用于喇曼放大的 SOI 脊形波导中自由载流子寿命的解析表达 *

陈铭义† 毛陆虹 郝先人 张世林 郭维廉

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 研究了用于喇曼放大的绝缘硅(SOI)脊形波导中自由载流子寿命与非线性光学损耗的关系. 通过理论推导结合二维数值模拟的方法,提出了带有零反偏 pin 结构的 SOI 脊形波导中自由载流子寿命的解析表达式,该解析表达式与他人的实验结果相符. 结果表明,比起不带 pin 结构的波导,带有零反偏 pin 结构的波导中的自由载流子寿命最多可以缩短 80 %. 同时,研究了 pin 结构外加反偏电压时,自由载流子寿命进一步缩短的原因,并从强场下自由载流子速度饱和的角度出发,得到了自由载流子寿命的理论极限值. 最后,模拟了不同自由载流子寿命情况下 SOI 脊形波导的喇曼净增益随着输入泵浦光功率密度的变化曲线,为硅基喇曼放大器的进一步研究指明了方向.

关键词: 硅基光互连; 喇曼放大; SOI; 脊形波导; 自由载流子吸收; pin 结构

EEACC: 1250

中图分类号: TH744.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4177(2006)07-1310-06

1 引言

近年来,随着片上光互连研究的深入[1],硅基光互连由于其潜在的与标准集成电路工艺兼容的低成本优势,越来越得到各国的重视[2,3]. 其中,利用硅的非线性光学效应实现硅材料的光发射和光放大是一个非常令人瞩目的研究方向. 自从 2003 年 Claps[4]第一次利用受激喇曼散射在绝缘硅(SOI)脊形波导中实现光放大效应以来,人们已经成功地利用该效应在 SOI 脊形波导上研制了喇曼放大器[5,6]、全硅喇曼激光器[7]、连续波喇曼激光器[8]. 这些器件的诞生,是实现硅基光互连的重大里程碑[9]. 这些器件工作的关键,是通过受激喇曼放大效应,使波导内部的光增益大于光损耗,即实现波导内部光功率的喇曼净增益. 阻碍喇曼净增益的一个重要因素是非线性光学损耗,而非线性光学损耗主要来自于双光子吸收效应(two-photon absorption, TPA)和由 TPA 导致的自由载流子吸收效应[10](free carrier absorption, FCA). 在输入泵浦光功率密度比较高的时候,TPA 造成的非线性光学损耗与由 TPA 引起的 FCA 造成的光学损耗相比较,可以忽略[11],而 FCA 造成的非线性光学损耗将会严重限制喇曼净增益. 通过减小自由载流子的寿命,可以减小由 FCA 造成的非线性光学损耗,从而提高喇曼净增益. Liang[12]讨论了 FCA 对受激喇曼放大的影响并推导了由此造成的非线性光学损耗的理论表达式. Dimitropoulos[13]推导了 SOI 脊形波导中自由载流子寿命的解析表达,并指出在波导脊形外侧的平板部分分别形成高掺杂的 p 区和 n 区,构成带 pin 结构的 SOI 脊形波导,可以有效地缩短自由载流子寿命,但是文章只给出了数值模拟的结果,并没有合适的理论解释,也没有对减小的自由载流子寿命的极限作出合理预测. Jones[3]测试了带有 pin 结构 SOI 脊形波导中自由载流子的寿命,验证了 Dimitropoulos[13]的想法,与此同时,文献[5～8]利用带 pin 结构的 SOI 脊形波导制造了若干里程碑式的有源光电子器件. 这表明,带 pin 结构的 SOI 脊形波导已经开始在硅基光互连的实际应用中发挥巨大作用.

本文首次通过理论推导结合二维数值模拟的方法,提出了带有 pin 结构的 SOI 脊形波导中自由载流子寿命的解析表达式,该解析表达式给出了较为简明和清晰的物理图像,能很好地解释自由载流子寿命减小的原因. 同时,从强场下自由载流子速度饱和的角度出发,首次预测了 pin 结构外加反偏电压时 SOI 脊形波导中自由载流子寿命的理论极限值. 最后模拟了不同自由载流子寿命情况下 SOI 脊形波导的喇曼净增益曲线,这一结果对硅基发光器件和硅基光调制器的设计和制作,如硅基喇曼放大器、硅基喇曼激光器、低损耗硅基光波导和硅基 Mach-

*国家自然科学重点基金资助项目(批准号:60536030)

†通信作者. Email: tjucmy@126.com

2005-11-14 收到,2006-03-06 定稿

©2006 中国电子学会

Zehnder 光调制器具有一定的指导意义.

2　理论推导

2.1　基础知识

当入射的泵浦光在波导中传输的时候,会通过 TPA 在波导中产生光生电子-空穴对,从而引起 FCA. FCA 损耗系数可以表示如下[11]:

$$\alpha^{FCA} = \frac{1.45\times10^{-17}\times(\lambda/1.55)^2\tau_{eff}\beta I_p^2}{2h\upsilon}$$

其中　τ_{eff} 是自由载流子寿命;λ 是传播波长;$h\upsilon$ 是光子的能量;β 是 TPA 系数;I_p 是入射泵浦光功率密度.通过喇曼散射得到的斯托克信号光束的光功率密度 I_s 沿着波导纵向(z 方向)的演化可以表示如下[11]:

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = -(\alpha_{in} + \alpha^{FCA}(z))I_s + (g_r - 2\beta)I_p I_s$$

其中　α_{in} 是波导的线性损耗;g_r 是喇曼增益系数.通过一段长度为 L 的波导,获得的喇曼净增益可以表示为[5]:

$$G_{Raman} = 10\lg\left[\frac{I_s(L)}{I_s(0)}\right]$$

可见,α^{FCA} 的大小直接影响到获得的喇曼净增益的大小.在入射泵浦光功率密度一定的情况下,α^{FCA} 越大,喇曼净增益越小.同时,$\alpha^{FCA}\propto\tau_{eff}$,通过减小 τ_{eff},可以减小 α^{FCA},从而提高喇曼净增益.

2.2　自由载流子寿命的解析表达式

Dimitropoulos[13]推导了不带 pin 结构的 SOI 脊形波导(图 1(a))中自由载流子寿命的解析表达式为:

$$\tau_{eff} = \frac{\overline{N}}{\overline{G}} = \left[\frac{1}{\tau_b} + \frac{S_1}{H} + \frac{w+2(H-h)}{wH}S_2 + \frac{2h}{H}\sqrt{\frac{D}{w^2\tau_b'}}\right]^{-1} \quad (1)$$

其中　$\overline{N}$ 为由 TPA 产生的光生电子-空穴对的稳态浓度;$\overline{G}$ 为脊形内部的光生电子-空穴对的平均产生率,并且满足 $\int G\,dA = \overline{G}wH$;$S_1$ 为 Si/SiO_2 的界面复合速率;S_2 为 Si 的表面复合速率;τ_b 为 Si 的体复合寿命;$D = \frac{2D_nD_p}{D_n+D_p}$ 为载流子的双极扩散系数;$\frac{1}{\tau_b'} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{S_1+S_2}{h}$ 为脊形外部($|x| \geq \frac{w}{2}$)载流子的复合几率.

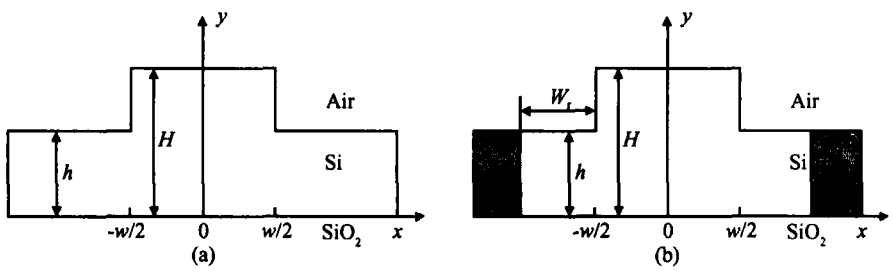

图 1　脊形波导结构示意图　(a) 不带 pin 结构;(b) 带 pin 结构

Fig. 1　Rib waveguide　(a) Without pin;(b) With pin

在波导的双肩上分别形成高掺杂的 p 形区和 n 形区,构成带 pin 结构的 SOI 脊形波导后(如图 1(b)),短接 pn 时,pin 结构内建电场的存在能够有效地缩短自由载流子寿命.对此,我们可以作如下理论推导:

对脊形内部,使用二维稳态连续性方程[13],可以得到:

$$\oint f\cdot\rho\,dl = \int(G - N/\tau_b)\,dA$$

其中　f 为自由载流子的流密度;ρ 为积分路径的单位外法向量.在脊形内部 $f = -D\nabla N$;在 Si/SiO_2 界面 $f\cdot\rho = -S_1N$;在 Si 表面 $f\cdot\rho = -S_2N$,由此得到:

$$-2hD\left.\frac{dN}{dx}\right|_{|x|=\frac{w}{2}} + wS_1N + [w+2(H-h)]S_2N = wH(\overline{G} - \frac{\overline{N}}{\tau_b}) \quad (2)$$

在产生大量的光生电子-空穴对的脊形内部以及脊形附近的扩散区域内,自由载流子的浓度远大于 p 区和 n 区耗尽区,所以脊形内部以及脊形附近的扩散区域内的电导远大于 p 区和 n 区耗尽区,所以可以近似认为内建电势全部降落在 p 区和 n 区耗尽区.因此在脊形外部到耗尽区边缘($W_r + \frac{w}{2} \geq |x| \geq \frac{w}{2}$)范围内,自由载流子作扩散运动.非平衡自由载流子的稳态浓度分布 $N(x)$ 满足[15]:

$$N(x) = N(\frac{w}{2})\frac{\mathrm{sh}[(W_r - x + \frac{w}{2})/L]}{\mathrm{sh}[W_r/L]}$$

$$W_r + \frac{w}{2} \geq |x| \geq \frac{w}{2}$$

其中 $N(\frac{w}{2})$ 为脊形边缘的非平衡自由载流子的稳态浓度; $L = \sqrt{D\tau'_b}$ 为脊形外部的非平衡自由载流子的扩散长度,当 $L \gg W_r$ 时 $N(x)$ 满足:

$$N(x) \approx N(\frac{w}{2})[1 - (x - \frac{w}{2})/W_r] \quad (3)$$

联立(2),(3)式,可以得到自由载流子寿命的解析表达式:

$$\tau'_{\mathrm{eff}} = \frac{N}{G} = \left[\frac{1}{\tau_b} + \frac{S_1}{H} + \frac{w + 2(H - h)}{wH}S_2 + \frac{2h}{H}\sqrt{\frac{D^2}{W^2 W_r^2}}\right]^{-1} \quad (4)$$

(4)式中的各个变量的意义与(1)式中相同.

在这里,我们假设光场集中在脊形内部,并且认为稳态时,脊形内部具有统一的自由载流子浓度分布[7,9].这一假设会使结果比实际情况偏大,因为稳态时有一部分自由载流子会由于脊形内部的浓度差扩散到脊形外部.但总体来说,这一假设是合理的,所得到的解析表达式能较好地反映实际情况.

2.3 解析表达式的物理意义

自由载流子寿命 τ_{eff} 定量地反映了脊形内部的自由载流子从产生到消失的平均时间.自由载流子一方面由于复合过程而消失,另一方面由于迁移出脊形而消失,用公式可以表示为[11]:

$$\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}} = \frac{1}{\tau_{\mathrm{br}}} + \frac{1}{\tau_{\mathrm{tr}}}$$

其中 τ_{br} 表示自由载流子在脊形内部的复合寿命; τ_{tr} 表示自由载流子迁移出脊形的时间.脊形内部的复合过程包括体复合和表面复合,所以自由载流子的体复合寿命可以表示为:

$$\frac{1}{\tau_{\mathrm{br}}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{S_1 + S_2}{H}$$

自由载流子迁移出脊形的时间可以表示为:

$$\tau_{\mathrm{tr}} = \frac{w}{2v_{\mathrm{tr}}}$$

其中 w 表示波导脊宽; v_{tr} 表示自由载流子的迁移速度.

根据我们推导的结果(4)式, v_{tr} 可以表示为:

$$v_{\mathrm{tr}} = \frac{H - h}{H}S_1 + \frac{h}{H} \times \frac{D}{W_r} \quad (5)$$

根据 Dimitropoulos 推导的结果(1)式, v_{tr} 可以表示为:

$$v_{\mathrm{tr}} = \frac{H - h}{H}S_1 + \frac{h}{H} \times \frac{D}{L} \quad (6)$$

比较(5),(6)式,由于 $W_r < L$,所以带有零反偏 pin 结构的脊形波导提高了自由载流子的迁移速度,从而有效地缩短了自由载流子的寿命.

给 pin 结构外加反偏电压后,由于增大了内建电场,自由载流子的迁移速度进一步提高,所以能够进一步缩短自由载流子寿命.随着内建电场不断增大,自由载流子的迁移速度在强场下将趋于饱和.此时,自由载流子寿命达到理论极限值,可以表示为:

$$\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}} = \frac{1}{\tau_{\mathrm{br}}} + \frac{w}{2v_{\mathrm{sat}}} \quad (7)$$

其中 v_{sat} 表示自由载流子在强场下的饱和迁移速度.

3 模拟结果与讨论

使用二维数值模拟软件 Silvaco Atlas 2.6.5 对带有 pin 结构的不同尺寸的 SOI 脊形波导中的自由载流子寿命进行了数值模拟.模拟采用的衬底掺杂浓度为 $2 \times 10^{11}\,\mathrm{cm}^{-3}$,p 形区和 n 形区的掺杂浓度均为 $10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$,所得结果见下文讨论.

图 2 给出了自由载流子寿命随 h/H 的变化曲线,直线代表通过解析式(4)得到的理论计算值,菱形符号代表数值模拟值.可见,理论计算值与数值模拟值吻合得非常好.这说明我们可以采用解析式(4)方便地计算自由载流子寿命.作为比较,我们用虚线绘制了通过解析式(1)计算的不带 pin 结构的 SOI 脊形波导中的自由载流子寿命.可见,比起相同尺寸的不带 pin 结构的波导,带有零反偏 pin 结构的波导有效地缩短了自由载流子寿命.通过比较发现,后者最多可以把自由载流子寿命缩短 80 %.

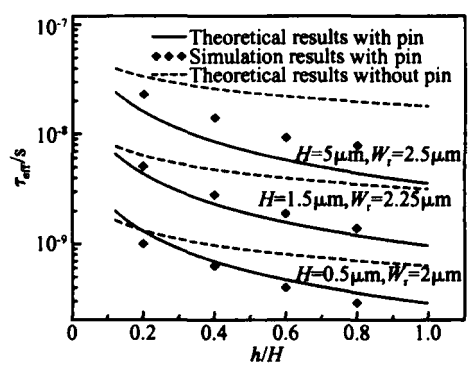

图 2 自由载流子寿命随着 h/H 的变化曲线 $w = H$

Fig. 2 Free carrier lifetime versus h/H $w = H$

通过单模计算[16],不难得到,当 $w = H$ 时,必须保证 $0.5 < r < 0.58$.从图中可知,对于不同尺寸的波导,自由载流子寿命为 1～10ns 数量级.这与

Jones[3]报道的通过实测得到的 $H = 1.55\mu m$, $w = 1.5\mu m$, $h = 0.85\mu m$ 的 SOI 脊形波导在短接 pn 时 6.8ns 的自由载流子寿命相符. 这表明得到的自由载流子寿命的解析表达式不仅与数值模拟吻合,也与文献[3]的实验结果吻合.

pin 结构外加反偏电压后,自由载流子寿命可以进一步缩短. 图 3(a),(b) 显示 pin 结构在外加零反偏电压和外加 10V 反偏电压时,波导内部的能带图. 可以看出,在没有外加反偏电压时,i 区具有几乎统一的费米能级. 外加 10V 反偏电压后,内建电场加强,i 区能带发生强烈弯曲,加强的内建电场从 i 区抽取更多的电子注入 n 区,所以自由载流子寿命缩短.

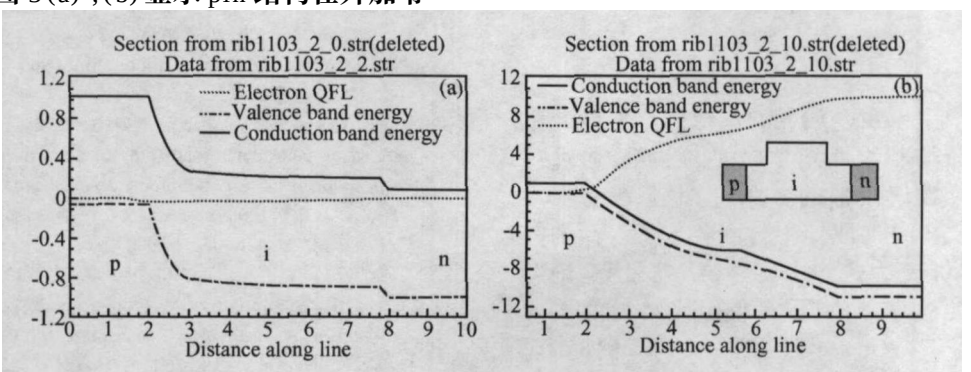

图 3　波导内部的能带图　$w = H = 1.5\mu m$, $h = 0.6H$　(a) pin 外加零反偏电压; (b) pin 外加 10V 反偏电压

Fig. 3　Energy band inside the waveguide　$w = H = 1.5\mu m$, $h = 0.6H$　(a) Zero reverse bias voltage on pin; (b) 10V reverse bias voltage on pin

图 4 给出自由载流子寿命随着 pin 结构外加反偏电压的变化曲线. 从模拟结果可以看出,随着 pin 结构外加反偏电压的提高,自由载流子寿命降低并且趋于极限值. 对于尺寸 $H = 5, 1.5, 0.5\mu m$ 的脊形波导,自由载流子极限寿命出现时外加的反偏电压分别为 40, 15, 12.5V. 通常情况下,硅中的自由载流子在强场下的饱和迁移速度为 10^7 cm/s 数量级[17],所以根据(7)式可以计算出自由载流子寿命的极限值,理论计算值和数值模拟值的比较见表 1. 可见,两者可以很好地吻合. 这个寿命极限值是通过提高 pin 结构外加反偏电压的方法所能得到的自由载流子寿命的最小值.

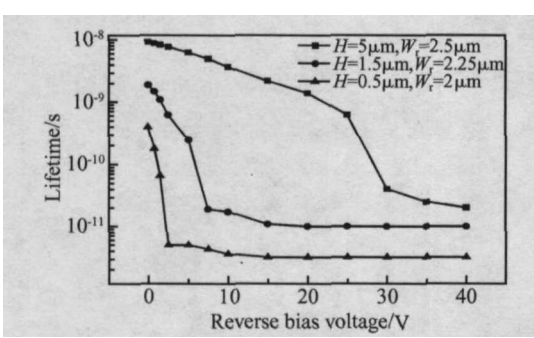

图 4　自由载流子寿命随 pin 外加反偏电压的变化曲线(w = H, h = 0.6H)

Fig. 4　Free carrier lifetime versus reverse bias voltage on pin　w = H, h = 0.6H

表 1　自由载流子寿命极限值的理论计算值与数值模拟值比较

Table 1　Limit value of the free carrier lifetime by theoretical computation and numerical simulation

尺寸	寿命	
	理论计算值/ ns	数值模拟值/ ns
H = 5μm	0.025	0.02
H = 1.5μm	0.0075	0.01
H = 0.5μm	0.0025	0.0032

图 5 给出了长度 L = 4.8cm、宽度 w = 1.5μm 的 SOI 脊形波导在不同自由载流子寿命情况的喇曼净增益随着入射泵浦光功率密度的变化曲线[3]. 模拟使用的参数为 $\beta = 0.5$cm/GW, $g_r = 9.5$cm/GW, $\alpha_{in} = 0.39$dB/cm.

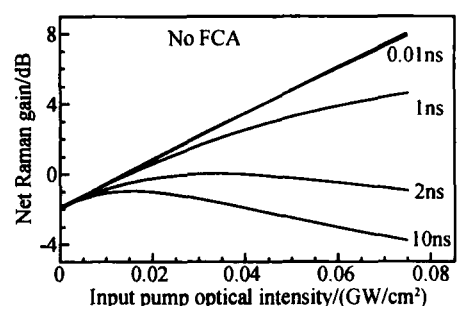

图 5　喇曼净增益随着入射泵浦光功率密度的变化曲线　w = H = 1.5μm, h = 0.6H

Fig. 5　Net Raman gain plot versus the input pump optical intensity　w = H = 1.5μm, h = 0.6H

可以看出,在输入相同的泵浦光功率密度下,喇曼净增益随着自由载流子寿命的增大而降低. 当自由载流子寿命较大的时候(≥2ns) ,不能获得喇曼净增益. 当自由载流子寿命达到理论极限值的时候,喇曼增益曲线几乎与没有 FCA 情况下的曲线重合. 这表明在自由载流子寿命达到理论极限值的时候,可以忽略由 FCA 带来的非线性光学损耗.

4 结论

本文研究了用于喇曼放大的绝缘硅脊形波导中自由载流子寿命与非线性光学损耗的关系. 通过理论推导结合二维数值模拟的方法,提出了带有零反偏 pin 结构的 SOI 脊形波导中自由载流子寿命的解析表达式,该解析表达式符合实际. 结果表明,比起不带 pin 结构的波导,带有零反偏 pin 结构的波导中的自由载流子寿命最多可以缩短 80 %. 同时,研究了 pin 结构外加反偏电压时,自由载流子寿命进一步缩短的原因,并从强场下自由载流子速度饱和的角度出发,得到了自由载流子寿命的理论极限值. 最后,模拟了不同自由载流子寿命情况下 SOI 脊形波导的喇曼净增益随着输入泵浦光功率密度的变化曲线,为硅基喇曼放大器的进一步研究指明了方向.

参考文献

[1] Kobrinsky M J, Block B A, Zheng J, et al. On-chip optical interconnects. Intel Technology Journal, 2004, 8(2): 129

[2] Reed G T. Device physics: the optical age of silicon. Nature, 2004, 427: 595

[3] Salib M, Liao L, Jones R, et al. Silicon photonics. Intel Technology Journal, 2004, 8(2): 143

[4] Claps R, Dimitropoulos D, Raghunathan V, et al. Observation of stimulated Raman amplification in silicon waveguide. Optics Express, 2003, 11(15): 1731

[5] Jones R, Rong H, Liu A, et al. Net continuous wave optical gain in a low loss silicon-on-insulator waveguide by stimulated Raman scattering. Optics Express, 2005, 13(2): 519

[6] Xu Q, Almeida V R, Lipson M. Time-resolved study of Raman gain in highly confined silicon-on-insulator waveguides. Optics Express, 2004, 12(19): 4437

[7] Rong H, Jones R, Liu A, et al. An all-silicon Raman laser. Nature, 2005, 433(7023): 292

[8] Rong H, Liu A, Jones R, et al. A continuous-wave Raman silicon laser. Nature, 2005, 433(7027): 725

[9] Faist J. Optoelectronics: silicon shines on 2005. Nature, 2005, 433(7023): 691

[10] Yan Qingfeng, Yu Jinzhong. Effects of carriers absorption on Mach-Zehnder interferometer electrooptical modulator in silicon-on-insulator. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(12): 1308(in Chinese) [严清峰,余金中. 载流子吸收对 SOI Mach-Zehnder 干涉形电光调制器性能的影响. 半导体学报, 2002, 23(12): 1308]

[11] Claps R, Raghunathan V, Dimitropoulos D, et al. Influence of nonlinear absorption on Raman amplification in silicon waveguides. Optics Express, 2004, 12(12): 2774

[12] Liang T K, Tang H K. Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides. Appl Phys Lett, 2004, 84(15): 2745

[13] Dimitropoulos D, Jhaveri R, Claps R, et al. Lifetime of photogenerated carriers in silicon-on-insulator rib waveguides. Appl Phys Lett, 2005, 86(7): 2745

[14] Raghunathan V, Claps R, Dimitropoulos D, et al. Parametric Raman wavelength conversion in scaled silicon waveguides. J Lightwave Technol, 2005, 23(6): 2094

[15] Zhao Cezhou. Semiconductor guided-wave optical device theory and technology. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 141[赵策洲. 半导体导波光学器件理论及技术. 北京:国防工业出版社, 1998: 141]

[16] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO_2. IEEE Quantum Electron, 1991, 27(8): 1971

[17] Silvaco International. Atlas User's Manual. Version 1.5.0. Santa Clara, CA, 94054, 1997: 5

An Analytical Expression of Free Carrier Lifetime in an SOI Rib Waveguide Used for Raman Amplification *

Chen Mingyi†, Mao Luhong, Hao Xianren, Zhang Shilin, and Guo Weilian

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The lifetime of free carriers in a silicon-on-insulator (SOI) rib waveguide, which is used for Raman amplification, is studied in connection with the nonlinear optical loss. An analytical expression for the free carrier lifetime in an SOI rib waveguide with a pin under a reverse bias voltage of zero, which is in accord with others's experimental results, is presented through theoretical deduction and two-dimensional numerical simulation. The results indicate a maximum reduction of to 80 % of the free carrier lifetime inside the waveguide with a pin under a reverse bias voltage of zero compared to the one with no pin. The reason for the further reduction of the free carrier lifetime after reverse biasing the pin is also studied, and the theoretical limit of the free carrier lifetime is obtained through the view of velocity saturation under a strong field. Finally, the net Raman gain of the SOI rib waveguide versus the input pump optical intensity is simulated under different free carrier lifetimes, which directs the study of silicon-based Raman amplification.

Key words: silicon-based optical interconnection; Raman amplification; SOI; rib waveguide; free carrier absorption; pin structure

EEACC: 1250

Article ID: 0253-4177 (2006) 07-1310-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60536030)

† Corresponding author. Email: tjucmy@126.com

Received 14 November 2005, revised manuscript received 6 March 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics