硅基集成光波导放大器的最新研究进展

陈子萍, 舒浩文, 王兴军*

北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家实验室, 北京 100871

*联系人, E-mail: xjwang@pku.edu.cn

收稿日期: 2017-01-04; 接受日期: 2017-03-08; 网络出版日期: 2017-07-14

国家自然科学基金(编号: 61377056, 61635001)和教育部新世纪优秀人才计划资助

摘要 在信息化进程中, 随着摩尔定律越来越接近极限, 将微电子和光电子结合起来, 开发硅基大规模光电子集成技术已经成为技术发展的必然和业界的普遍共识. 在硅基光电子集成器件中, 硅基光源是重中之重. 虽然硅是间接带隙半导体材料, 发光效率很低, 但人们一直没有放弃制备硅基光源. 硅基光源包括硅基光波导放大器、发光二极管、激光器等, 其中硅基光波导放大器又是激光器的基础, 是硅基光电子集成回路中不可或缺的器件, 如果光波导放大器有足够高的净增益, 在光波导放大器的两端设计合适的谐振腔就可以获得光泵的激光. 本文着眼于硅基光波导放大器, 介绍了目前硅基光波导放大器最主要的两个研究方向, 即硅基混合集成III-V族半导体光波导放大器和硅基掺稀土离子光波导放大器. 并分别讨论了这两个研究方向的原理、制备方法、发展过程等, 列举了相关的典型研究成果, 最后简单介绍了其他光放大技术, 并做了相应的分析、总结和展望.

关键词 硅基光电子学, 硅基集成光波导放大器, III-V族半导体光放大器, 掺稀土离子光波导放大器

PACS: 42.82.-m, 85.60.Jb, 42.60.Da

1 引言

20世纪以来, 以硅为主要材料的微电子器件已经应用到了人类生活的各个层面. 这些微电子器件具有低功耗、低成本、易集成等优点, 成为了信息行业不可或缺的支柱, 微电子技术按照摩尔定律飞速发展. 然而, 随着微电子器件尺寸的进一步减小, 微纳器件及集成度的进一步提高, 电互连所固有的局限性将促使芯片的发热量迅速增加, 引起串扰、噪声、功耗、时延等多方面的问题, 使得器件无法正常工作. 不仅如此, 由于现有的加工设备已经接近工艺极限, 通过减

小线宽的方法来提高芯片的工作频率和集成度面临非常大的工艺问题. 当线宽进入深纳米尺寸时, 如何避免量子效应导致的相邻导线之间的量子隧穿, 也面临前所未有的挑战. 这些问题已经成为了微电子集成电路技术未来发展的重大障碍, 摩尔定律接近了极限. 因此, 为了满足更高的技术需求, 人们将目光投向了片上光互连技术. 与电子相比, 光子作为信息载体, 具有巨大的优势: 没有静止质量、光子之间没有干扰、光的不同波长可以用于多路同时通信等, 从而可以利用光子进行通信, 实现更大的带宽和更高的速率.

硅基光电子学是一门以硅为主要研究材料, 在其

引用格式: 陈子萍, 舒浩文, 王兴军. 硅基集成光波导放大器的最新研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 127301
Chen Z P, Shu H W, Wang X J. The latest research development of silicon based integrated optical waveguide amplifier (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 127301, doi: 10.1360/SSPMA2017-00001

上研究并设计制备各类光学元器件, 实现光的发射、传输、接收等功能, 并最终实现全硅的光电集成的科学. 其核心内容就是研究如何将光子器件“小型化”、“硅片化”, 并与纳米电子器件相集成, 即利用硅或硅兼容的其他材料, 应用硅工艺, 在同一硅衬底上同时制作若干微纳量级、以光子、电子为载体的信息功能器件, 形成一个完整的具有综合功能的新型大规模集成芯片^[1]. 相比于传统的半导体, 硅在光通信或光互连中具有非常巨大的优势: 硅与传统的互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺具有很好的兼容性, 非常利于集成, 具有丰厚的工艺技术积累; 硅在地壳中含量极高, 从而减缓了人们对资源需求的压力; 硅对通信波段透明, 从而会有较低的光学损耗; 硅的折射率较大, 因此具有优秀的波导性能; 硅片尺寸大、机械性能好、易加工、相比于其他材料成本更低; 绝缘体上硅(Silicon On Insulator, SOI)在光学上具有很好的导光性能, 在电学上具有很好的抗辐射性能等.

硅基光电子器件包括很多种: 无源器件包括光栅、分束/合束、偏振旋转、波分复用/解复用等; 硅基光源包括光放大器、激光器、光学调制器、探测器等. 这些功能器件都已实现, 部分已产业化. 在这些元器件中, 目前还没有完全解决的是通信波段的硅基光源. 主要原因在于, 硅是间接带隙的半导体材料, 如图1所示^[2], 电子不能直接由导带底跃迁到价带顶发出光子. 为了满足动量守恒原理, 它只能通过发射或吸收一个声子间接跃迁到价带顶. 同时, 硅中存在两个很强的非辐射跃迁过程: 俄歇复合和自由载流子吸收. 因此硅的发光效率很低, 一直以来被认为不适合制作光源材料. 但由于其巨大的潜在价值, 人们一直没有放弃制备硅基光源. 硅基光源包括硅基光波导放大器和激光器. 其中, 硅基光波导放大器也是硅基激光器的基础, 它可以放大硅基光电子集成回路中微弱的光信号, 是硅基光电子集成回路中不可或缺的器件, 如果光波导放大器有足够高的净增益, 在光波导放大器的两端设计合适的谐振腔就可以获得光泵的激光.

硅基光波导放大器目前有两个主要的研究方向: 一种是基于传统半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA), 采用键合技术, 将SOA贴到基片上; 另一种方法是基于传统的掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)材料, 将其转换为掺铒平面光波

图1 (网络版彩图) 硅的能带图

Figure 1 (Color online) The diagram of silicon bandgap.

导放大器(Erbium-Doped Waveguide Amplifier, EDWA). 下面将分别就这两个研究方向进行相应的介绍.

2 硅上集成III-V族半导体光放大器

在各类硅基光电子集成电路中, 半导体光放大器(SOA)都是一个非常关键的部件. 当信号在多个光器件中传输时, SOA可以提高输出功率并使信号的功率水平保持稳定. 除此之外, SOA还有很多其他的用途, 例如: 波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)系统中的宽调谐激光器就需要用到一个集成SOA, 它可以用来进行波长优化和边模抑制比(Side-Mode Suppression Ratio, SMSR)的优化^[3]; 相干传输系统对激光器的输出光功率要求也非常高, 至少需要16 dBm, 用以克服在相干调制器、波分复用以及光纤耦合中的损耗; 固定多波长激光器阵列, 在波长多路复用之前, 也需要在每个激光器维持信道均衡之后用到一个SOA, 用于功率平坦化^[4]; 集成波分复用接收器电路也会用到一个SOA来放大输出信号, 这样可以减少网络里外部光放大器的数量^[5]; 由于非线性效应的存在, SOA也可以用于高速波长转换器中^[6].

2.1 半导体光放大器的原理

III-V族半导体是直接带隙半导体材料, 带间复合为直接跃迁, 直接跃迁的发光过程只涉及一个电子-空穴对和一个光子, 其辐射效率很高. 而硅是间接带隙半导体材料, 带与带之间的跃迁是间接跃迁, 跃迁过程除了出射光子外, 还需要声子参与. 因此, III-V族半导体直接跃迁发光的概率比硅大得多, 半导体光放大器多用III-V族半导体制备而成.

III-V族半导体光放大器的放大特性主要取决于有源层的介质特性以及腔体特性, 通过粒子数反转进行放大发光, 发光媒介为非平衡载流子. 半导体电致发光是指用电学方法将非平衡载流子直接注入到半导体中而产生发光, 这常常借助pn结来完成.

半导体材料非辐射复合的过程就是电子空穴复合释放的能量以非光子的形式释放的过程, 如转变为热能或其他形式的能量, 其中主要有俄歇复合和多声子复合两种方式. 辐射复合过程又分为自发辐射和受激辐射. 自发辐射是指处于激发态的原子中的电子在激发态能级上只能停留一段很短的时间, 就自发地跃迁到较低能级中去, 同时辐射出一个光子. 受激辐射过程是指, 当原子处于激发态 E_2 时, 如果恰好有能量等于两个能级能量差 E_2-E_1 的光子入射进来, 在入射光子的影响下, 原子会发出一个同样的光子而跃迁到低能级 E_1 上去. 自发辐射和受激辐射是两种不同的光子发射过程, 自发辐射中各个原子的跃迁都是随机的, 所产生的光子虽然具有相等的能量, 但这种光辐射的位相和传播方向等各不相同. 而受激辐射所发出的光子的全部特性同入射光子完全相同. 另外, 自发辐射原子跃迁伴随着发射一个光子, 而受激辐射在一个光子的作用下发生跃迁, 同时发射出两个相同特性的光子. 不同的半导体材料具有不同的带隙宽度, 制备得到的放大器光增益发生在带隙波长附近, 因此可以根据需要的增益光波长选择合适的半导体材料. 部分III-V族半导体的发射波长如图2所示^[7].

SOA的相关参数包括不饱和增益系数 G_0 、输入饱和功率 P_{ins} 和噪声因子等, 其中 G_0 指的是输出功率与输入功率的比值, P_{ins} 指的是当增益系数降低至不饱和增益系数的一半时的输入功率, 噪声因子指的是经过放大后信噪比的降低系数. SOA的增益系数 G 随着输入功率 P_{in} 变化公式如下:

$$G = G_0 \frac{1 + P_{\text{in}} / P_s}{1 + G_0 P_{\text{in}} / P_s}, \quad (1)$$

其中 P_s 指的是材料增益饱和功率. 从上式中可以看出, 当输入功率 P_{in} 增加时, 增益系数 G 减小, 最终当 P_{in} 远大于 P_s 时, G 趋于1. 而输入饱和功率 P_{ins} 与 P_s 之间的关系可以描述为

$$P_{\text{ins}} = \frac{P_s}{G_0 - 2}. \quad (2)$$

图2 部分III-V族化合物半导体的光谱区域

Figure 2 The spectral region of the compound semiconductors formed using group III and group V elements.

当输入功率过高时, 放大器的饱和特性会显著地降低放大器的增益. 材料增益饱和功率 P_s 可以从激光器速率方程中推导得到, 其值如下:

$$P_s = \frac{hc}{\Gamma_{xy}} \frac{\sigma_{xy}}{\alpha \tau \lambda}, \quad (3)$$

其中 σ_{xy} 是量子阱横截面积, λ 是光波长, α 是微分增益, Γ_{xy} 是与量子阱泵浦区域的模式重叠, τ 是载流子寿命, h 是普朗克常数, c 是真空中光速. 降低 α 和 τ 的数值, 可以增大输入饱和功率, 这一点可以让器件在高载流子浓度的条件下工作来实现. 如果降低量子阱的数量, 会使得截面面积 σ_{xy} 减小, 这会使得 P_s 降低, 同时由于 Γ_{xy} 减小, 并在给定的电流偏置下增大了载流子浓度, 使得 P_s 获得一个净增大. 这些步骤均会导致模式的增益系数减小, 因此放大器增益和饱和功率之间需要达到一个平衡^[8]. 对于双电极多量子阱半导体光放大器, 自发发射光谱和增益特性受到注入电流密度的很大影响. 通过改变两个电极的注入电流密度, 可以很方便地对自发发射光谱的半高全宽、峰值波长、峰值功率和增益特性进行控制^[9].

III-V族半导体光放大器已经取得了很大的发展, 制备所用的常用III-V族材料有InP, GaAs等. 为了制备硅基片上电致、低功率的光源器件, 可以利用III-V族材料发光性能好的优点, 采用键合工艺, 将III-V族材料的器件与硅基光电子器件混合集成在同一个基底上.

III-V族半导体放大器与硅波导的混合集成的过程中, 硅波导带来以下优点: 通过改变硅波导脊的宽度, 可以控制限制因子. 由于硅波导部分的有效折射率的加入, 使得III-V族半导体波导的有效折射率增加. 这也允许了在单个芯片上同时集成具有低限制因子和高限制因子的波导部分, 从而能够将高增益和高饱

和功率放大器与低阈值激光器结合起来. 随着硅的低掺杂, 模式重叠度增加, III-V族半导体层中限制因子的降低也会导致传输损耗的降低.

然而, 与大多数InP相比, 硅具有相对较高的折射率, 所以半导体层与硅波导之间的距离需要特别考虑. 如果III-V族半导体层的折射率和厚度太小, 则它需要有非常窄且薄的硅层. 而窄的硅波导层会增大散射损耗. 因此, 平衡两个波导的尺寸对于确保器件高性能运行是至关重要的.

这里所提到的光波导设计是通过增益区域波导的横向光模式的数值仿真来实现的. 通过仿真可以求出限制因子 Γ_{xy} 和模式内部传输损耗 α_i . 限制因子 Γ_{xy} 和模场内部传输损耗 α_i 均是随波导宽度变化的函数. 这两个参数可以与已知的或假设的材料增益一起, 用于计算净模式增益系数 g_{net} , 公式如下所示

$$g_{\text{net}}(w) = \Gamma_{xy}(w)g_{p,0} - \alpha_i. \quad (4)$$

2.2 硅上集成III-V族半导体光放大器的制备方法

目前为止, 硅上集成III-V族半导体光放大器基本分为两类: 一类是III-V族半导体直接集成在硅材料上^[10]; 另一类是将III-V族半导体集成到一个平坦间隔薄膜上, 例如聚合物DVS-BCB或者经抛光的SiO₂. 直接集成的方法需要经过一个疏水键或亲水键, 其中疏水键在某些情况下需要层间传导的晶片熔合^[11], 而亲水键利用一个仅仅只有几个纳米厚的薄氧化层来连接异质材料^[12]. 低温下的亲水键是通过氧气等离子体激活实现的, 从而可以形成薄氧化层, 也可以实现具有较大热膨胀系数失配的材料之间的连接. 由于InP和Si具有较大的热膨胀系数失配, 这个方法得到了广泛的使用. 对比来看, 疏水键需要一个大约650°C的退火环境, 而亲水键只需要大约300°C. 除了薄膜的情况, 高的过程温度会导致Si/III-V发光器件的性能降低^[8].

在直接键合器件上, III-V台面通常非常宽, 直接相邻的硅波导提供折射率引导, 而台面外部的氢注入

可以提供电流限制. 这些功能与浅脊波导类似, 由于高阶模式主要存在于电流限制通道的外部, 因此器件将大部分的放大作用提供给基模. 宽移植台面设计具有在量子阱中限制因子较低的缺点, 难以实现每个量子阱约1%的限制因子. 同时宽移植台面也有着改良热传导性的优点, 台面的未泵浦侧可以用作散热器, 并且与相对更导热的硅具有更多的接触. 尽管添加了高度热绝缘的埋氧层, 直接键合的氢注入宽台面单横模激光器已经证明了具有与原生衬底InP激光器相当的热传导性.

层间键合器件通常具有低折射率的中间间隔层, 一般采用SiO₂ ($n=1.45$)或DVS-BCB ($n=1.53$). 中间间隔层可以使得硅晶片表面变得更平坦, 允许在下面没有硅波导的情况下, 在机械性能上使得III-V脊波导更坚固, 这在直接键合的器件中是难以实现的. 并且由于波导芯层的总高度减小了, 更容易实现单横模器件. 同时因为光学模式与硅波导没有重叠, 在量子阱中可以获得更高的限制因子. 已经证实通过层间键合可以获得每量子阱高达1.6%的限制因子^[13], 这有利于制备紧凑的高单通道增益SOA. 然而, 公共中间层具有很差的导热性, 并且这些类型的器件必须依赖III-V波导以实现单横模工作. 与中间层和埋氧层结合的窄波导可导致高热阻抗并限制最大工作电流. 此外, 中间层的去耦合效应会使得III-V有源区域和无源波导之间的过渡复杂化. 但最近的文章表明, 采用非常薄的中间层厚度, 可以克服这种限制并实现高性能器件^[14]. 这两大类集成方法各自性能的比较如表1所示.

用于硅基集成III-V族半导体层的设计需要非常细致的考虑, 设计的许多要素都可以从单片III-V族放大器上借鉴. 由于硅波导对光学模式所产生的影响, 以及我们无法通过当前技术水平提取通过接合区域的电流, 外延层的设计需要进行适当的修改. 其中, 量子阱和势垒的设计不受异质集成的影响, 可以直接从现有的单片设计方法中复制过来^[15].

表1 硅上集成III-V族半导体光放大器不同集成方法的性能比较

Table 1 Performance comparison of different integrated methods for silicon based hybrid integrated III-V semiconductor optical amplifier

集成方法		性能
直接键合	亲水键合	低限制因子, 热传导性好, 退火温度300°C, 适合较大热膨胀系数失配的材料进行连接
	疏水键合	低限制因子, 热传导性好, 退火温度650°C
间接键合		高限制因子, 热传导性差, 脊波导更坚固, 有源区和无源区之间过渡复杂

混合放大器波导的横截面图和平面图如图3^[8]所示. 量子阱的数量与饱和功率之间的硬性关系并不明确, 但由于最大驱动电流受到器件自发热的限制, 具有不同数量量子阱的两个相同的放大器可以在相同的最大电流下工作, 这导致在较高载流子密度 N 下, 所需要的量子阱的数目更少, 从而减小了微分增益和载流子寿命. 从公式(3)中可以推出, 这也增大了饱和功率 P_s .

异质硅上集成III-V族半导体器件通常需要一个从有源异质波导到无源硅波导的过渡. 这种过渡对于无源硅器件的集成是必需的, 例如阵列波导光栅、分布式布拉格反射器或其他需要不同外延结构的III-V族器件(如光电探测器)等. 对于一个SOA, 这个过渡需要具有尽可能高的带宽和尽可能低的插入损耗以及反射. 插入损耗会直接降低增益和输出功率, 而反射将增加不期望的增益纹波.

目前为止, 在硅上异质集成III-V族材料用以实现传输、调制、探测已经取得了大量研究成果, 然而, 由于InP和Si之间存在较大的晶格失配(8.1%)和热膨胀系数失配, 硅上进行异质外延生长是一个很大的挑战, 位错密度可以达到 10^7 cm^{-2} . 虽然有关外延横向过生长(ELOG)的工作已经被证实为实现III-V族材料在硅上单片集成的可能解决方案, 在该方法中, 通过缺陷颈缩效应制备了无缺陷InP, 但是这种方法并未证实可使用在倏逝耦合硅基激光器上. 除此之外, 利用疏水性和DVS-BCB粘合剂晶片键合已经证明为实现硅上有效光发射机的方法. 基于Ar/O₂等离子体的疏水晶片键合的最近实验工作已经表明^[16], 电流注入可以通过Si/III-V界面, 允许了电子空穴与光学模式重叠的最大化, 这样可以尝试在硅上实现高效有源器件.

2.3 硅上集成III-V族半导体光放大器的发展过程

2.3.1 直接键合的混合集成InGaAlAs/Si光放大器

2007年, Park等人^[17]首次采用直接键合的方法制备了最早的硅基集成III-V族半导体光放大器. 实验中使用由氢注入限定的 $14 \mu\text{m}$ 宽的InP台面和 $4 \mu\text{m}$ 宽的电流沟道, 器件具有倾斜和抗反射(AR)涂覆的抛光不均匀面. 该放大器使用8个InGaAlAs量子阱和 $2 \mu\text{m}$ 宽的硅波导, 产生了相对较低的3%的限制因子. 器件的长度为 1.36 mm , 并且达到了 9.1 dB/mm 的最大片上增益, 输入饱和功率测得为 -2 dBm .

图3 (网络版彩图)(a) 具有宽植入台面设计的直接键合异质波导的适应性横截面; (b) 在金属化步骤之前制备得到的放大器的显微照片^[8]

Figure 3 (Color online) (a) Schematic cross section of a directly bonded heterogeneous waveguide with a wide implanted mesa design; (b) micrograph of the fabricated amplifiers prior to metallization [8].

这个InGaAlAs和硅混合集成的倏逝波放大器的结构包括硅波导以及III-V族半导体增益介质. 混合集成放大器的光场模式主要限制在硅波导中, 同时倏逝耦合至InGaAlAs量子阱区域, 在量子阱区域中主要通过电流注入提供光增益. 这两种不同的材料体系是在 300°C 的条件下利用低温氧气等离子辅助晶片键合而成的. 制备而成的器件通过测试, 达到了 13 dB 的最大芯片增益以及 11 dBm 的输出饱和功率.

此倏逝波放大器由一个键合到在单片SOI上制备的硅波导的偏移多量子阱区域组成, 如图4(a)所示. 利用这种混合结构, 光学模式可以在被下面的硅波导区域引导的同时, 从III-V族半导体区域获得电泵浦增益. 使用基于Cl-Ar-HBr的等离子体反应离子刻蚀, 在具有 $2 \mu\text{m}$ 厚埋氧层的未掺杂SOI衬底表面制备条形硅波导, 制备得到的硅波导的最终高度为 $0.76 \mu\text{m}$, 宽度为 $2 \mu\text{m}$, 从而形成了主要存在于硅波导中的光场模式. 所计算的光学模式与硅波导的重叠大约为74%, 与量子阱的重叠大约为3.4%. 最终制备得到的器件长度为 1.36 mm , 制造的混合集成放大器的横截面扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图像显示在图4(b)中.

图5表示出了改变具有 1 nm 步长的可调谐激光器的输入波长, 在不同偏置电流条件下的增益光谱. 最大增益发生在 1575 nm 处, 在横电模(TE)极化、 200 mA

图4 (网络版彩图)(a) 器件结构截面; (b) SEM图像^[17]
Figure 4 (Color online) (a) Device structure cross section; (b) SEM image [17].

图5 (网络版彩图)在不同电流水平下, 放大增益与波长的关系^[17]
Figure 5 (Color online) Amplifier gain versus wavelength with different current levels [17].

条件下具有62 nm的半高全宽. 在信号波长处, 由于电流水平的变化, 自发发射密度测量的噪声系数在13–10 dB之间波动. 在更高的电流水平下, 由于具有更大的自发发射因子, 噪声系数会降低. 考虑到存在5 dB的耦合损耗, 器件内部的噪声系数大约在8–5 dB之间.

这个结合InGaAlAs量子阱和硅波导的混合硅基倏逝波放大器采用电泵浦的方式, 综合了III-V族材料的有效光学增益以及硅波导控制光学模式的特性. 测得的芯片增益为13 dB, 通过对器件的热性质和电性质进行优化后, 可以达到20 dB. 器件的3 dB输出饱和功率大约为11 dBm. 此放大器设计允许与其他有源器件之间进行有效的集成.

2.3.2 高效疏水晶片键合的III-V/Si混合半导体光放大器

2013年Cheung等人^[18]采用疏水晶片键合的方法,

提出了关于高效率半导体光放大器的设计优化策略和不同于传统亲水键合的疏水晶片键合方法. 由于在III-V族和硅材料界面之间不产生氧化物界面, 因此允许电流载流子与光学模式之间的最大化重叠, 从而得到更高的能效. 这里提出了一个综合模型用以确定具有 $\text{In}_x\text{S}_{1-x}\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ 量子阱的疏水键合SOA中量子阱的宽度、组成和数量. 通过优化界面键合层、III-V族晶片叠层设计、直接混合放大器的尺寸和配置, 可以在2 mW输入和10 dB增益下获得高达35%的电光转换效率. 同样, 对尺寸进行优化也可以达到在0.1 mW输入和10 dB增益下15%的电光转换效率. 实验得到的经过结构优化的直接界面异质SOA结构示意图如图6所示.

2.3.3 间接键合的异质硅基III-V族半导体光放大器

2015年Kaspar等人^[19]采用以 SiO_2 作为间隔层的间接键合方法, 制备了一种新型的混合集成硅基III-V族半导体光放大器. 此放大器表现出了最高可达到10 dB的光纤增益以及大约为28 dB的最大内部增益. 该器件光学模式通过波导锥体在硅波导和III-V族波导之间传输, 垂直光栅耦合器用于将SOA连接到光纤. 在包含25 km单模光纤的环路设置中, 这个半导体光放大器可以放大各种调制格式的数据信号. 对于QPSK的10个环路, QAM实验的8个环路, 以及16QAM的4个环路, 表现出了低于前向纠错限制的误码率的传输过程.

此实验首先在图案化和平面化的SOI衬底上进行分子晶片键合III-V族量子阱, 键合之后形成III-V族波导, 接着使用标准405 nm的h-线光刻法将III-V族波导对准下方的硅波导, 从而制备出异质集成硅基III-V族半导体光放大器. 该混合SOA的有源部分和无源部分之间的转换是利用锥形波导实现的(如图7所示), 锥形波导迫使光学模式从硅转移到III-V族材料, 反之亦然. 在有源区域中, 与量子阱之间的模式重合率接近10%, SOA的有源区域大约为1.1 mm长. 在有源区域和无源区域之间的耦合损耗可能非常低. 这个方法的另一个优点在于, 有源波导和无源波导之间非常容易实现对准.

实验过程中, 观察到了这个放大器在1540 nm波长处的饱和现象, 放大器电流在75 mA时, 饱和现象发生在光纤输入功率大约为-2.5 dBm处, 这对应于光纤输出功率大约为2 dBm. 当SOA驱动电流增大时, 输出波

图6 (网络版彩图)实验设计的器件的俯视图(a)、第一截面图(b)和第二截面图(c)^[18]

Figure 6 (Color online) Top-view (a), first cross-sectional view (b) and second cross sectional view (c) of proposed device design [18].

图7 (网络版彩图)异质SOA中用于在硅波导和III-V族材料波导中进行模式转移的锥形结构的顶视图和横截面视图, 对于3个示意性横截面给出了仿真模式分布^[19]

Figure 7 (Color online) Top and cross-sectional views of the taper structure for mode transfer between III-V and silicon waveguides of the hybrid SOA. Simulated mode profiles are given for three exemplary cross-sections [19].

导饱和功率和输出光纤饱和功率也随之增大, 而输入波导饱和功率和输入光纤饱和功率随之减小. 实验同时观察了不同电流值的条件下, 光纤-光纤之间的增益与SOA注入光功率的之间的函数关系, 所得函数图像如图8所示.

实验测试了SOA的噪声系数与注入光功率和电流条件之间的关系. 对于约-8 dBm的输入功率, 噪声系数大约为17 dB. 这么大的噪声值主要是因为通过垂直光栅耦合器到光纤中的耦合损耗带来的, 对于当前

图8 (网络版彩图)在不同电流值的条件下, 光纤-光纤之间的增益与SOA注入光功率的之间的关系图像(-8 dBm附近存在峰的原因尚不明确)^[19]

Figure 8 (Color online) Fiber to fiber gain as a function of the injected optical power for various currents applied to the SOA (the origin of the peak around -8 dBm has not yet been fully understood) [19].

的这个样品, 内部损耗大约在10 dB.

为了评估所描述的异质集成SOA作为光网络节点中的光放大器的性能, 研究人员也进行了相关的实验. 使用I/Q调制器调制外部腔激光器的光, 并使用两个数模转换器来驱动调制器, 以不同的调制格式产生28 G波特的光信号: QPSK, 8QAM和16QAM. 最后, 使用相干混频器和连接到以40 GS/s工作的20 GHz带宽示波器的4对平衡光电二极管来进行信号检测. 此实验的结果对全光混合光子集成电路提出了一个非常有前景的解决方案, 可以用于在高比特率光网络中进行在线放大、光分组交换、多模和多核放大等. 如果耦合损耗减小并且饱和功率增加, 则可以取得更大的改进.

3 掺稀土离子硅基光波导放大器

在硅中掺入一定浓度的稀土元素, 充分利用稀土元素丰富的能级结构发出不同波长的光来满足实际的需要, 是制备硅基光源的一种有效方法. 其中稀土铒可以发出1.53 μm 的光, 对应于光纤通信中的石英玻璃吸收的最小值, 且该波长的能量不受激发功率和所处环境温度的影响, 是硅基光电子学中的标准波长. 因而, 掺铒硅发光是一种很有前途的硅基发光材料. 自从1987年发明掺铒光纤放大器以来^[20], 它已经成为电信网络中的标准组件, 促进了全世界的信息交换. 在通信所用低损耗低色散的C和L波段, 它具有宽增益、低噪声、以及与光纤光波系统的兼容性等优点, 使其成为非常适合用于多节点网络中的放大器件. 同时, 光泵浦的掺铒光纤激光器也已经达到了成熟的状态, 成功地应用于窄线宽单频率、高功率、多频

率、可调谐、或短脉冲输出等方面. 掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)和掺铒光纤激光器(Erbium-Doped Fiber Laser, EDFL)已被广泛应用于各个领域, 包括超高比特电信传输系统、频率测量、光谱和空间通信等^[21].

由于掺铒光纤放大器的成功以及集成光学的优势, 在过去的20年里, 掺铒波导放大器得到了广泛的研究^[22-24]. 掺铒波导放大器可以在低成本微型芯片上增强光波信号. 尽管掺铒波导器件具有非常显著的优势, 集成的过程仍带来了许多挑战和问题, 例如将光耦合进微型波导并从波导中耦合出来, 高效的光学泵浦, 在较短长度上提供足够的增益等. 为了克服这些挑战, 研究了大量的掺铒波导材料、集成平台以及器件设计. 由于与二氧化硅的相似性和相容性, 早期的研究集中在以磷酸盐玻璃作为母体材料上. 在差不多相同的时间段内, 掺铒 LiNbO_3 也得到了研究, 研制出了放大器以及连续波和脉冲激光器^[25,26]. 另外, 在氧化铝和氧化钇等材料中也发现了增益, 其中较高的折射率差可以导致较低的泵浦功率要求和较小的器件尺寸^[27]. 由于磷酸盐玻璃作为铒离子母体材料具有很多优良性质, 研制出了高增益放大器、高输出功率连续波激光器以及多波长发射的激光器阵列等. 很多有前景的研究也集中在共掺杂例如镱离子^[28]、硅纳米晶体^[29]、以及通过替代泵浦途径提高器件性能上. 总的来说, 在不同材料(包括晶体、玻璃、聚合物)上进行的各种研究, 产生了各种掺铒波导放大器(Erbium-Doped Waveguide Amplifier, EDWA)和掺铒波导激光器(Erbium-Doped Waveguide Laser, EDWL).

3.1 掺稀土离子硅基光波导放大器原理

3.1.1 铒的能级和泵浦

首先考虑铒离子中的相关能量跃迁. 铒和其他镧系稀土元素具有很好的光学性质. 当掺入到母体材料中时, 它们可以保持原子能级结构不变. 它们的中性形式是 $(\text{Xe})4f^N5d6s^2$ 或 $(\text{Xe})4f^N16S^2$, 当掺入到母体材料中时, 通常存在于三价氧化态, 由此弱结合的 $6s^2$ 电子并除去 $5d$ 或 $4f$ 电子. 部分填充的 $4f$ 电子层被较大半径的 $5s$ 和 $5p$ 轨道屏蔽, 导致局部电子环境. 在这种环境中, 库仑和自旋轨道相互作用导致 $4f$ 能级的简并性的提升. 因此, 在 $4f$ 壳层内极易发生各种不同的能量转变.

除了由于吸收、受激发射、辐射和非辐射衰变在单个离子的能级之间的固有跃迁之外, 由相邻离子之间的能量转移引起的跃迁也很常见. 这些过程在EDWA和EDWL中是特别重要的, 其中由于较短的器件长度和较高的掺杂水平, 平均离子间距 $r_{\text{Er-Er}}$ 与光纤器件相比变得显得更小.

有源掺铒波导器件所实现的基本功能是光学增益. 为了实现增益, 光子产生速率必须大于光子吸收和损失的速率, 包括散射的速率, 因此需要使用泵浦过程来使其发生受激发射并达到一个较高水平. 该泵浦可以由电泵浦或通过光泵浦提供. 掺铒情况下, 在980或1480nm的波长处的光学泵浦通常用于将离子从基态激发到 $^4I_{13/2}$ 态, 从中可以发生受激发射, 继而放大1530nm附近的增益带宽内的信号. 在 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 状态之间需要集体反转, 即在吸收和发射截面类似的情况下, 在1530nm附近的零声子线处, 至少50%的离子需要被激发到较高能级. 此外, 受激发射的光子数量必须超过损耗所损失的数量, 例如由于通道波导中的散射导致的传播损耗.

用于泵浦EDFA和EDWA的最有效的波长是980和1480nm. 在特定情况下, 980nm泵浦光会导致更高的最大粒子数反转, 因而在1530nm附近波长处会产生更高的增益. 在铒镱共掺杂的情况下, 需要采用980nm的泵浦以激发镱离子. 在其他情况下, 1480nm泵浦可以提供更高的最大增益, 由于设计在1480和1530nm处均为单模的波导更为简单, 这也可以方便波导设计以及提高放大器效率.

硅基掺稀土离子光波导放大器均采用光泵浦的方式, 与电泵浦光放大器相比, 不利于实际集成. 为了在硅基光电子集成回路中实现可电泵浦的硅基掺稀土离子光波导放大器, 研究者们进行了大量的努力, 也取得了相应的研究成果. 在用于实现与CMOS技术兼容的1.55 μm 电泵浦硅基发光材料的不同方法中, 掺铒二氧化硅和铒硅酸盐是比较有前景的方法. 其中, 掺铒二氧化硅器件^[30]是基于金属氧化物半导体(Metal Oxide Semiconductor, MOS)结构制备的, 将铒注入薄栅极氧化物中. 此器件显示出了高达10%的外量子效率, 达到了标准III-V族半导体发光器件的性能. 通过将电流注入MOS结构中, 具有较高能量的电子可以通过碰撞电离激发铒离子, 并在1.54 μm 处产生电致发光, 理论上实现了电泵浦掺铒槽波导光放大器. 这个方法

的主要挑战在于需要在槽波导中补偿较高的传播损耗(大于1 dB/cm), 此损耗值相当于在掺铒波导中所能达到的最高增益。

在铒硅酸盐方法中, 铒硅酸盐化合物具有防止有效电流注入的固有绝缘性质, 难以获得电致发光。目前为止, 通过加入富硅氧化层或在铒硅酸盐薄膜中添加过量硅的辅助方法, 已经实现了铒硅酸盐材料的电致发光^[31], 但并未真正实现这种材料的直接电致发光。除此之外, 基于金属绝缘体半导体(Metal Insulator Semiconductor, MIS)结构, 利用铒铈硅酸盐薄膜作为光学活性材料, 铒离子被硅酸盐中产生的热电子直接冲击激发, 从而在1.2 mA/cm²的电流密度下观察到1.53 μm处较强的直接电致发光^[32]。由于铒铈硅酸盐化合物已经表现出了一些优异的光学性质, 在其电致发光性能的基础上进行硅基掺稀土离子光波导放大器的研究具有非常重要的意义。

3.1.2 掺杂母体材料的影响

根据掺铒光波导放大器的光增益公式

$$G(\text{dB}) = 4.43 \times (\sigma^{\text{abs}} N^{(2)} - \sigma^{\text{em}} N^{(1)}) L, \quad (5)$$

其中, σ^{abs} 为受激吸收截面, σ^{em} 为受激发射截面, Γ 为光限制因子, L 为光波导长度, $N^{(1)}$ 和 $N^{(2)}$ 分别为处在基态和激发态的铒离子数目, 如果在足够强的泵浦功率下, 发生粒子数反转, 处于基态的铒离子全部跃迁至激发态, 公式(5)可以写成

$$G(\text{dB}) = 4.43 \times \sigma^{\text{abs}} N L. \quad (6)$$

由公式(6)可知, 如果想研制满足硅基光电子集成所需的小尺寸光波导放大器, 必须有效提高铒离子浓度(N), 才能实现在小尺寸(L)波导中获得较高的光学增益。但由于铒离子在硅基底的固溶度很低, 最高的铒离子掺杂浓度可达到 10^{16} cm^{-3} , 因此, 寻找合适的母体材料来提高铒离子的掺杂浓度成为掺铒光波导放大器的主要研究内容。

掺铒母体材料的选择并不是任意的, 需要满足一定的性质, 包括与铒掺杂相关的性质以及与集成光电子器件相关的性质。母体材料需要满足的与铒掺杂有关的性质包括: 合适的铒键合位置点、更高的无聚集铒溶解度、长的 $^4\text{I}_{13/2}$ 辐射寿命、低声子能量、高纯度等。具体说来, 对于结晶材料, 位置点必须是非中心对称的。此外, 对于铒离子半径, 晶格位置的大小必须

足够大。由于波导器件相比于光纤较短, 因此大的铒离子掺杂浓度是非常必要的。为了在掺铒波导器件中获得理想的增益, 通常需要 $1 \times 10^{20} - 10 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的浓度值。铒离子之间的距离取决于主体材料和掺杂方法, 为了减少由于铒离子间相互作用引起的猝灭, 应该避免铒离子簇的产生。另外, 为了能在合适的泵浦速度下为增益提供足够的粒子数积累, 需要长至毫秒级的 $^4\text{I}_{13/2}$ 辐射寿命。母体材料应该具有较低的有效声子能量, 同时尽量避免缺陷和杂质, 这样可以防止通过非辐射衰减产生增益猝灭和寿命猝灭。

除了这些与掺铒相关的性质之外, 母体材料还需要同时满足应用于集成光学器件所需要的条件, 即: 光学各向同性、良好的物理化学特性、制备工艺与已有的器件兼容、较低的背景光传播损耗等。

将晶体材料和非晶材料作比较, 晶体材料为窄带放大器和激光器提供了尖锐的发射谱线、高峰值截面和高稳定性。晶体材料大致可分为电介质和半导体。介质结晶材料具有较大带隙, 因此在宽波长范围内是透明的。晶体材料的主要缺点在于, 窄的增益光谱限制了在放大器或片上可调谐激光器上的使用, 以及晶体材料只能在网状衬底上生长, 因此无法简单地与其他材料平台相集成。相比于晶体材料, 非晶材料由于均匀和不均匀的展宽, 表现出较宽的发射光谱。非晶材料缺乏周期性, 导致很多局部铒环境, 每一个局部铒环境跃迁光谱进行叠加, 产生了铒离子整体展宽的跃迁线宽。虽然与晶体材料相比, 峰值发射截面更小, 但非晶材料可以在宽波长范围内提供相对平坦的增益, 这个优点可以应用在EDFA和可调谐掺铒激光器中。

非晶材料可以大致分为两大类: 聚合物和玻璃。由于聚合物具有低成本、可以与其他材料直接集成、可作为稀土离子母体材料的特性, 吸引了很多关注。然而, 这种材料热稳定性差, 材料自身通常也会显示额外的吸收谱线。非晶中的玻璃材料, 表现出很宽的发射谱线, 具有较高的热稳定性, 可生长在大部分衬底上。由于这些优势, 大量的玻璃母体材料得到了研究。其中, 多组分氧化玻璃也提供了定制各种性质如增益光谱和折射率的可能性^[33]。玻璃母体材料具有较低的折射率, 与标准光纤的折射率相匹配, 有利于与光纤之间的低损耗耦合。但用于大规模集成半导体器件中, 较低的折射率是一个不利因素。另一方面, 玻璃

材料的高的铒溶解度、宽增益、低成本总的来说对于集成器件是非常有用的。

铒硅酸盐化合物作为硅基光源候选材料,最近十年引起了大家的关注. 在铒硅酸盐化合物结构中,铒是化合物的阳离子,而不再作为杂质掺杂进去,和以前的掺杂方法相比,成功地提高了铒离子浓度,达到 10^{22}cm^{-3} ,并获得了较强的室温光致发光. 而且由于铒是固溶在化合物中的,减小了离子之间的团聚现象. 但这种材料具有非常高的铒离子浓度,合作上转换明显,所以可以采用铈(Y)和铒(Yb)共掺杂的方法分散铒,由于离子半径接近,所以可以使得铒充分分散而仍然保持晶体结构不变. 结果显示当铒与铈的比例为1:19时,光致发光强度提高了30倍^[34].

3.1.3 铒铈共掺杂对发光效率的影响

对于某些选择的 10^{20}cm^{-3} 的铒离子浓度,铒离子的泵浦吸收相当弱,这是由于在1480nm,特别是980nm处的吸收截面非常小造成的. 为了在更短的器件长度上实现更高的增益,有必要进行铒铈共掺杂. 铈离子在其 $^2\text{F}_{7/2}$ 到 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级之间的跃迁处提供了以980nm附近的波长为中心的光吸收路径. 当铈离子与铒离子掺入同一主体中时,激发的铈离子可将其能量转移到相邻的铒离子. 该过程在图9^[21]中示出: 在步骤(i)中,980nm光子被吸收,随后是(ii)通过铒离子激发到 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级的能量转移,和(iii)到 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级的快速非辐射衰变,从而占据放大器、激光器的上层能级. 步骤(iv)显示在信号波长处的受激发射. 虽然整个过程中可能发生向铈离子的反向转移,但激发的铒离子通过多声子弛豫快速衰变到 $^4\text{I}_{13/2}$ 水平的过程仍然占主导地位.

总的来说,由于较高的铈浓度和吸收截面以及有效的铈-铒能量转移,可以产生较高的泵浦吸收率,从而降低了由于铒离子间相互作用引起的性能退化. 通过应用铈共掺杂,还可以增加泵浦效率并且在掺铒波导放大器和激光器中缩短器件长度. 除了铈之外,其他稀土共掺杂,例如铥(Tm)(1460–1530nm, 1700–2100nm)和镨(Pr)(1300–1400nm)可以用于扩展或增加额外的放大带宽.

除了铈作为敏化剂之外,银也已被证明具有致敏效果,当使用短泵浦波长(360和488nm)时,会导致光致发光增强^[35],另一种常见的铒敏化剂是铕(Eu)^[36]. 另

图9 (网络版彩图)通过铈共掺杂使得铒离子敏化的主要过程^[21]: (i) 铈离子对980nm泵浦光的吸收和激发; (ii) 从受激铈离子到基态铒离子的能量转移; (iii) 激发的铒离子从 $^4\text{I}_{11/2}$ 到 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级的快速非辐射衰减过程; (iv) 1.5 μm 处的受激发射
Figure 9 (Color online) Primary processes involved in Er sensitization by Yb co-doping [21]: (i) 980nm pump light absorption and excitation of Yb ion; (ii) energy transfer from an excited Yb ion to an Er ion in the ground state; (iii) fast non-radiative decay of an excited Er ion from the $^4\text{I}_{11/2}$ level to the $^4\text{I}_{13/2}$ level; (iv) stimulated emission at 1.5 μm .

外,在掺铒二氧化硅波导中掺入纳米硅晶体也可以提高铒泵浦效率,并在单位长度上提供更高的增益.

3.2 掺稀土离子硅基光波导放大器的制备方法

针对掺铒有源器件已经研究了多种制备方法,每种具有不同的优点和缺点,这取决于我们所期望的实际应用. 在选择制造过程时存在几种可能性. 第一个考虑是掺铒的母体材料的生长. 母体材料可以以衬底的形式生长,例如从玻璃熔体生长. 除此之外,它可以使用一种标准沉积技术沉积生长在现有衬底上. 另一个考虑是掺杂的方法. 铒掺杂物可以在母体材料生长期间添加到薄膜或衬底中,或者在离子注入等其他技术之后添加. 最后,必须设计具有合适尺寸和低损耗的通道波导. 使用多种技术对波导进行图案化,包括通过反应离子刻蚀的物理刻蚀、离子束刻蚀或者飞秒脉冲激光的直接写入,某一技术是否适用取决于母体材料本身.

生长方式可以分为衬底生长和薄膜沉积两种. 衬底生长方法首先进行Czochralski晶体生长和合适前驱体的融化,随后进行冷却,用于制造掺铒的硅酸盐和磷酸盐玻璃. 整个衬底生长过程的优点是保证了高纯度,以及对掺杂的均匀性和浓度的优异控制. 这种方法的缺点是难以将这种材料与其他集成光学平台相结合. 相比之下,薄膜生长方法通常涉及在氧化的硅晶片或其他衬底上的沉积,因此自然地允许与相同衬底上的其他器件在较大范围内集成. 已经得到使用的生长掺铒波导薄膜的方法包括原子层沉积、浸涂覆、高真

空化学气相沉积(High-Vacuum Chemical Vapor Deposition, HV-CVD)、等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)、脉冲激光沉积(Pulsed Laser Deposition, PLD)、反应共溅射、射频(RF)溅射、旋涂以及气相沉积等。

除了生长方法,还有一个需要重点考虑的是掺杂方法. 所讨论的大多数技术都涉及在生长或沉积过程中向母体材料中掺杂,实现在整个材料中均匀的铒离子分布. 通过交替溅射的方法,可以设计铒离子的分布,使得在泵浦光强度最高的地方铒离子浓度最高,从而潜在地提高了泵浦效率. 这个方法的另外一个优势是其可以一维控制铒离子分离的能力,这样可以潜在地减小铒离子之间的相互作用和增益淬灭. 除此之外,也可以通过离子注入或扩散的方法在母体材料生长完成之后掺杂铒离子. 这两种方法也都具有允许选择性掺杂芯片某些区域的优点,因此可以仅在需要的地方提供增益,这样可以消除铒吸收的部分损耗. 缺点是需要额外的成本和处理步骤,具体包括离子注入后高温退火的设备成本等。

在制备掺铒的薄膜或衬底之后,需要设计沟道波导以引导芯片内的光信号. 波导制备技术可以分为两大类,分别是改变层或衬底的局部物理性质或折射率,和改变层的几何形状. 在诸如飞秒激光写入和聚焦质子束写入的直写技术中,特定点处块材料的局部折射率可以被修改,并且可以扫描衬底写入波导. 除了

上述方法,也可以通过刻蚀脊波导结构在平面波导膜中实现横向限制,从而实现折射率修改. 刻蚀方法包括氩离子束刻蚀、衬底或层上刻蚀、反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)、湿法化学刻蚀等. 在这些方法中,RIE提供了最佳的控制和分辨率. 任何刻蚀方法的都是制备光滑的侧壁,以防止高的散射损失.

图10显示了两种不同的掺铒波导制备方法^[21]. 在图10(a)中,显示了从玻璃溶体到玻璃衬底的过程,接着进行飞秒激光写入. 该方法是串行的,因此大大增加了在大面积或多衬底上图案化的时间和成本. 这个方法主要的优点是可以在衬底中制备不同深度的波导,允许写入三维光子电路. 图10(b)显示了通过反应共溅射的掺铒波导沉积方法,接着进行反应离子刻蚀和顶部覆盖沉积. 这种方法允许使用标准微制造设备进行大面积晶片级别处理.

3.3 掺稀土离子硅基光波导放大器的发展过程

3.3.1 掺铒氧化铝光波导放大器

1993年,荷兰皇家科学院院士Polman课题组^[37]制备了当时世界上最小的铒掺杂氧化铝光波导放大器,器件面积 1 mm^2 ,实现了 2.3 dB/cm 的净增益. 实验过程中,在氧化的硅基底上沉积一层氧化铝薄膜,并用 800 keV 对铒进行离子注入,注入的峰值浓度范围在 $0.01\%\text{--}1\%$ 之间. 样品显示了相对很宽的光致发光光谱,发光中心波长在 $\lambda=1.533\text{ }\mu\text{m}$ 处,这对应于铒离子内

图10 (网络版彩图)掺铒波导制备方法. (a) 飞秒激光直接写入掺铒的玻璃衬底; (b) 掺铒层沉积,接着通过顶部覆盖沉积进行反应离子刻蚀和钝化

Figure 10 (Color online) Er-doped waveguide fabrication methods. (a) Femtosecond laser writing directly into an Er-doped glass substrate; (b) Er-doped layer deposition followed by reactive ion etching and passivation by top-cladding deposition.

部的4f跃迁过程. 在铒的峰值浓度为0.23%时, 注入后高达950°C的热退火会使光致发光强度增大40倍. 这是因为缺陷退火将离子的发光寿命从1 ms增大至7 ms, 同时增加了铒离子的活性部分. 同时, 实验结果表明, 只有中等浓度猝灭效应, 才可以达到高铒离子浓度.

在950°C下退火后的铒注入样品的光致发光光谱如图11所示, 光谱在1.533 μm 处于峰值, 对应于铒离子的第一激发态和基态之间的4f跃迁, 插图显示了铒离子的能级示意图. 简并4f能级的Stark分裂、固体中铒离子的特性、以及均匀和不均匀的加宽, 导致半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为55 nm. 这比铒注入二氧化硅(FWHM约为11 nm), 以及铒注入钠钙硅酸盐玻璃(FWHM约为19 nm)宽得多, 可以为多路复用信号放大提供更大的带宽. 在不同注入剂量、不同温度退火下的样品的光谱具有不同的强度, 但是具有相似的形状, 不同曲线之间的相对强度变化较小.

3.3.2 铒掺杂纳米硅

作为可提供完全硅兼容放大器和激光器的前景的一种敏化方法, 铒掺杂纳米硅得到了广泛的研究. 直径在1–10 nm之间的纳米硅晶体, 可以在很宽的波长范围内吸收光波, 当与铒共同作用时, 可以将能量高效地转移到铒离子. 纳米硅致敏的主要优点在于具有比铒吸收截面高几个数量级的铒激发截面. 此外, 纳米硅在可见光范围内具有宽吸收带, 因此可利用低成本二极管激光器和发光二极管(Light Emitting Diode, LED)用作泵浦源. 另一个优点是通过纳米硅掺杂的材料有效折射率增强, 导致了更好的光学限制.

2002年Han等人^[38]制备了一种铒掺杂纳米硅的二氧化硅波导放大器, 并确定了与光增益相关的系数. 此单模波导放大器是通过电子回旋共振等离子体增强化学气相沉积掺铒 $\alpha\text{-SiO}_x(x<2)$, 接着高温退火沉积纳米硅来制备而成的. 利用氩激光器的477 nm谱线从顶部泵浦波导, 通过纳米硅晶体激发铒离子, 导致传输的1535 nm信号增强高达14 dB/cm, 可能的净增益高达7 dB/cm. 根据信号增强对泵浦功率的依赖, 实验中可获得1535 nm处 $2\times 10^{-19}\text{cm}^2$ 的发射截面, 以及477 nm处超过 10^{-17}cm^2 的有效激发截面. 实验结果如图12所示.

通过实验发现, 纳米硅致敏性导致铒离子发射截面和激发截面的大幅增加, 导致0.03%的铒浓度下1535 nm处理论最大可能增益为7 dB/cm.

图11 铒注入的 Al_2O_3 薄膜的室温光致发光光谱, 光谱分辨率为2 nm, 铒离子浓度 $2.3\times 10^{15}\text{cm}^{-2}$, 峰值浓度0.23%, 退火温度950°C, 使用100 mW的514.5 nm泵浦激光, 插图显示了铒离子的能级示意图^[37]

Figure 11 PL spectrum, taken at room temperature, of an Er-implanted ($2.3\times 10^{15}\text{Er cm}^{-2}$, 800 keV, peak concentration 0.23%) Al_2O_3 film annealed at 950°C ($\lambda_{\text{pump}}=514.5\text{ nm}$, resolution 2 nm) ^[37].

图12 信号增强与泵浦功率之间的关系曲线. 实验获得高达14 dB/cm的信号增强, 意味着可能的净增益高达7 dB/cm. 根据拟合, 得到 $2\times 10^{-19}\text{cm}^2$ 的发射截面, 以及477 nm处超过 10^{-17}cm^2 的有效激发截面^[38]

Figure 12 Pump power dependence of SE. It shows a SE of up to 14 dB/cm, implying a possible net gain of up to 7 dB/cm. From the fit, we obtain emission cross section of $2\times 10^{-19}\text{cm}^2$ and an effective excitation cross section of $\geq 10^{-17}\text{cm}^2$ at 477 nm ^[38].

3.3.3 铒硅酸盐化合物

由于铒在硅中的低溶解度以及声子辅助能量转移和俄歇淬灭, 室温下的铒发光效率较低. 这些效应与在室温下掺铒硅的小峰值发射截面一起, 使得单纯铒掺杂硅基体不适合于制造硅基激光器或光放大器. 2004年Issiki等人^[39]提出了一种采用铒硅酸盐材料解决结晶硅掺杂铒所遇到的许多问题的方法. 铒硅酸盐材料是由铒、氧和硅组成的单晶化合物结构, 可以实现高达14%的铒浓度. 观察到具有极窄线宽的室温光

致发光(PL)和相对较小的温度淬灭.

实验中硅上的光学活性和电可激发的铒络合物通过湿化学合成法制备. 通过用 ErCl_3 /乙醇溶液涂覆硅衬底, 然后快速热氧化和退火, 形成单晶 Er-Si-O 化合物. 观察到室温环境下铒离子的 $1.53\mu\text{m}$ 光致发光谱线, 峰值线宽小至 4 meV . 此化合物可以直接激发或通过光载流子间接激发到铒的 4f 态. 实现了在具有 0.9nm 周期性的晶格中高达14%的铒浓度, 铒离子浓度达到了 10^{22} cm^{-3} . 在室温下的热淬灭系数仅仅是5, 并且保持在 $1.535\mu\text{m}$ 波长处的寿命是 $200\mu\text{s}$.

图13显示了 Er-Si-O 晶体在 488nm 泵浦激发(泵浦功率 100mW)下在硅上的室温光致发光光谱. 在 $1.529\mu\text{m}$ 处观察到尖锐的主峰, 半高全宽为 7.5nm . 该线宽比在室温下观察到的其他掺杂铒的硅基材料的线宽窄得多, 其通常为 50nm .

图14显示了样品的PL激发光谱, 这是通过监测 $1.53\mu\text{m}$ 的峰值强度得到的. 将PL强度归一化为泵浦功率, 可以观察到尖锐的峰结构. 激光光谱还显示出了在铒吸收带之外的清晰的铒发射成分, 这表明铒离子也可以通过光载体介导过程激发. 图中的交叉阴影区域是矩阵中表示该间接分量的状态密度的抛物线拟合. 表观吸收边缘接近 1.22 eV , 远高于室温下的体硅带隙(1.12 eV).

3.3.4 铒镱共掺杂硅酸盐化合物

由于与掺铒的硅基材料($10^{16}\text{--}10^{20}\text{ cm}^{-3}$)相比, 铒硅酸盐材料具有更高的铒离子浓度(10^{22} cm^{-3}), 因此铒硅酸盐材料(Er_2SiO_5 和 $\text{Er}_2\text{Si}_2\text{O}_7$)作为硅基光子学集成中用于小尺寸和高光学增益光源的掺铒材料已经引起了相当大的关注. 然而, 由于铒离子之间距离太近, 这种高浓度会导致上转换的产生, 从而限制发光. 因此, 在这种铒硅酸盐材料中控制铒离子距离是非常重要的. 减少这种上转换的有效策略是添加镱离子进入材料. 由于镱和铒具有类似的离子半径, 它们在硅酸盐晶格中代替铒离子, 并防止相邻的铒离子发生上转换. 钇和铒也具有相似的离子半径. 不仅如此, 镱作为在 980nm 激发波长的铒离子的有效敏化剂, 可以吸收比铒更多的泵浦功率, 导致更强的铒发光. 然而, 关于铒镱硅酸盐的研究并不多. 此外, 已经研究发现在 SiO_2 衬底上的过量氧会对光致发光有显著影响, 从而控制铒, 硅和氧的组分对于获得高度结晶的铒硅酸盐材料

图13 室温下硅上 Er-Si-O 晶体在 488nm 泵浦激发(泵浦功率 100mW)下的光致发光光谱, 插图显示了 Er-O_6 八面体的示意图^[39]

Figure 13 Room-temperature photoluminescence spectrum of Er-Si-O crystals on Si under 488nm excitation (pump power 100mW). The inset shows a schematic of an Er-O_6 octahedron ^[39].

图14 室温下硅上 Er-Si-O 晶体的光致发光激发光谱. 在 $1.53\mu\text{m}$ 处实验得到的光致发光强度随泵浦波长的变化关系^[39]

Figure 14 Room-temperature photoluminescence excitation spectrum of Er-Si-O crystals on Si. The $1.53\mu\text{m}$ photoluminescence is monitored as a function of pump wavelength ^[39].

是非常重要的^[34].

2010年Wang等人^[40]进行了有关铒镱共掺杂硅酸盐化合物的光致发光的相关实验. 在此次实验中, 通过控制 SiO_2 /硅基底上铒的组分, 发现了 Er_2SiO_5 的超红外光致发光现象. 优化 980nm 泵浦光作用下铒的组分, 并与 654nm 泵浦光的纯铒硅酸盐材料作了相应的对比. 实验过程中, 得到了在泵浦光波长 654nm 时, 硅基底上 $\text{Er}_{2-x}\text{Yb}_x\text{SiO}_5$ ($x=0\text{--}2$)薄膜的光致发光谱, 如图15(a)所示. 同时也得到了 SiO_2 /硅基底和硅基底上 $\text{Er}_{2-x}\text{Yb}_x\text{SiO}_5$ 薄膜在 $1.53\mu\text{m}$ 处的光致发光强度与泵浦波长的关系, 如图15(b)所示.

通过整个实验, 观察到在 980nm 泵浦光的作用下,

图 15 (a) 在泵浦光波长654nm时, 硅基底上 $\text{Er}_{2-x}\text{Yb}_x\text{SiO}_5$ ($x=0-2$)薄膜的光致发光谱; (b) 在980和654nm泵浦波长条件下, 二氧化硅/硅基底和硅基底上 $\text{Er}_{2-x}\text{Yb}_x\text{SiO}_5$ 薄膜在 $1.53\mu\text{m}$ 处的光致发光强度与铽浓度的关系^[40]

Figure 15 (a) PL spectra of $\text{Er}_{2-x}\text{Yb}_x\text{SiO}_5$ ($x=0-2$) films on Si substrates at the wavelength pump of 654 nm; (b) $1.53\mu\text{m}$ integrated PL intensity of $\text{Er}_{2-x}\text{Yb}_x\text{SiO}_5$ films on SiO_2/Si substrates and Si substrates as a function of Yb concentration at 980 and 654 nm pump wavelengths^[40].

在 $\text{SiO}_2/\text{硅基底}$ 上沉积 $\text{Er}_{0.1}\text{Yb}_{1.9}\text{SiO}_5$ 薄膜在 $1.53\mu\text{m}$ 处具有超过了200倍的光致发光强度. 当铒与铽比例为1:19时, $\text{Er}_{0.1}\text{Yb}_{1.9}\text{SiO}_5$ 薄膜产生最大的光致发光效率, $\text{Er}_{0.1}\text{Yb}_{1.9}\text{SiO}_5$ 中所有的铒离子均是光学活性的. 另外, 非辐射复合率的降低, 是铒铽硅酸盐薄膜发生超红外光致发光的主要原因.

除此之外, 该研究团队理论上计算了铒铽/铒硅酸盐化合物的光增益特性, 在材料成分和结构均得到优化的情况下, 分别制备了条形、沟道和混合波导结构3种铒铽/铒硅酸盐化合物光波导放大器, 都观察到了光放大现象, 并达到了1.9 dB的内增益^[40-43].

3.3.5 亚微米级铒铽/铒共掺杂硅酸盐化合物

2015年, Wang等人^[44]采用亚微米级铒铽共掺杂化合物, 提出了一种近红外通信波段的高增益光放大器. 制备所得放大器的高折射率硅芯用于紧密限制亚微米结构内的光场, 单晶铒铽硅酸盐壳层用作高效增益

介质. 理论和实验结果表明, 通过系统地调节芯层直径和壳厚度, 可以将大部分光功率选择性地限制在铒铽硅酸盐壳层增益介质中, 以实现低损耗高增益的光波导放大器. 实验结果进一步证明, 经过优化后的核-壳结构纳米线可以展现高达31 dB/mm的净增益, 比之前所报道的微米级光放大器的最佳结果高20倍以上. 制备得到的纳米线也可以很容易地集成到现有的硅基光电子集成电路中去.

对实验所得到的光波导放大器进行测试, 所得结果如图16所示. 器件所能得到的最大净增益达到了 (31 ± 2) dB/mm. 不仅利用高折射率引导的硅芯对红外光进行了有效的限制, 也在铒铽硅酸盐壳层中实现了铒离子的较高浓度 $(4.8\times 10^{21}\text{cm}^{-3})$.

根据红外辐射在大气层中的传输特性, 红外光谱通常分为近红外(Near Infrared, NIR)、中红外(Mid Infrared, MIR)和远红外(Far Infrared, FIR). 虽然近年来硅基光电子应用的波长范围逐渐从传统通信波段延展至中红外和远红外波段, 但是目前集成硅基光电子器件的关注点仍着重在近红外波段(780–2526nm)应用中^[45]. 2016年Ye等人^[46]制备了一种单晶铒铽氯化物硅酸盐纳米线, 并观察了室温下近红外上转换激光现象. 实验中在室温下利用1476nm激光进行泵浦, 纳米线在非常宽的范围内发光(400–1000nm). 在平均泵浦功率大约为7mW时, 观察到985nm峰的清晰阈值. 高于阈值时, 光强随着泵浦功率的提高线性增加. 当测试温度从300K降低到77K时, 985nm峰的半高全宽从1.25nm降低到0.25nm, 这是迄今为止在980nm处获得的最窄线宽, 实验结果如图17所示. 这个实验为探索近红外波长的纳米光电子器件提供了新的基础.

此实验提出二阶合作上转换(Cooperation Up-Conversion, CUC)和四能量状态模型, 解释了980nm处的上转换激光机制. 当进一步改变纳米线中的铒/铽比例时, 可分析980nm处的上转换发射机制, 并观察到具有较高铒/铽比例纳米线的主峰蓝移现象.

4 其他光放大器

除了上述重点介绍的硅基集成III-V族半导体光波导放大器和硅基掺稀土离子光波导放大器之外, 还有根据其他原理制备的光放大器, 例如锗硅放大器和拉曼放大器等.

图 16 (网络版彩图)(a) 仅使用泵浦激光的引导光致发光典型谱线(黑色); 1543/1534nm的探针激光, 以及同时存在探针激光和泵浦激光时的总输出(泵浦功率36mW); (b) 导线直径600nm, 芯层直径分别为200, 300, 40nm的情况下净增益与泵浦功率的关系; (c) 最大净增益和泵浦功率阈值随芯层直径的变化关系^[44]

Figure 16 (Color online) (a) Typical spectra of the guided PL (black) only with the pump laser on; the probe laser at 1534 or 1543 nm, and the total output with both the probe and the pump lasers are present (pumped at 36 mW); (b) pump power dependent net gain for the wires with core diameters of $d=200$, 300 , 400 nm (wire diameter is 600 nm); (c) silicon core diameter-dependent maximum net gain (black dot, pumped at 56 mW) and positive net gain threshold (blue rectangular) for different silicon core diameters ^[44].

4.1 锗硅放大器

一直以来, 锗被认为是间接带隙半导体材料. 未应变锗的能带结构表现为直接导带谷(T)只比间接导带谷(L)高136 meV. 通过能带工程, 即使用充分的拉伸应变和n型掺杂可以有效提供直接带隙中的粒子反转, 来补偿这个能量差异, 其中拉伸应变可以减小L谷和T

图 17 (网络版彩图)不同测量温度下的979nm附近纳米线的光谱, 插图显示了发光强度和979.1 nm峰的线宽与温度之间的关系

Figure 17 (Color online) Spectra of the nanowire around 979 nm in different measurement temperature and the dependence of emission intensity and linewidth of the 979.1 nm peak to the temperature (inset).

谷之间的差异, 而来自n型掺杂的非本征电子将填充L谷使得达到T谷的水平以补偿剩余的能量差. 这样使得锗从间接带隙变成直接带隙^[47]. 这些研究结果表明拉伸应变的n型掺杂锗是硅基集成光放大器和激光器的良好候选者. 2010年, 美国麻省理工学院Kimerling研究组^[48]在前期工作的基础上, 使用室温下的边缘发射波导器件, 首次实验观察到了硅基锗材料的直接带隙跃迁激光.

4.2 拉曼放大器

当光通过介质时, 入射光与分子运动相互作用, 引起散射光频率发生变化的现象就是拉曼散射. 由于入射光子与分子碰撞时, 入射光子与分子之间交换能量, 改变了分子的振转能级, 因此散射光光子不仅动量发生改变, 能量也发生改变. 散射光子能量低于入射光子能量的是斯托克斯散射, 而散射光子能量高于入射光子能量的是反斯托克斯散射. 拉曼散射是一种非线性光学现象, 当高功率密度的泵浦光入射硅材料时, 出现较强的拉曼散射光, 克服了硅材料发光效率低的缺点. 拉曼散射现象不需要纳米尺寸的结构、与传统集成光电子兼容、且在所需要的波段内均可调谐, 因此吸引了很多研究人员. 但由于拉曼放大器需要高功率密度的光泵浦, 且从原理上无法实现电泵浦, 限制了其进一步的发展. 2003年, Claps等人^[49]首次观察到了硅波导中的受激拉曼放大.

相比于受激拉曼散射, 硅中受激布里渊散射的散

射系数要小大约两个数量级,且布里渊散射的信号带宽更小.因而在制备光波导放大器的过程中,利用受激拉曼散射更具优势.

5 总结与展望

硅基发光可以通过集成III-V族半导体,或进行稀土离子掺杂等方法来实现.前者需要有异质集成的过程,例如晶片键合,而后者允许通过各种方法在硅基底上直接进行晶片级别的沉积.在过去的30年里,微型光源基本被III-V族半导体材料主导,这主要存在两个原因.首先,半导体材料的增益可以直接通过电泵浦获得,使得基于这些材料的放大器和激光器自然要比必须由光泵浦的器件更高效.其次,由于激发态的去相干时间在半导体和稀土离子掺杂材料中处于相同数量级,所以半导体中电子空穴对复合所允许的光跃迁会导致相关的跃迁横截面部分的数量级大于稀土离子4f原子壳层内的宇称禁戒跃迁的数量级^[50].因此,硅基集成III-V族半导体光放大器可以提供数百dB/cm的每单位长度的增益,通常比掺稀土离子光波导放大器的几个dB/cm增益高两个数量级^[51,52].

然而,具有长激发态寿命和长增益恢复时间的掺稀土离子放大器工作在非饱和、小信号增益状态下,从而也允许其在高速状态下进行信号放大.在硅基底上沉积掺铒氧化铝薄膜的波导放大器可以达到170 Gbit/s的速度^[53],在掺铒光纤中,这一速度可以达到更高^[54].此外,异质集成III-V族半导体器件通常会在工作过程中产生大量的热量,这会造成不利的后果.首

先,半导体器件的工作比他们的电介质对应物所受到温度的影响更大^[24].随着温度的增加,增益光谱在波长上发生显著偏移,这可能导致激光模式跳变.温度和诱发的折射率变化、谐振器长度、以及布拉格光栅周期等的变化将会导致激光谱线偏移和线宽变宽.其次,当与同一芯片上的光学电路进行集成时,产生的热量可能干扰其他光学器件的工作.相对的,对于稀土离子掺杂的电介质,由于热量产生显著地减小,因此温度的影响是可以完全避免的.而且稀土离子激发过程中的折射率变化也显著小于III-V族半导体中的电子空穴对变化^[55].目前已经通过稀土离子掺杂,制备出了窄至1.7kHz的自由运行单纵模分布反馈激光器^[56],而市面上普遍存在的III-V族DFB激光器的典型线宽范围是1–10MHz^[57].掺铒波导放大器的未来研究方向大致为,通过在同一芯片上集成多个组件来开发铒敏化物以及增加器件功能等.采用合适的致敏方法可以增强铒激发效率,从而制备出更小更节能的器件,这个方面目前正在深入研究.

总的来说,异质集成III-V族半导体光放大器可以采用电泵浦的方式、需要的泵浦功率较小、最接近实用,但具有集成度不高、制备工艺复杂、温度稳定性差、与CMOS工艺不兼容等缺点.相比较而言,掺稀土离子光波导放大器偏振不敏感、噪声小、温度稳定性好、大带宽、且与CMOS工艺兼容,成本低,但只能采用光泵浦的方式,发光效率低,每单位长度增益较小.硅基光波导放大器近年来虽然取得了很大进展,但所面临的挑战仍是多方面的,还需要国内众多学者进行攻关.

参考文献

- 1 Zhou Z P. Silicon Photonics (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2012 [周治平. 硅基光电子学. 北京: 北京大学出版社, 2012]
- 2 Wang X J, Su Z T, Zhou Z P. Recent progress of silicon photonics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 014201 [王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 014201]
- 3 Mason B, Barton J, Fish G A, et al. Design of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12: 762–764
- 4 Murthy S, Kato M, Nagarajan R, et al. Large-scale photonic integrated circuit transmitters with monolithically integrated semiconductor optical amplifiers. In: *Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*. New York: IEEE Press, 2008
- 5 Nagarajan R, Kato M, Hurtt S, et al. Monolithic, 10 and 40 channel InP receiver photonic integrated circuits with on-chip amplification. In: *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. Anaheim: Optical Society of America Press, 2007. PDP32
- 6 Durhuus T, Mikkelsen B, Joergensen C, et al. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J Lightw Technol*, 1996, 14: 942–954

- 7 Dutta N K, Wang Q. Semiconductor Optical Amplifiers. Singapore: World Scientific, 2006
- 8 Davenport M L, Skendzic S, Volet N, et al. Heterogeneous Silicon/III-V Semiconductor Optical Amplifiers. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2016, 22: 78–88
- 9 Wang H C, Huang L R, Shi Z W. Amplified spontaneous emission spectrum and gain characteristic of a two-electrode semiconductor optical amplifier. *J Semicond*, 2011, 32: 064010
- 10 Duan G H, Jany C, Le Liepvre A, et al. Hybrid III-V on silicon lasers for photonic integrated circuits on silicon. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20: 90020X
- 11 Hawkins A R, Wu W, Abraham P, et al. High gain-bandwidth-product silicon heterointerface photodetector. *Appl Phys Lett*, 1997, 70: 303–305
- 12 Liang D, Chapman D C, Li Y, et al. Uniformity study of wafer-scale InP-to-silicon hybrid integration. *Appl Phys A*, 2011, 103: 213–218
- 13 Adler F, Moutzouris K, Leitenstorfer A, et al. Phase-locked two-branch erbium-doped fiber laser system for long-term precision measurements of optical frequencies. *Opt Express*, 2004, 12: 5872–5880
- 14 Keyvaninia S, Muneeb M, Stanković S, et al. Ultra-thin DVS-BCB adhesive bonding of III-V wafers, dies and multiple dies to a patterned silicon-on-insulator substrate. *Opt Mater Express*, 2013, 3: 35–46
- 15 Coldren L A. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. *Opt Eng*, 1997, 36: 616
- 16 Linghan L, Higo A, Higurashi E, et al. SOI platform and III-V integrated active photonic device by direct bonding for data communication. In: *Proceedings of Low Temperature Bonding for 3D Integration*. New York: IEEE, 2012
- 17 Park H, Fang A W, Cohen O, et al. A hybrid AlGaInAs-silicon evanescent amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19: 230–232
- 18 Cheung S, Kawakita Y, Shang K, et al. Theory and design optimization of energy-efficient hydrophobic wafer-bonded III-V/Si hybrid semiconductor optical amplifiers. *J Lightw Technol*, 2013, 31: 4057–4066
- 19 Kaspar P, de Valicourt G, Brenot R, et al. Hybrid III-V/silicon SOA in optical network based on advanced modulation formats. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27: 2383–2386
- 20 Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, et al. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm . *Electron Lett*, 1987, 23: 1026–1028
- 21 Bradley J D, Pollnau M. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers. *Laser Photon Rev*, 2011, 5: 368–403
- 22 Polman A. Erbium implanted thin film photonic materials. *J Appl Phys*, 1997, 82: 1–39
- 23 Kenyon A J. Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics. *Prog Quantum Electron*, 2002, 26: 225–284
- 24 Zimmerman D R, Spiekman L H. Amplifiers for the masses: EDFA, EDWA, and SOA amplets for metro and access applications. *J Lightw Technol*, 2004, 22: 63–70
- 25 Brinkmann R, Baumann I, Dinand M, et al. Erbium-doped single- and double-pass Ti:LiNbO₃ waveguide amplifiers. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30: 2356–2360
- 26 Suche H, Baumann I, Hiller D, et al. Modelocked Er:Ti:LiNbO₃-waveguide laser. *Electron Lett*, 1993, 29: 1111–1112
- 27 van den Hoven G N, Koper R J I M, Polman A, et al. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al₂O₃ waveguides on silicon. *Appl Phys Lett*, 1996, 68: 1886–1888
- 28 Chryssou C E, Di Pasquale F, Pitt C W. Improved gain performance in Yb³⁺-sensitized Er³⁺-doped alumina (Al₂O₃) channel optical waveguide amplifiers. *J Lightw Technol*, 2001, 19: 345–349
- 29 Daldosso N, Pavesi L. Nanosilicon photonics. *Laser Photon Rev*, 2009, 3: 508–534
- 30 Barrios C A, Lipson M. Electrically driven silicon resonant light emitting device based on slot-waveguide. *Opt Express*, 2005, 13: 10092–10101
- 31 Yin Y, Sun K, Xu W J, et al. 1.53 μm photo- and electroluminescence from Er³⁺ in erbium silicate. *J Phys-Condens Matter*, 2009, 21: 012204
- 32 Wang B, Guo R M, Wang X J, et al. Near-infrared electroluminescence in ErYb silicate based light-emitting device. *Opt Mater*, 2012, 34: 1371–1374
- 33 Nykolak G, Haner M, Becker P C, et al. Systems evaluation of an Er³⁺-doped planar waveguide amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, 5: 1185–1187
- 34 Wang X J, Nakajima T, Isshiki H, et al. Fabrication and characterization of Er silicates on SiO₂/Si substrates. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 041906
- 35 Strohhofer C, Polman A. Silver as a sensitizer for erbium. *Appl Phys Lett*, 2002, 81: 1414–1416
- 36 Strohhofer C, Kik P G, Polman A. Selective modification of the Er³⁺I_{11/2} branching ratio by energy transfer to Eu³⁺. *J Appl Phys*, 2000, 88: 4486–4490
- 37 van den Hoven G N, Snoeks E, Polman A, et al. Photoluminescence characterization of Er-implanted Al₂O₃ films. *Appl Phys Lett*, 1993, 62: 3065–3067
- 38 Han H S, Seo S Y, Shin J H, et al. Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon-rich silicon oxide waveguide amplifier. *Appl Phys Lett*, 2002, 81: 3720–3722

- 39 Isshiki H, de Dood M J A, Polman A, et al. Self-assembled infrared-luminescent Er-Si-O crystallites on silicon. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 4343–4345
- 40 Wang X J, Wang B, Wang L, et al. Extraordinary infrared photoluminescence efficiency of $\text{Er}_{0.1}\text{Yb}_{1.9}\text{SiO}_5$ films on SiO_2/Si substrates. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 071903
- 41 Guo R, Wang X, Zang K, et al. Optical amplification in Er/Yb silicate strip loaded waveguide. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 161115
- 42 Guo R, Wang B, Wang X, et al. Optical amplification in Er/Yb silicate slot waveguide. *Opt Lett*, 2012, 37: 1427
- 43 Wang L, Guo R M, Wang B, et al. Hybrid silicate waveguides for amplifier application. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24: 900–902
- 44 Wang X, Zhuang X, Yang S, et al. High gain submicrometer optical amplifier at near-infrared communication band. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 027403
- 45 Shu H W, Su Z T, Wang X J, et al. Recent progress of silicon photonics for middle-infrared application (in Chinese). *Telecommun Sci*, 2015, 31: 2015274 [舒浩文, 苏昭棠, 王兴军, 等. 面向中红外应用的硅基光电子学最近研究进展. *电信科学*, 2015, 31: 2015274]
- 46 Ye R, Xu C, Wang X, et al. Room-temperature near-infrared up-conversion lasing in single-crystal Er-Y chloride silicate nanowires. *Sci Rep*, 2016, 6: 34407
- 47 Liu J, Sun X, Pan D, et al. Tensile-strained, n-type Ge as a gain medium for monolithic laser integration on Si. *Opt Express*, 2007, 15: 11272–11277
- 48 Liu J, Sun X, Camacho-Aguilera R, et al. Ge-on-Si laser operating at room temperature. *Opt Lett*, 2010, 35: 679–681
- 49 Claps R, Dimitropoulos D, Raghunathan V, et al. Observation of stimulated Raman amplification in silicon waveguides. *Opt Express*, 2003, 11: 1731–1739
- 50 Eichhorn M, Pollnau M. Spectroscopic Foundations of Lasers: Spontaneous Emission Into a Resonator Mode. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2015, 21: 486–501
- 51 Patel F D, Dicarolis S, Lum P, et al. A compact high-performance optical waveguide amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16: 2607–2609
- 52 Pollnau M. Rare-earth-ion-doped waveguide lasers on a silicon chip. In: *Proceedings of SPIE 9359, Optical Components and Materials XII*. San Francisco: SPIE, 2015. 935910
- 53 Bradley J D B, Costa e Silva M, Gay M, et al. 170 Gbit/s transmission in an erbium-doped waveguide amplifier on silicon. *Opt Express*, 2009, 17: 22201–22208
- 54 Zhou X, Yu J J, Huang M F, et al. Transmission of 32-Tb/s capacity over 580 km using RZ-shaped PDM-8QAM modulation format and cascaded multimodulus blind equalization algorithm. *J Lightw Tech*, 2010, 28: 456–465
- 55 Soulard R, Zinoviev A, Doualan J L, et al. Detailed characterization of pump-induced refractive index changes observed in Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ and Nd:KGW. *Opt Express*, 2010, 18: 1553–1568
- 56 Blaize S, Bastard L, Cassagnetes C, et al. Multiwavelengths DFB waveguide laser arrays in Yb-Er codoped phosphate glass substrate. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15: 516–518
- 57 Seufert J, Fischer M, Legge M, et al. DFB laser diodes in the wavelength range from 760 nm to 2.5 μm . *Spectrochim Acta Part A-Mol Biomol Spectr*, 2004, 60: 3243–3247

The latest research development of silicon based integrated optical waveguide amplifier

CHEN ZiPing, SHU HaoWen & WANG XingJun^{*}

State Key Laboratory of Advanced Optical Communications System and Networks, Peking University, Beijing 100871, China

In the process of informatization, the Moore's Law is getting closer to the limit. Combining microelectronics and optoelectronics to develop silicon-based large-scale integrated optoelectronic technology has become the industry consensus. It is also the inevitable direction of technology development. In recent years, silicon photonics has made great progress, many key devices have reached the commercial standard, and some of the performance is even higher than the current commercial device performance. In silicon based optoelectronic integrated devices, silicon based light source is the most important but has not yet been completely resolved. Although silicon is an indirect band gap semiconductor material and luminous efficiency is very low, people have not given up efforts to prepare silicon based light source. Silicon based light sources include silicon based optical waveguide amplifiers, light emitting diodes, lasers, etc., of which silicon based optical waveguide amplifier is the basis for lasers and the indispensable device in a silicon based optoelectronic integrated circuit. If the optical waveguide amplifier has a high net gain, optically pumped lasers can be obtained by designing the appropriate resonant cavities at both ends of the optical waveguide amplifier. In this paper, we focus on silicon based optical waveguide amplifier, introducing the two main research directions of silicon based waveguide amplifier, silicon based hybrid integrated III-V semiconductor optical waveguide amplifier and silicon based rare earth ion doped optical waveguide amplifier. This paper discusses the principle, preparation method and development process of these two research directions in detail respectively, and lists relevant typical research results. And we briefly introduce other optical amplification technology. Finally, summary and prospect are given.

silicon photonics, silicon based integrated optical waveguide amplifier, III-V semiconductor optical amplifier, rare earth ion doped optical waveguide amplifier

PACS: 42.82.-m, 85.60.Jb, 42.60.Da

doi: [10.1360/SSPMA2017-00001](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00001)