结 语

研究了波导尺寸与 SOI 波导拉曼放大器增益之间的关系。在尺寸不断减小的时候,因为有效模场面积的减小,拉曼增益会增加,同时,由于自由载流子效应加强导致波导传输损耗的增加会导致增益的下降。文中通过优化波导尺寸,在拉曼泵浦功率为 100 mW , 信号功率为 0.1 mW 的情况下,当波导尺寸为 $W \times H \approx 300 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$,可以获得一个最大的拉曼增益约 3.5 dB 。

参考文献:

- [1] J K Doyle, A P Knights. The evolution of silicon photonics as an enabling technology for optical interconnection[J]. Laser Photonics, 2012, 6(4): 504-525.
- [2] R A Soref. The past present and future of silicon photonics[J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2006, 12(6): 1678-1687.
- [3] D Miller. Device requirements for optical interconnects to silicon chips[J]. Proc. IEEE, 2009, 97: 1166-1185.
- [4] B Jalali, V Raguathan, D Dimitropoulos, et al. Raman-based silicon photonics[J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2006, 12: 412-421.
- [5] D Dimitropoulos, R Jhaveri, R Claps, et al. Lifetime of photo generated carriers in silicon on-insulator rib waveguides[J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 71-115.
- [6] Q Xu, V R Almeida, M Lipson. Demonstration of high Raman gain in a submicrometer-size silicon-on-insulator waveguide[J]. Opt. Lett., 2005, 30: 35-37.
- [7] I Rukhlenko, M Premaratne, G P Agrawal. Nonlinear silicon photonics: analytical tools[J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2010, 16: 200-215.