

硅基拉曼放大器增益的理论分析*

刘组学 冯鸣[†] 郭清华 乔丽 吕可诚

(弱光非线性光子学教育部重点实验室,南开大学物理学院,天津 300071)

(2010年2月5日收到;2010年4月6日收到修改稿)

提出了硅波导中受激拉曼散射信号光获得正增益的理论分析方法,并对关键参量自由载流子寿命和抽运光功率做了分析,得到了可以获得正增益的自由载流子寿命阈值公式,抽运光功率阈值.研究了抽运方式对于硅基拉曼放大器增益的影响,并指出采用双向抽运方式可以使拉曼增益大大提高.

关键词: 硅基放大器, 拉曼放大器, 抽运方式

PACS: 42.65.Dr, 42.60.Da, 42.65.Wi

1. 引言

硅基光子器件由于在光电集成、器件小型化和降低成本方面具有独特优势而受到科学界和产业界的高度重视.尤其是最近几年对硅材料非线性效应^[1](特别是受激拉曼散射^[2-9])的深入研究使硅基发光器件的研制取得了重大突破.这使得硅基拉曼放大器和激光器的研制成为可能,其中在2005年Rong等人成功研制了脉冲和连续的硅基拉曼激光器^[10,11],随后Jalali等又提出研制中红外波段的硅基拉曼放大器^[12,13]和基于多孔硅的硅基拉曼放大器^[14,15],这一系列的研究进展展现出了硅基发光器件的光明前景.但是在通信波段的拉曼光放大由于受到硅材料中不可忽略的双光子吸收(two-photon absorption, TPA)和自由载流子吸收(free-carrier absorption, FCA)所造成的非线性损耗的影响,增益的大小受到很大限制,本文通过对于硅波导中抽运光和信号光传播特性的分析,提出了提高硅基拉曼放大器增益的有效途径.

2. 理论模型

受激拉曼散射是一种具有广泛应用的非线性光学效应,它通过光子和分子之间的能量转换,将入射

的高频光子转化为低频光子,从而实现对信号光的功率放大.其中以光纤为介质的光纤拉曼放大器的研究已经取得了很大的进展^[16-19],并已经实用化.然而硅是一种半导体材料,在通信波段,其价带电子会吸收两个光子而跃迁至导带成为自由电子,这些自由载流子又会对光子产生进一步吸收,这就是TPA和FCA.TPA和FCA的出现成为在硅波导中实现拉曼放大的巨大障碍.为了减小TPA和FCA的影响,一种常用的方法是在波导的两侧制作p型掺杂区和n型掺杂区,构建pn结,然后通过加反向pn结电压在波导内形成电场,以有效的清除由于TPA导致的自由载流子,降低自由载流子寿命从而减小自由载流子造成的吸收损耗(波导结构如图1所示).

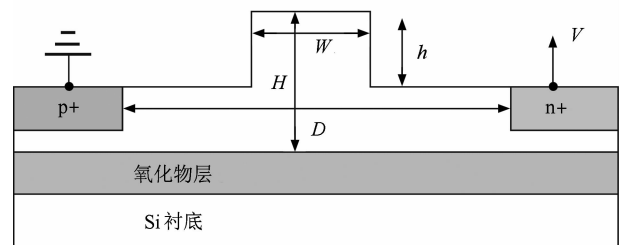


图1 具有pn结的脊形硅波导结构示意图

在这种波导结构中,硅基拉曼放大器的抽运光和信号光在硅波导中传播特性可有下述耦合方程给出:

* 国家自然科学基金(批准号:60708001)和高等学校博士点基金新教师项目(批准号:20070055082)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: nkfm@mail.nankai.edu.cn

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \frac{\beta}{A_{\text{eff}}} P_p^2 - \sigma N(z) P_p, \quad (1)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_r}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_s P_s - \frac{2\beta}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \sigma N(z) P_s, \quad (2)$$

其中 $\alpha_{p(s)}$ 为线性吸收系数, β 为双光子吸收系数, A_{eff} 为硅波导的有效模面积, σ 为自由载流子吸收截面, $N(z)$ 为波导不同位置由于双光子吸收产生的自由载流子浓度. 在上述耦合方程中, 我们采用了小信号近似, 即假设 $P_p \gg P_s$, 这样可认为抽运光的变化情况与信号光无关, 而 $N(z)$ 也可认为主要由抽运光引起, 即可以表示为

$$N(z) = \frac{\beta \lambda_p \tau_{\text{eff}}}{2hc} \frac{P_p^2}{A_{\text{eff}}^2}. \quad (3)$$

这里 τ_{eff} 为自由载流子的有效寿命, 它表征在扩散、复合及外加电场的综合作用下自由载流子的消散速度. 在波导结构给定时, 自由载流子的有效寿命可以通过改变外加电场来进行调节.

3. 理论分析

对信号光在硅波导中的传输变化进行分析, 耦合方程(2)式中右边的第一项代表了拉曼增益项, 第二项为线性损耗, 第三项为双光子吸收, 第四项为自由载流子吸收损耗. 可以发现拉曼增益随抽运光增加, 而自由载流子吸收随着抽运光强的平方变化, 所以单独的增加光功率并不能获得净增益. 为了获得净增益, 需要 $\frac{dP_s}{dz} > 0$, 我们定义 $G_{\text{eff}} = \frac{dP_s}{dz}$ 为有效增益系数, 因此要使信号光得到放大需要

$$G_{\text{eff}} = \frac{g_r}{A_{\text{eff}}} P_p - \alpha_s - \frac{2\beta}{A_{\text{eff}}} P_p - \sigma \frac{\beta \lambda_p \tau_{\text{eff}}}{2hc} \frac{P_p^2}{A_{\text{eff}}^2} > 0, \quad (4)$$

上式为关于 P_p 的一元二次方程, 若满足大于 0, 则需要满足两个条件: 第一, 方程有解存在; 第二, 抽运光的取值在方程的两个根之间.

首先令方程有解, 由根存在的判断条件得到

$$\tau_{\text{eff}} < \tau_{\text{th}} = \frac{hc(g_r - 2\beta)}{2\alpha_s \beta \lambda_p}, \quad (5)$$

即只有当(5)式满足时, 才能使 G_{eff} 取正值, 可以看出, 只有当自由载流子寿命小于阈值 τ_{th} 时, 信号光才有可能获得正增益. 同时我们又由一元二次方程的求根公式得到

$$P_1 = \frac{hcA_{\text{eff}}(g_r - 2\beta)}{\sigma\beta\lambda\tau_{\text{eff}}} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2\alpha_s\sigma\beta\lambda_p\tau_{\text{eff}}}{hc(g_r - 2\beta)^2}} \right], \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{hcA_{\text{eff}}(g_r - 2\beta)}{\sigma\beta\lambda\tau_{\text{eff}}} \times \left[1 + \sqrt{1 - \frac{2\alpha_s\sigma\beta\lambda_p\tau_{\text{eff}}}{hc(g_r - 2\beta)^2}} \right]. \quad (7)$$

可见, 在自由载流子寿命 $\tau_{\text{eff}} < \tau_{\text{th}}$ 的情况下, 抽运光功率需要满足 $P_1 < P_p < P_2$ 才能使有效增益系数为正.

为了更明确的说明(6), (7)式的物理意义, 我们对上式进行了进一步分析. 以(6)式为例, 一般为了在硅波导中得到正的拉曼增益, 需要自由载流子寿命尽量减小, 所以可以认为右边根号部分中的第二项满足

$$\frac{2\alpha_s\sigma\beta\lambda_p\tau_{\text{eff}}}{hc(g_r - 2\beta)^2} \ll 1.$$

将根号部分做级数展开且只取前两项, 得到

$$\sqrt{1 - \frac{2\alpha_s\sigma\beta\lambda_p\tau_{\text{eff}}}{hc(g_r - 2\beta)^2}} \approx 1 - \frac{\alpha_s\sigma\beta\lambda_p\tau_{\text{eff}}}{hc(g_r - 2\beta)^2}. \quad (8)$$

将(8)式代入(6), (7)式, 化简得到

$$P_1 = \frac{A_{\text{eff}}\alpha_s}{g_r - 2\beta} \approx \frac{A_{\text{eff}}\alpha_s}{g_r}, \quad (9)$$

$$P_2 = \frac{2hcA_{\text{eff}}(g_r - 2\beta)}{\sigma\beta\lambda_p\tau_{\text{eff}}} - \frac{A_{\text{eff}}\alpha_s}{g_r - 2\beta}. \quad (10)$$

(9), (10)式为可以得到正有效增益系数的抽运光功率取值范围, 即为光功率的阈值公式, 其物理意义已经很明显, 其中 P_1 主要受到硅波导线性吸收损耗的影响, 我们可以通过减小硅波导的有效截面积、线性吸收损耗系数使阈值进一步减小; P_2 则主要受到与光强相关的非线性损耗的影响, 我们可以通过减小自由载流子寿命、减小自由载流子吸收截面来提高 P_2 的值, 这将有助于增大有效增益系数 G_{eff} .

4. 数值分析与讨论

为了进一步说明以上的分析, 我们对硅基拉曼放大器进行了数值分析. 数值分析中所取参数为 $\alpha_p = \alpha_s = 0.5 \text{ dB/cm}$, $\beta = 0.5 \text{ cm/GW}$, $A_{\text{eff}} = 1.6 \text{ } \mu\text{m}^2$, $\sigma = 1.45 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, $g_r = 10 \text{ cm/GW}$. 我们通过计算得到了有效增益系数随自由载流子寿命和抽运光功率的变化曲线, 如图 2 所示.

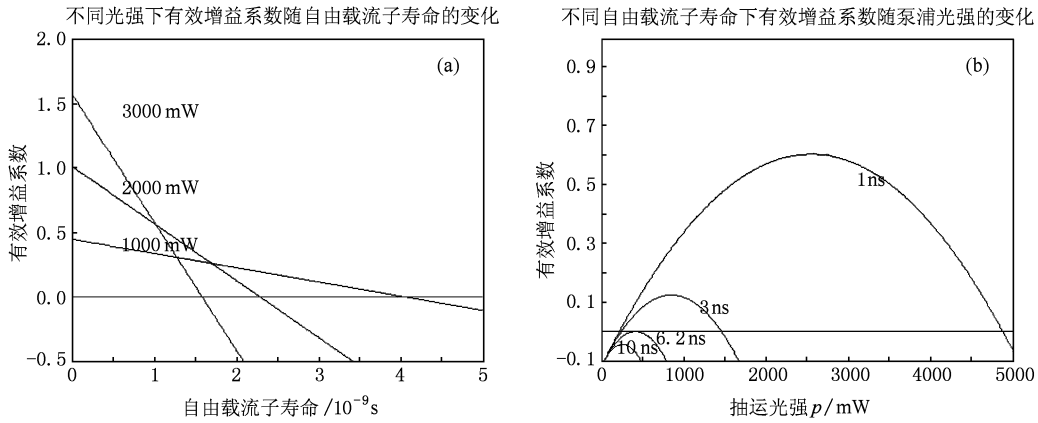


图2 有效增益系数随自由载流子有效寿命(a)和抽运光功率(b)的变化曲线

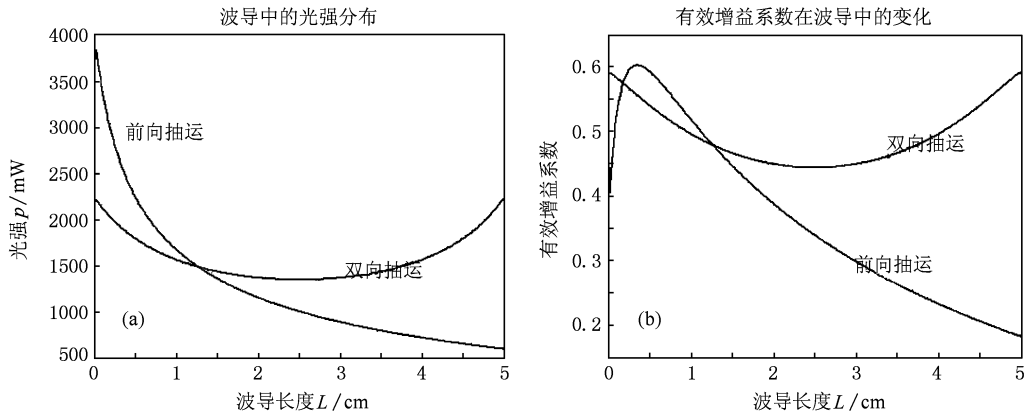


图3 前向抽运和双向抽运时的硅波导中光功率分布(a)和对应的有效增益系数的变化曲线(b) (其中参数 $\tau_{\text{eff}} = 1 \text{ ns}$, 波导长度为 $L = 2 \text{ cm}$, 前向抽运采用 4000 mW 抽运源, 双向抽运采用前后各 2000 mW 抽运源, 耦合信号光功率为 2 mW)

从(4)式可以看出, 要使信号光得到净增益, 抽运光功率和自由载流子寿命是两个关键的参量. 要得到净增益, 必须减小自由载流子寿命, 只有当自由载流子寿命小于其阈值时, 我们才可以改变其他参量如抽运光强, 波导长度等来得到正有效增益系数, 进而得到正增益; 若自由载流子寿命大于阈值, 则无论怎样改变其他参量都是不能得到正有效增益系数. 其中阈值公式我们已经给出, 在我们取的参量下, 通过计算得到其阈值为 6.2 ns . 同时在自由载流子已经确定的情况下, 抽运光功率也是存在阈值的, 当抽运光功率小于阈值时, 无论怎样减小自由载流子寿命也都是不能得到正有效增益系数, 如图 2(b) 所示. 这是因为硅波导存在线性损耗的缘故, 可以通过设计低线性吸收损耗的波导有效的降低抽运光功率的阈值. 但是只增大抽运光功率也不能有效的得到正增益, 这是因为增益与抽运光

功率成正比, 但是 FCA 和抽运光功率的平方相关, 当光功率变大时, 自由载流子造成的损耗要大于由于增大光功率所带来的增益, 所以得不到正增益.

对于硅波导, 假设自由载流子寿命已经确定, 并且在阈值范围之内, 如果我们想得到大的拉曼增益, 我们需要使有效增益系数尽可能取最大值, 这就需要在波导中使光功率保持在某一个最佳的范围之内. 这就可以通过增加后向抽运源来很好的解决这个问题, 如图 3 为前向抽运和双向抽运时硅波导中的光功率分布图和对应的有效增益系数在硅波导中的变化情况, 可以发现双向抽运时波导中有效增益系数要大于前向抽运, 这就使得信号光经过同等长度的波导, 双向抽运下可以得到更有效的光放大, 即更大的拉曼增益.

图 4 为不同抽运方式下的硅基拉曼放大器的增益比较. 横轴为硅基拉曼放大器所采用的硅波导的

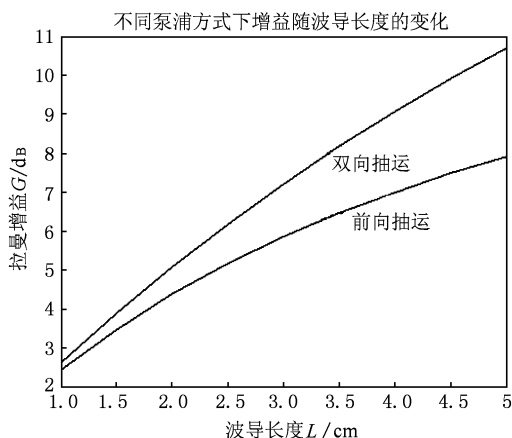


图4 不同抽运方式下硅基拉曼放大器增益随波导长度的变化 (其中前向抽运采用 4000 mW 抽运源, 双向抽运分别采用 2000 mW 抽运源, 耦合信号光功率为 2 mW, 所取的增益为 $G = 10\lg(P_s(L)/P_s(0))$)

长度, 纵轴为此长度硅波导的硅基拉曼放大器对应的拉曼增益. 可以发现双向抽运有效的增大了拉曼增益, 且随着硅波导长度的增加拉曼增益的增加越大. 这是因为当波导长度增加时, 采用前向抽运时

其抽运光功率沿波导逐渐减小, 直到抽运光功率低于可以产生正增益的光功率阈值, 之后会进一步阻碍信号光的放大, 当采用双向抽运时, 则可以使硅波导中的光功率始终处于最佳的有效增益系数区域, 使其经过同长度波导获得的增益远大于前向抽运. 通过适当的选取抽运光功率和硅波导长度可以使拉曼增益达到 20 dB 以上.

5. 结 论

通过对于抽运光和信号光在硅波导中相互作用的耦合方程组的深入分析, 提出要获得正增益, 需使有效增益系数为正的理論分析方法. 并对自由载流子寿命和抽运光功率这两个关键参量分析, 得到了可以获得正增益的自由载流子寿命阈值公式, 抽运光功率的阈值. 提出抽运方式对于硅基拉曼放大器获得净增益的影响, 分析了前向抽运和双向抽运时硅波导中光功率的分布, 指出双向抽运可以大大提高增益, 通过适当的选取抽运光功率, 自由载流子寿命, 波导长度, 可以使放大增益超过 20 dB.

- [1] Lin Q, Painter O J, Agrawal G P 2007 *Opt. Express* **15** 16604
- [2] Claps R, Dimitropoulos D, Jalali B 2002 *Electron. Lett.* **38** 1352
- [3] Krause M, Remer H, Brinkmeyer E 2004 *Opt. Express* **12** 5703
- [4] Claps R, Raghunathan V, Dimitropoulos D, Jalali B 2004 *Opt. Express* **12** 2774
- [5] Liu A, Rong H, Paniccia M, Cohen O, Hak D 2004 *Opt. Express* **12** 4261
- [6] Liu A, Rong H, Jones R, Cohen O, Hak D, Paniccia M 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 1440
- [7] Espinola R L, Dadap J I, Osgood R M Jr, McNab S J, Vlasov Y A 2004 *Opt. Express* **12** 3713
- [8] Jalali B, Raghunathan V, Dimitropoulos D, Boyraz Ö 2006 *J. Sel. Top. Quant. Elect.* **12** 412
- [9] Boyraz Ö, Jalali Bahram 2004 *Opt. Express* **12** 5269
- [10] Rong H, Jones R, Liu A, Cohen O, Hak D, Fang A, Paniccia M 2005 *Nature* **433** 725
- [11] Rong H, Liu A, Jones R, Cohen O, Hak D, Nicolaescu R, Fang A, Paniccia M 2005 *Nature* **433** 292
- [12] Raghunathan V, Shori R, Stafsudd O M, Jalali B 2006 *Phys. Status Solidi. A* **203** R38
- [13] Raghunathan V, Borlaug D, Rice R R, Jalali B 2007 *Opt. Express* **15** 14355
- [14] Sirleto L, Ferrara M A, Jalali B, Rendina I 2006 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** S574
- [15] Sirleto L, Ferrara M A, Rendina I, Jalali B 2008 *Phys. Status Solidi C* **6** 1644
- [16] Chi R H, Lu K C, Yun P, Li Y G, Dong X Y, Chen W Z, Yang G M, Liu Z B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 456 (in Chinese) [迟荣华、吕可诚、运鹏、李乙钢、董孝义、陈文钊、杨光明、刘兆兵 2004 物理学报 **53** 456]
- [17] Tong Z, Wei H, Jian S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1873 (in Chinese) [童治、魏淮、简水生 2006 物理学报 **55** 1873]
- [18] Yun P, Chi R H, Li Y G, Lu K C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4329 (in Chinese) [运鹏、迟荣华、李乙钢、吕可诚 2004 物理学报 **53** 4329]
- [19] Jiang W N, Chen J P, Li X W, Shang T 2004 *Chin. Phys.* **13** 1460

Theoretical analysis on gain characteristics of silicon Raman amplifiers*

Liu Zu-Xue Feng Ming[†] Guo Qing-Hua Qiao Li Lü Ke-Cheng

(The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, School of Physics,
Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 5 February 2010; revised manuscript received 6 April 2010)

Abstract

We report the new theoretical analysis method to obtain net gain in silicon waveguide by stimulated Raman scattering, and the key parameters of the free carrier lifetime and the pump light intensity are analyzed. The free carrier lifetime threshold and pump light intensity threshold are deduced. The gain characteristics of silicon Raman amplifiers with different pumping schemes are investigated, and the results show that the gain can be significantly enhanced in the bidirectional pump scheme.

Keywords: silicon amplifier, Raman amplifier, pumping schemes

PACS: 42.65.Dr, 42.60.Da, 42.65.Wi

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60708001) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20070055082).

[†] Corresponding author. E-mail: nkfm@mail.nankai.edu.cn