

文章编号 1004-924X(2013)02-0308-08

硅拉曼激光器的设计与典型应用

李文超^{1*}, 张景茹², 孙宇超³, 朱丹丹³, 李志全³

(1. 东北大学 秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 河北山海关电站辅机厂技术部, 河北 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对用光腔衰荡法测量气体浓度时存在严重非线性光学损耗, 输出功率密度偏低, 光源输出不平坦等问题, 利用受激拉曼散射(SRS)非线性频移机制, 设计了以 Si 元素作为拉曼主要增益介质的拉曼激光器。在硅波导结构中设置了 p-i-n 反向偏置电压, 通过控制调节该电压值来降低由双光子吸收(TPA)引起的自由载流子吸收(FCA)以及由 FCA 引起的非线性光学损耗, 从而提高拉曼激光器的输出功率。在实验分析处理过程中, 将反向电压分别设置为开路、短路、5 V 以及 25 V 4 种状态, 分析比较了不同电压值下激光器输出功率的变化规律。实验结果显示: 粒子自由迁移时间从 16 ns 降低到 1 ns, 表明输出功率在同等标准下得以显著提高, 进而改善了气体浓度测量的稳定性。

关键词: Si; 拉曼激光器; 气体浓度测量; 光腔衰荡法; 双光子吸收(TPA); 自由载流子吸收(FCA)

中图分类号: TN248.7; O657.319 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.308

Design and typical application of silicon Raman laser

LI Wen-chao^{1*}, ZHANG Jing-ru², SUN Yu-chao³, ZHU Dan-dan³, LI Zhi-quan³

(1. *Institute of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China*; 2. *Technological Department, Hebei Shanhaiguan Electric Power Generation equipment, Co., Ltd., Qinhuangdao, 066004, China*; 3. *Institute of Measurement Technology and Automatic Instrument, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chao 121328@sohu.com*

Abstract: For the serious nonlinear optical loss, low output power density and non-flat light source in gas concentration measurement by a Cavity Ring-down Spectroscopy(CRDS), a Raman laser by using Si as gain media was designed based on the nonlinear frequency shift mechanism of stimulated Raman scattering. To reduce the Two-photon Absorption (TPA) induced Free-carrier Absorption (FCA) and the FCA induced nonlinear optical loss in the silicon, a reversed p-i-n diode was designed to embed in a silicon waveguide. Then, the output power of Raman laser could be enhanced by controlling the voltage. In the experimental analysis, the reversed voltage was set to open, short, 5V and 25V, respectively, to observe the output power under the different voltages. The result indicates that the free carrier mobility time decreases from 16 ns to 1 ns and the output power increases outstandingly at the

收稿日期: 2012-09-18; **修订日期:** 2012-10-30.

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(No. F2010002002, F2012203204); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20070216004)

same condition, which enhances the reliability of gas concentration measurement.

Key words: Si; Raman laser; gas concentration measurement; Cavity Ring-down Spectroscopy (CRDS); Two Photon Absorption(TPA); Free-carrier Absorption(FCA)

1 引言

传统激光器在工程应用中存在着光功率输出不平坦、输出功率密度低、非线性光学损耗严重等问题。为了解决这一瓶颈,硅基拉曼激光器的性能改善与应用受到了研究人员的关注,尤其是对其光学性能的研究成为了理论和应用上极具特点的研究主题^[1-3]。硅的拉曼增益系数比石英玻璃的拉曼增益系数要大4个数量级以上。受激拉曼散射(SRS)是一种三阶非线性效应,是强激光的光电场与原子中的电子激发,分子中的振动或与晶体中的晶格相耦合产生的,具有很强的受激辐射特性,即与激光器中的激光发射有类似特性:方向性强、散射强度高^[4],是强相干性光源,目前已成为填补和拓展现有激光频段的一种有效手段^[5]。

本文基于Si波导结构以及SRS机制的激光器实现了从1 522~1 653.72 nm工作波长的扩展。由于Si中的拉曼增益系数非常大,使得SRS能在集成波导范围内得到所需要的增益,可产生单片规模(在厘米范围)光放大器,但实际上Si在波长1.3~1.6 μm的线性光学吸收非常弱^[6],并且自由载流子吸收(FCA)的存在使粒子自由迁移时间明显加长,从而成为拉曼激光器应用的重要障碍^[7-10]。解决这个问题最直接的方法就是降低粒子自由迁移体与光模式相互作用的有效时间^[11-14]。因此,本文在系统结构中设置一反向偏置电压,通过控制调节反向电压值来缩短有效迁移时间,从而降低FCA以及由其引起的非线性光学损耗,提高拉曼激光输出效率的能量密度,从而提高气体浓度测量的精度。

2 受激拉曼散射原理

拉曼散射是一种非弹性的光散射过程,入射光子的能量通过与分子的非弹性接触使分子的能级发生变化时,光子就会损失一定的能量,如式(1)所示:

$$\omega_s = \omega_L - \delta_m, \quad (1)$$

式中: ω_L 为入射光子角频率; ω_s 为散射的斯托克斯光子角频率; δ_m 为去谐匹配频率。入射光子(角频率为 ω_L)与散射的斯托克斯光子(角频率为 ω_s)之间的能量差正好与气体分子、液体分子、或者固体拉曼介质的声子之间的振动相匹配。

如果粒子处于激发状态,就会发生反向的散射过程,出现频率比泵浦光频率高的散射光,这种光称为反斯托克斯线:

$$\omega_s = \omega_L + \delta_m. \quad (2)$$

在热平衡状态下,通过分析波尔兹曼因子 $\exp[-(h\omega/k_B T)]$ 可知,激发态的粒子数要小于基态下的粒子数,因此反斯托克斯光线必然比斯托克斯光线弱。

当入射光源强度很高时,介质感应出的偏振态 P 的表达式将会包含与电场 E 的线性和非线性关系:

$$P = \epsilon_0 \chi_1 \cdot E + \epsilon_0 \chi_2 \cdot |E|^2 + \epsilon_0 \chi_3 \cdot |E|^3 + \dots, \quad (3)$$

式中: χ_1 为线性极化率; χ_2, χ_3 为介质的非线性极化率; ϵ_0 为介电常数。

当 n_s (斯托克斯光子数)与 n_v (光子数量) $\ll 1$ 时,与入射激光偏振方向平行的自发拉曼散射光占主要成分。斯托克斯功率 P_s 与斯托克斯光子产生速率具有如下关系:

$$P_s = h\omega_s \frac{dn_s}{dt}, \quad (4)$$

式中: n_s 为斯托克斯光子数。

当泵浦激光与斯托克斯光在拉曼介质中传输时,由受激拉曼散射量子机制可以得到:

$$\frac{dn_s}{dx} = \frac{c}{\mu_s} \frac{dn_s}{dt}. \quad (5)$$

斯托克斯光子数目按如下指数形式增长:

$$n_s \propto \exp(g_R I_L x), \quad (6)$$

式中: g_R 为拉曼增益系数; I_L 为拉曼强度幅值。

晶体中拉曼光的线宽展宽一般都是均匀的,其谱图形状为洛伦兹曲线。关于窄带泵浦光与拉曼透射光之间的相互作用的光谱分布表述形式为

$$\rho(\omega_s - \omega_L + \omega_R) = \frac{\Gamma/\pi}{(\omega_s - \omega_L + \omega_R)^2 + \Gamma^2}, \quad (7)$$

式中: ω_R 为频移量, Γ 为拉曼转换的线宽(最大吸收一半处的半线宽), 当转换终态的移相(失相)时, 时间 t_2 相关的线宽表示为:

$$\Gamma = t_2^{-1}, \quad (8)$$

Γ 取决于激发的振荡模式、温度、激发态与其他分子振荡以及晶格振荡之间的耦合。

在谱线中心波长处, 拉曼增益系数 g_R 可以写为:

$$g_R = \frac{4\pi^2 \omega_S N}{\mu_L \mu_S c^2 \omega_R \Gamma} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)^2 = \frac{8\pi c^2 N}{h \mu_S^2 \omega_S^3 \Gamma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right), \quad (9)$$

式中: $\frac{\partial \alpha}{\partial q}$ 为分子偏振态张量标准模式导数; μ_L 、 μ_S 分别为拉曼介质对泵浦激光和斯托克斯的折射系数; $\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega}$ 为散射截面的单位立体角自发发射强度变化率。式中关系表明, 增益系数与散射截面的微分项成正比, 与线宽成反比。如果了解拉曼增益系数随波长的变化曲线, 可知当采用相对较短的波长时, 拉曼散射会存在一个较低的阈值。对于大部分材料的透明区域, $\frac{\partial \alpha}{\partial q}$ 与波长无关^[15], 当散射截面微分项随着 ω_S^4 变化时, 拉曼增益系数也随着斯托克斯频率变化而变化。

忽略泵浦光的损耗系数和吸收系数, 在阈值附近的斯托克斯光波增长幅度的表达形式可近似表示为:

$$I_S(l) = I_S(0) e^{g_R l}, \quad (10)$$

式中: l 为拉曼介质的作用长度。当不存在斯托克斯注入光波时, 斯托克斯光波的增长是由于存在自发拉曼斯托克斯散射光子 ($I_S(0) = I_{SN}$)。在

斯托克斯频率处相当的噪声输入为:

$$I_{SN}(\omega_S) = \frac{h \omega_S^2 \mu_S^3}{(2\pi)^3 c^2} \Delta \Omega. \quad (11)$$

在实验中经常发现受激反拉曼散射现象, 但需要满足如下相位匹配条件;

$$\Delta k = k_S + k_{AS} - 2k_L = 0. \quad (12)$$

3 拉曼激光器的设计及实验分析

3.1 拉曼激光器设计

图 1 为 Si 元素拉曼激光器的系统结构图, 以发射波长为 1 522 nm 的光纤激光器作为泵浦源, 以 Si 波导作为拉曼介质, 其非线性频移量为 520.41, 实现了 1 653.72 nm 拉曼激光的输出。利用波分复用器(WDM)将泵浦脉冲耦合进激光腔, 激光腔为环形光纤结构, 光纤长度为 8 m, 在拉曼增益介质 Si 波导之后是 5/95 分路器, 其中 5% 的功率作为输出, 95% 将继续回到 WDM1 以形成环形腔。剩余的功率将被 WDM 耦合器锁存。系统中的 2 个偏振控制器(polarization controller, PC)用来调整泵浦源与发射激光的偏振模式。为了到达最大的耦合程度, 将泵浦源的偏振模式设置成 TE 模, 对于偏振状态的调节是为了使得输出的功率能够达到最大值。在 1 653.72 nm 处的 Stokes 散射光腔体的总的损耗(包括硅波导结构中的损耗)经测量为 3.7 dB。WDM2 安放在激光输出处, 是用来将拉曼激光(1 653.72 nm 与泵浦波长 1 522 nm)分开。

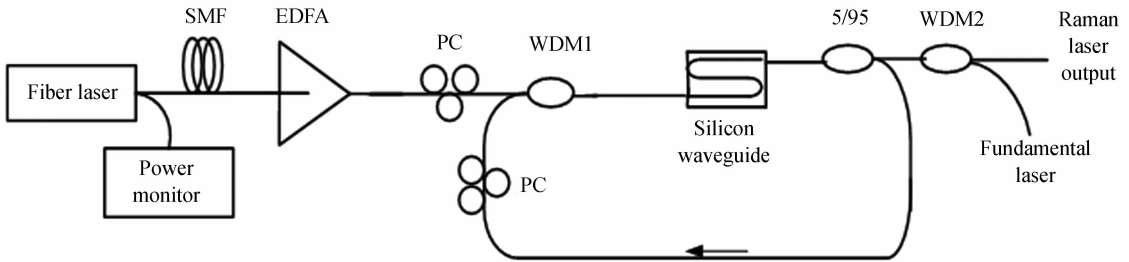


图 1 全硅拉曼激光器的系统结构图

Fig. 1 Structure of Raman laser

增益介质 Si 为脊形波导结构, 具有低损耗单模特性。硅脊形波导是在一个未掺杂的硅绝缘体 (silicon-on-insulator, SOI) 基底(100)表面上制作

而成的。硅波导模式利用标准的照相平版印刷法以及基于 Cl_2/Ar 的等离子电抗蚀刻技术处理而成。选择较小的波导横截面积, 可以提高给定的

泵浦功率的强度,同时可实现较高的增益。在具有低色散的材料中,有效作用长度较长时,就会增加转换效率。为了增加相互作用长度而得到更大的总拉曼增益,本文将波导结构设计成 S 型,如图 3 所示,波导直线部分的导向为[011]方向。为了降低由双光子吸收(TPA)诱发的 FCA 所产生的非线性光学损耗,在波导结构中设计制作了一个反偏的 p-i-n 二极管。

图 2 为波导结构的横截面示意图,脊形波导的宽度 W 为 $1.5 \mu\text{m}$,脊形高度 H 为 $1.55 \mu\text{m}$,蚀刻深度 h 为 $0.7 \mu\text{m}$ 。通过利用全矢量波导模型的方法(FIMMWAVE)计算出波导的有效核心面积为 $1.6 \mu\text{m}^2$ 。Si 脊形波导结构的 p 型区域和 n 型区域的掺杂浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$,p 型区域和 n 型区域边缘之间的间隔 D 为 $6 \mu\text{m}$ 。为了实现欧姆接触(金属与半导体材料的接触),将铝膜沉积于 p 型区域和 n 型区域。已经有相关实验证明,对于波导产生的损耗,掺杂区域和金属接触的作用基本可忽略,这是由于波导结构中所能利用的模式是严格限制的。在给 Si 波导镀防反射膜之前,S 型波导的线性光学传输损耗为 $(0.4 \pm 0.1) \text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$,这是通过利用 F-P 谐振技术测量得到的。在包含实验误差和波导间变化的线性光学损耗的不确定度为 0.1dB/cm 。

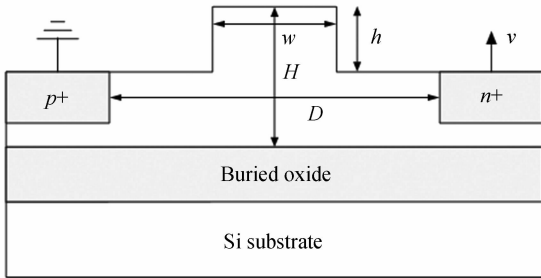


图 2 硅波导结构的横截面示意图

Fig. 2 Cross-section of Si waveguide

3.2 拉曼激光器的特性分析与实验研究

实验中,利用中心波长为 $1\ 653.72 \text{nm}$ 连续波激光作为探针信号,对出现的探针信号的增加量进行测量,测得该系统的增益曲线如图 3 所示,结果表明硅波导结构在泵浦功率为 25W 时,可以提供的增益为 9dB 。

本结构在脊形部分两侧分别进行了 N 型杂质和 P 型杂质的掺杂形成 PIN 结构,并对此结构

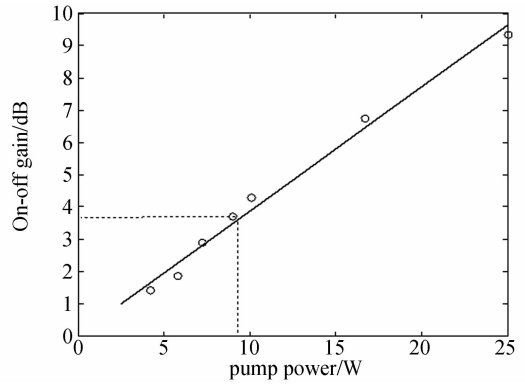


图 3 不同泵浦功率下的增益曲线

Fig. 3 Gain profile with different pump powers

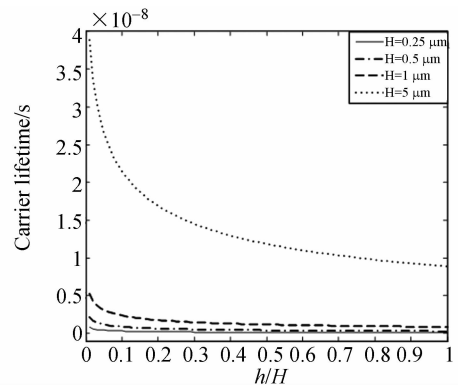


图 4 有效载流子寿命与比值 h/H 之间的关系

Fig. 4 Relationship between effective carrier lifetime and ratio of h/H

进行了反向偏置。由半导体物理学原理可知,在反偏电压下 PIN 二极管结构产生一个强电场,可扫除 TPA 效应产生的电子空穴对,有效地缩短载流子寿命并大大降低 FCA 引起的非线性损耗。载流子寿命与 h/H 之间的关系实验仿真研究显示,这种结构明显地增大了拉曼激光器的增益。 h/H 的变化导致波导结构的改变,从而改变了波导内电场强度,可以较理想地抑制载流子的寿命。其约束条件为 $w=H$ 。在不同的 H 取值时分别计算了载流子的寿命。随着 H 的减少,界面处的复合变得更加有效,且载流子寿命降低了。对于给定的 H 值,载流子寿命随着 h 的增加而降低,因为载流子可以更加有效地从波导芯处扩散开而进入脊周围的区域(假定可以忽略表面处的复合)。对于亚微型的波导,当其尺寸为 $w=H=0.5 \mu\text{m}$ 时,载流子有效寿命为 1ns 。

如图 5 所示为载流子寿命与波导宽度之间的直接关系,脊的高度被设置为常数($h=0.6H$),分

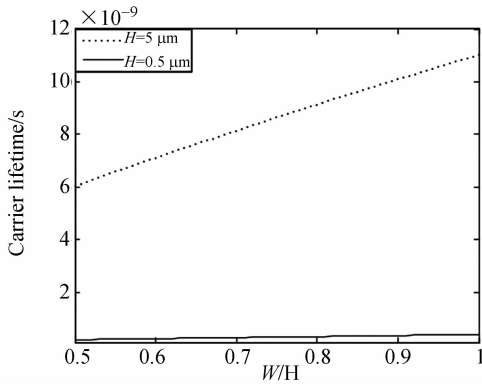


图 5 有效载流子寿命与脊形宽度之间的关系

Fig. 5 Relationship between effective carrier lifetime and ridge width

为 $H=5 \mu\text{m}$ 和 $H=0.5 \mu\text{m}$ 两种条件。载流子寿命随着 W 的减少而降低。这种现象的发生是因为当 W 变小的时候,载流子从脊形区域扩散出去所用的时间降低了。

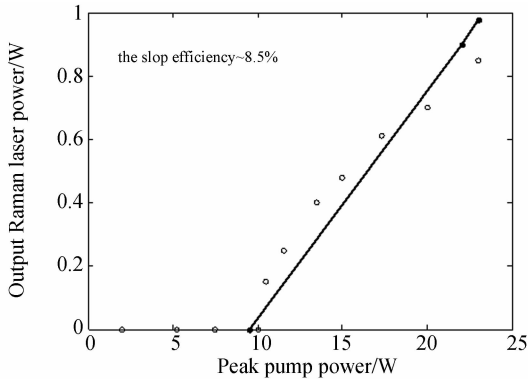


图 6 系统的功率效率

Fig. 6 Power efficiency of system

图 6 为测量得到的输出拉曼激光功率与泵浦功率的关系曲线。泵浦功率从 0 变化到 25 W 来表征激光器的行为,这样就确定了激光器发射激光的阈值。当泵浦功率为 9 W 时,波长为 1 653.72 nm 的激光发射出现一个急剧增长的趋势。当波导增益补偿波导损耗时,就会出现阈值。如图 6 所示,在阈值功率 9 W 处,腔体损耗为 3.7 dB,拉曼增益为 3.9 dB,拉曼增益可补偿波导损耗,满足阈值条件。当泵浦功率超过阈值功率之后,输出功率就会保持与输入功率以线性关系增加,该斜线的斜度效率(输出功率与输入功率之比)为 8.5%。

同时考虑 TPA 以及由 TPA 引起的 FCA,泵

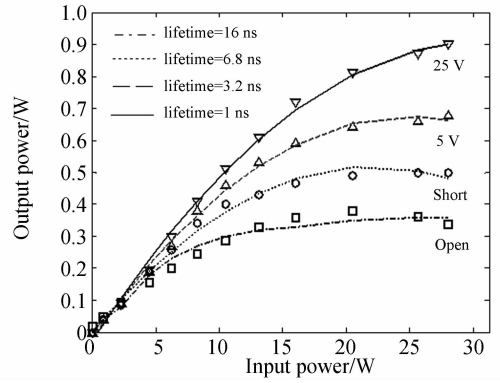


图 7 在相同输入功率,不同反向偏置电压之下的功率输出

Fig. 7 Power output with identical input power and different reverse biases

浦功率沿波导的变化为:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha P(z) - \frac{\beta}{A_{\text{eff}}} P^2(z) - \sigma N(z) P(z), \quad (13)$$

$P(z)$ 为沿着波导传输的泵浦功率。

$$\frac{dI(z)}{dz} = -\alpha I(z) - \beta I^2(z) - \sigma N(z) I(z), \quad (14)$$

$$\frac{dN(z)}{dt} = \frac{\beta}{2h\gamma} I^2(z) - \frac{N(z)}{\tau}. \quad (15)$$

结合式(13)、(14)、(15)得到的模拟结果与实验测量结果(离散点)对比得到的曲线如图 7 所示。模型中 $I(z)$ 为沿波导方向变化的光强,线性吸收系数为 $\alpha=0.39 \text{ dB/cm}$, TPA 系数 $\beta=0.5 \text{ cm/GW}$, FCA 横截面积 $\sigma=1.45 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$,波导结构有效横截面积为 $A_{\text{eff}}=1.6 \mu\text{m}^2$, $h\gamma$ 为光子能量, τ 为有效载流子寿命。结果表明,在不同的反向偏置电压情况下,计算与测量结果具有很好的符合度。当输入功率较低时,输出功率的变化与输入功率呈线性关系,当输入功率超过 5 W 时,输出功率达到饱和,饱和的输出功率取决于 p-i-n 反向偏置电压。对于开路 p-i-n 波导结构,输出功率的饱和值为一常数 0.35 W,而与输入功率的值无关。短路以及反向的 p-i-n 结构是允许电流在波导内进行传递的,这样就从光学模式中消除了自由迁移时间因素,并且降低了有效迁移时间,使得输出光的强度增加。结果表明,该结构可以降低 FCA 以及由其产生的非线性光学损耗。

3.3 典型应用研究

气体浓度测量系统结构如图 8 所示,由硅基

拉曼激光器发出的脉冲激光由光纤耦合器耦合至光纤环形腔中, 以提高系统的信噪比。放大后的光信号通过光隔离器 (Isolator)、可调光衰减器 (VOA) 和光纤 Bragg 光栅 (FBG) 进入微型吸收气室。环路中应用 FBG 反射谱的带通特性可以有效地滤除部分 EDFA 工作时产生的自发辐射噪声以及其他的背景噪声。分光比为 1 : 99 的耦合器将 99% 的光耦合回环路中进行循环衰荡, 剩余 1% 的光由耦合器输出, 被光电探测器接收后, 进入 PC 机, 利用提升小波变换消噪方法处理数据。环路中安置 2 个光隔离器用来消除环路中的反向光, 抑制光路系统中产生的自耦合效应及反射噪声对系统的影响。

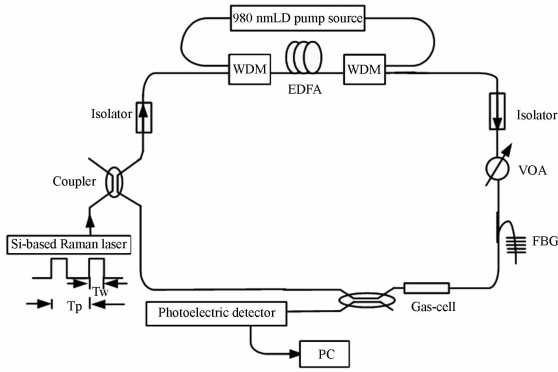


图 8 气体浓度测量系统的结构框图

Fig. 8 Schematic of gas concentration measurement system

图 8 所示系统利用硅基拉曼激光器作为光源, 可用来测量在近红外波段有吸收峰的多种气体, 如 CO_2 , H_2O , CO , CH_4 等, 以下选用 CH_4 作为典型气体来验证和分析系统的可行性。实验中, 在微型气室中充入浓度为 500×10^{-6} 的 CH_4 气体, 将测量系统进行校准调制后, 开始对实验数据进行采集。在理想状态下即不考虑系统噪声时, 理想的衰荡时间为 $0.72 \mu\text{s}$ 。根据表中数据分别绘制了拟合曲线与理想状况下的对数衰荡曲线的对比图, 如图 9 和 10 所示。

如图 9 所示, 实际输出与理想信号存在一定的偏差, 并随时间的变化越来越明显。含噪信号的衰荡时间为 $0.68 \mu\text{s}$, 理想信号的衰荡时间为 $0.72 \mu\text{s}$, 测量误差为 56×10^{-6} 。图 10 所示输出信号衰荡时间为 $0.70 \mu\text{s}$, 测量误差为 23×10^{-6} , 误差减小了 33×10^{-6} 。

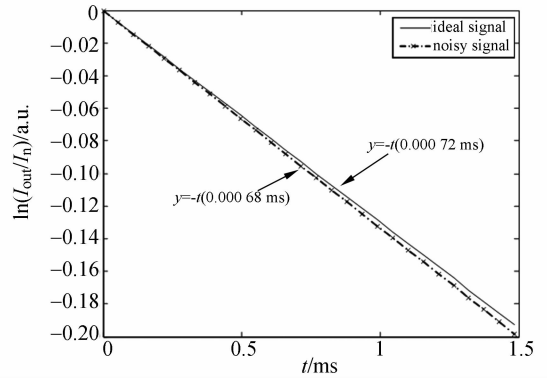


图 9 浓度为 500×10^{-6} 时理想信号与实际输出信号曲线
Fig. 9 Comparison between ideal signal and under-noised signal of with concentration of 500×10^{-6}

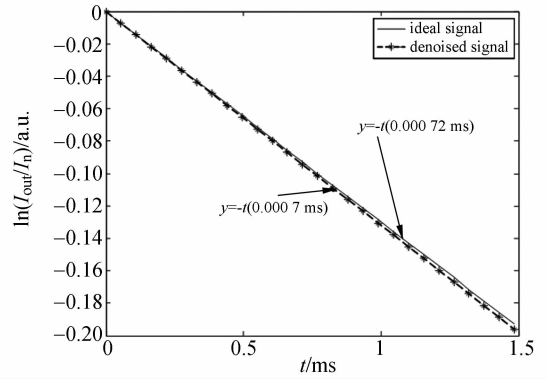


图 10 浓度为 500×10^{-6} 时理想信号与实际输出信号曲线
Fig. 10 Comparison between ideal signal and denoised signal of with the concentration of 500×10^{-6}

表 1 浓度与对应衰荡时间的实验数据

Tab. 1 Experimental data of concentration and corresponding ring-down time

甲烷气体浓度 / ($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	衰荡时间 / ms
100	0.117 8
200	0.005 6
300	0.002 2
400	0.001 2
500	0.000 7
600	0.000 5
700	0.000 4
800	0.000 3
900	0.000 2
1000	0.000 2

石英光纤的低损耗传输窗口为 $0.8 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 为了提高测量的准确度, 选取甲烷气体在该波段的泛频吸收线。

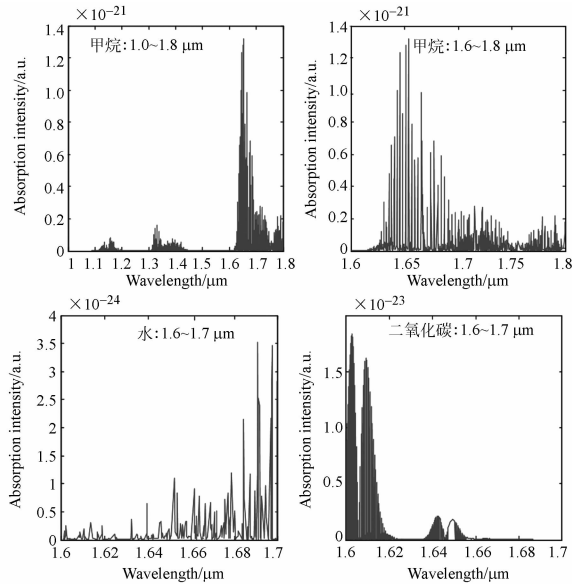


图 11 CH_4 , H_2O , CO_2 在近红外区的吸收谱图

Fig. 11 Absorption spectra in near-infrared of CH_4 , H_2O , CO_2

图 11 所示为利用 HITRAN 数据库软件获得的 $1 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的 CH_4 吸收谱线, $1.6 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的 CH_4 吸收谱线, 以及 $1.6 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的 H_2O 和

CO_2 吸收谱线。通过图形数据分析得知, CH_4 在波长 $1\ 653.72 \text{ nm}$ 处吸收最强 (温度 296 K), 在此处的吸收强度要比 H_2O 和 CO_2 高出几千倍。因此, 如果将激光器的中心波长锁定在 $1\ 653.72 \text{ nm}$ 处, 就完全可以避免测量过程中其他气体的干扰。

4 结 论

本文对一个硅芯片上的全硅波导腔体中的拉曼激光发射现象进行了理论分析和实验, 证明了产生实际连续波的光放大器和激光器能够与其他光电元件集成到 CMOS 工艺兼容的硅芯片上。

在研究设计过程中, 利用受激拉曼散射机制, 基于环形单片 Si 波导结构腔体实现了拉曼激光发射, 并且通过实验验证了通过控制 Si 波导结构中的反向偏置电压值可以降低 TPA 以及由 TPA 引起的 FCA 引起的非线性光学损耗, 并且将自由迁移时间从 16 ns 降低到 1 ns , 提高了拉曼激光输出功率。在波导长度为 4.8 cm , 泵浦功率为 18 W , 偏置电压为 25 V 的条件下, 得到的净连续波增益大于 3 dB 。理论和实验结果表明, 硅基拉曼激光器作为激光气体测量系统的光源, 对改善测量精度和测量系统的稳定性有积极意义。

参考文献:

- [1] MICHAEL K, SVEN C, HAGEN R, *et al.*. Pump-to-stokes RIN transfer in Raman fiber lasers and its impact on the performance of co-pumped Raman amplifiers[J]. *Optics Communication*, 2006, 260(2): 656-661.
- [2] REED G T, KNIGHTS A P. *Silicon Photonics: An Introduction*[M]. West Sussex: Wiley Press, 2004.
- [3] VODCHITS A I, BUSKO D N, ORLOVICH V A, *et al.*. Multi-frequency quasi-continuous wave solid-state Raman laser for the ultraviolet, visible, and near infrared[J]. *Optics Communications*, 2007, 272(2): 467-475.
- [4] 钱世雄, 王恭明. 非线性光学-原理与进展[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001.
QIAN SH X, WANG G M. *Nonlinear optics-principle and Progress*[M]. Shanghai: Fudan university Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 金峰. 人眼安全拉曼激光技术的发展[J]. 激光与电子学进展, 2003, 40(6): 40-42.
JIN F. Development of eye-safe Raman lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2003, 40(6): 40-42. (in Chinese)
- [6] PAVEL C, HELENA J, ZVEREV P G, *et al.*. Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 28(2): 113-143.
- [7] RONG H S, LIU A S, NICOLAESCU R, *et al.*. Raman gain and nonlinear optical absorption measurement in a low loss silicon waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(12): 2196-2198.
- [8] TSANG H K, WONG C S, LIANG T K, *et al.*. Optical dispersion, two photon absorption and self-phase modulation in silicon waveguides at $1.5 \mu\text{m}$ wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(3): 416-418.
- [9] CLAPS R, RAGHUNATHAN V, DIMITROPOULOS D, *et al.*. Influence of nonlinear absorption on

- Raman amplification in Silicon waveguides [J]. *Opt. Express.*, 2004, 12(12):2774-2780.
- [10] LIANG T K, TSANG H K. Efficient Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(16):3343-3345.
- [11] BOYRAZ O, JALALI B. Demonstration of a silicon Raman laser [J]. *Opt. Express.*, 2004, 12(21): 5269-5273.
- [12] SPENCE D J, LI X L, LEE A J, et al.. Modeling of wavelength-selectable visible Raman lasers [J]. *Optics Communications*, 2012, 285 (18): 3849-3854.
- [13] PENZKOFER A, LAUBEREAU A, KAISER W. High intensity Raman interactions [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1979, 6(2):55-140.
- [14] HUANG Y, SHUM P, LIU C. Proposal for loss reduction and output enhancement of silicon Raman laser using bi-directional pumping scheme [J]. *Optics Communications*, 2010, 283 (7): 1389-1393.
- [15] ZHU F H, GONG K, HUO Y J. Optimization of an AO Q-switched solid-state Raman laser [J]. *Optics Communication*, 2012, 285(8):2128-2133.

作者简介:



李文超(1981—),男,黑龙江肇东人,博士,讲师,2004年、2007年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,2011年于河北工业大学获得博士学位,主要从事非线性光电方面的研究。E-mail: chao121328@sohu.com



张景茹(1983—),女,河北保定人,硕士,2008年、2011年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光伏电池方面的研究。E-mail: zhangjingru@163.com



孙宇超(1985—),男,吉林四平人,博士研究生,2008年于燕山大学获得学士学位,主要从事非线性光电方面的研究。E-mail: sunyuchao@ysu.edu.cn



朱丹丹(1978—),女,辽宁葫芦岛人,博士,硕士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: hfwang@ysu.edu.cn



李志全(1954—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,1982年、1988年于东北重型机械学院分别获得学士、硕士学位,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位。主要从事非线性光电方面的研究。E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)