

半导体前置光放大器的设计和制作要点

Essentials in Design and Fabrication of Semiconductor Optical Pre-Amplifier

李洵/LI Xun^{1,2}

左成亮/ZUO Chengliang³

董智星/DONG Zhixing³

(1. 山东大学, 山东 济南 250100;

2. 麦克马斯特大学, 加拿大 汉密尔顿 L8R4K1;

3. 华中科技大学武汉光电国家实验室武汉

光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

(1. Shandong University, Jinan 250100,

China;

2. McMaster University, Hamilton L8R4K1,

Canada;

3. Wuhan National Laboratory for

Optoelectronics of Huazhong University of

Science and Technology, Wuhan 430074,

China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0015-006

摘要: 介绍了用于接收端探测器前置放大的半导体光放大器的核心设计要点及其与普通半导体激光器在实际制作中的几个不同点。半导体前置光放大器的设计核心是如何抑制其中的自发辐射并被伴随放大的噪声, 对于边入射型的器件还要考虑其增益偏振相关性的消除。半导体光放大器一般具有少阱和低光场限制因子的长增益区结构, 在这点上它与高速直调半导体激光器有着最大的区别。

关键词: 半导体光放大器; 接收端前置放大; ASE 噪声; 增益偏振相关性; 增益-带宽积; 饱和功率

Abstract: This paper has its focus on the essential design consideration of semiconductor optical amplifiers for optical signal pre-amplification in optical receivers. It also briefs some differences from semiconductor laser diodes in their fabrications. In considering the design of pre-amplifiers, the amplified spontaneous emission (ASE) noise needs to be suppressed and their gain polarization dependence (in edge incidence device only) needs to be eliminated. Semiconductor optical amplifiers also have longer active regions with fewer quantum wells and lower optical confinement factors, which makes them different from directly modulated semiconductor laser diodes.

Keywords: semiconductor optical amplifier; receiver pre-amplifier; ASE noise; gain polarization correlation; gain bandwidth product; saturation power

半导体光放大器(SOA)的主要作用是对光信号功率进行直接线性放大, 利用其增益饱和所产生的稳态及动态非线性效应, SOA 还可被用于实现某些非线性功能, 例如: 在光转发器中把某一波长上的光信号直接复制到另一波长上, 在基于波分复用无源光网络的光纤接入网中、在用户光网络单元中对光信号进行擦除或功率均衡, 或在全光网络中对不同波长光信号进行直接转换或逻辑处理, 或对光信号的消光比进行直接提升等等。

在线性放大应用中, 对 SOA 的具体要求包括高增益、高饱和功率(即能确保线性放大的最高输出功率)、低噪声指数(输入信号信噪比与输出信号信噪比之比)、低增益偏振相关性, 及宽增益谱等。这类应用具体又可区分为发射端光源后置放大, 即

使用 SOA 对激光器输出的光信号进行放大以提高其入纤功率; 在线放大, 即使用 SOA 对光纤中在线传输的光波信号进行直接放大; 接收端探测器前置放大, 即使用 SOA 对到达接收端的光波信号先进行放大再通过探测器进行光电转换。

发射端光源后置放大主要需要高增益和高饱和功率, 当用于可调谐激光器或多波长激光器阵列合波后的后置放大时, 还要求宽增益谱。由于刚由激光器产生的光波信号具有很高的信噪比, 激光器的输出光又具有确定的偏振方向, 所以对用于后置放大的放大器噪声指数及增益偏振相关性要求不高。

在线放大对放大器的特性要求

最全面也最高, 除需要高增益和高饱和功率之外, 还需要考虑如何降低放大器自发辐射噪声(ASE)和如何实现增益的低偏振相关性。事实上, 前述所有对于线性放大的一般要求在在线放大应用中都需要达到。

接收端探测器前置放大需要在一定的增益下具有极低的噪声指数以及低增益偏振相关性, 由于接收端的人射功率很低, 所以对饱和功率要求不高。

由于某些指标对(例如: 宽增益谱与低噪声指数)与 SOA 设计参数之间的依赖关系是互相矛盾的。所以, 一般 SOA 的设计制作只能针对特定的具体需求在不同特性指标上有所突出和舍弃。文章中, 我们将主要分

收稿日期: 2018-07-10

网络出版日期: 2018-08-06

析与讨论用于接收端探测器前置放大的 SOA 设计与制作要点^[1-2]。

1 接收端前置放大器的设计要点

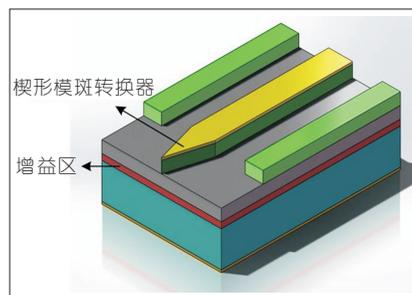
普通的 PIN 光电二极管光电探测器只能完成光电转换而没有增益,所以灵敏度有限;而雪崩光电二极管(APD)实质上是一个 PIN(光电转换)加电放大。尽管其灵敏度较高,但因电放大过程受载流子渡越时间限制,带宽一般难以达到 50 GHz 以上。如果我们把上述过程转变为光放大加 PIN(光电转换),则在保持高灵敏度的同时还可以解决带宽受限问题,因 SOA 的基带宽度可远远大于 50 GHz。理论上行波型 SOA 中的入射光波仅单程穿越增益区,所以对信号的基带带宽没有限制。此时,穿越增益区波导所花费的时间仅引起延迟,其效果与在普通波导例如光纤中传输是一样的,只是光信号的幅度被放大而已。谐振型 SOA 的入射光会在增益区中往复折返传输,所以其信号基带宽度受到光波信号穿越增益区所需要的时间限制,但即使增益区的长度达到 1 mm,光波信号的穿越时间也不到 10 ps,所以一般 SOA 的基带宽度达到 100 GHz 是容易做到的。这样采用 SOA 做前置放大加 PIN 的方案在增益-带宽积上是可以大大优于 APD 的。但是相比于 APD,SOA 的 ASE 噪声会对灵敏度带来严重影响,所以可用于接收端前置放大的 SOA 需要解决的首要问题是如何有效地抑制其 ASE 噪声。

其次,对于面入射型的 PIN,SOA 与之集成的最简便方式是也采用垂直腔面入射式的结构。这种方式结构简单,又能通过一次外延生长制备,还具有便于二维阵列集成等优点。它的一个显著优点是由于其波导的圆对称性,只要使得材料增益支持平面内的偏振,则整个器件的增益就不存在偏振相关性。但这种器件的一个突出缺点是其增益区受外延

层厚度限制而无法做长,于是整个 SOA 的单程增益过低。为了等效延展增益区长度,必须设计反射 Bragg 光栅形成谐振光腔,以使入射光波信号在被置于谐振腔内的增益区往复折返。但这样做的代价是损失了增益谱带宽,从而导致面入射型的 SOA-PIN 的增益带宽积一般只能做到在 100 dB-nm 左右。为了突破对增益-带宽的这一限制,有必要采用边入射型的(即传统的)SOA 结构,它的增益区长度可以不受限制,但一个必须要解决的问题就是要消除器件增益的偏振相关性^[3-5]。

1.1 对 ASE 噪声的抑制

前文已经说明为了尽量降低对放大后的光波信号的信噪比劣化,在 SOA 设计中首先要考虑的是如何使输入耦合损耗降至最低,以保证入射信号功率不受损失。减小耦合损耗的一般方法是在波导的输入(或同时在输出)端口设计一个集成的模斑变换器,从而扩大波导在端口的模斑,使其与光纤的模斑尽量匹配。需要注意的是:这个模斑变换器需要有注入也同时提供增益,或者是透明的,而不能对入射信号光波有吸收,否则同样劣化信噪比,失去了模斑变换的意义。一个典型的带有楔形模斑变换器设计的 SOA 如图 1 所示。尽管这种变换器设计和制作简单,但只对展宽截面光场的横向分布比较有效,对更为严重的也是耦合损耗主要来源的纵向分布展宽作用微小。为了解决这一问题,可以在增益区之下引

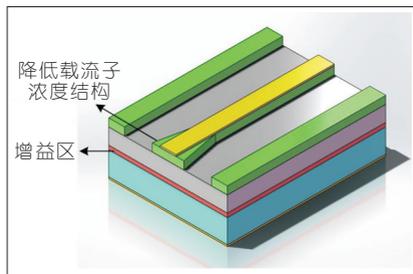


▲ 图 1 输入端口集成有楔形模斑变换器的半导体光放大器

入第二波导,并利用楔形区通过逐渐减弱脊条对光场的限制使得光场逐渐下移,直至其部分耦合至第二波导,这样整个纵向光场分布将被增益波导和下埋第二波导的共同作用所展宽,从而有效地解决耦合问题。这种变换器的设计和制作我们正在进之中,更详细的讨论已超出了本文的范围。

降低放大器的 ASE 噪声需要降低增益区内的载流子浓度,由于随机的自发辐射正比于高能级上(即导带内)的电子占有率,所以高(反转)载流子浓度必然导致高 ASE 噪声。降低载流子浓度自然是与追求高增益及高饱和功率相矛盾的,但考虑到 ASE 噪声的贡献主要来自于临近输入端口的放大器前段,所以可以考虑采用沿波导的非均匀增益区结构或非均匀注入在维持增益的同时抑制 ASE 噪声。由于垂直方向的结构是依靠外延技术逐层生长的,尽管有选择区域外延生长技术(SAG)可以在局部连续或突变性地改变生长平面内的薄层厚度,但在垂直方向上引入容易控制的层厚渐变结构仍然是很不方便的。一般方便采用的只有在水平方向上引入喇叭形结构以增加入射端口的波导宽度,这样在同样的注入条件下由于入射端口附近的增益区体积增大^[6],载流子浓度必然降低。特别需要我们注意的是:为保持注入电流的一致,电极条形必须仍然是均匀的,否则由于同一电极上的电压一致,电极的宽窄只会影响到注入电流而不会改变电极下的电流密度。以脊波导为例,这样的结构示意图如图 2。

降低 ASE 噪声的再一个可能途径是使自发辐射的光场尽量不被耦合到波导之中,这就要求波导具有尽可能低的数值孔径。由于低数值孔径与低光场限制因子的波导设计要求实质上是一致的,所以无须再采取附加措施。只是低数值孔径的波导不利于入射光场的耦合,所以在入射



▲图2 输入端口集成有降低载流子浓度结构的半导体光放大器

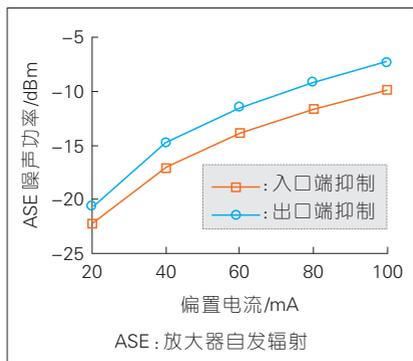
端口尤其需要采取上述提到的特别措施。由于在入射端口附近特别需要抑制自发辐射,而模斑变换器的设计必然会增大波导数值孔径,从而使自发辐射光场更容易地被耦合到波导之中。这样看来:理想的集成模斑变换器设计最好是采用无需注入的对入射光波长透明的宽带隙半导体的材料,这样就可以避免在此段具有较高数值孔径的波导内产生自发辐射^[7]。

为了确认上述对噪声抑制的主要分析结果,这里再进一步展示一些仿真计算的对比结果。在输入端口附近和在输出端口附近抑制自发辐射的不同效果对比如图3所示。

在同一注入但不同增益区体积下(从而载流子浓度不同)SOA的ASE噪声功率如图4所示。

在不同注入但相同增益区体积下(从而载流子浓度也不同)SOA的ASE噪声功率如图5所示。

由于载流子浓度相同但光场限制因子不同(即数值孔径不同),从而



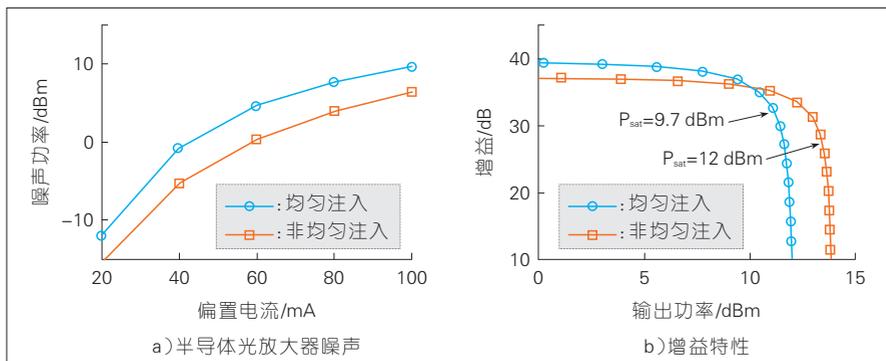
▲图3 在输入端口附近和在输出端口附近抑制自发辐射的差异

导致波导捕捉自发辐射光场的能力有所不同,SOA的ASE噪声功率如图6所示。

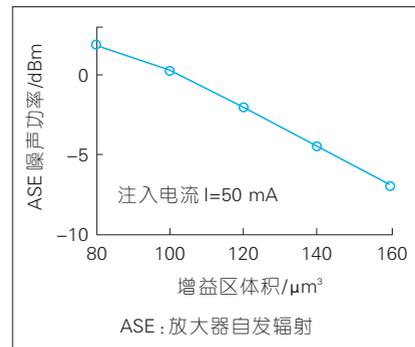
显然,所有的这些仿真计算的结果与我们之前的分析是完全一致的。

尽管提高增益和饱和功率及抑制噪声对波导的设计要求是一致的,但其对增益区内的载流子浓度的要求却是相反的,这意味着提高增益和饱和功率及抑制噪声对于电流注入的要求是相矛盾的。由于抑制ASE噪声需要在输入端口附近施行,而由于沿途放大的作用,靠近输出端口的增益区波导内光功率显然更高。这样在输出端口附近的增益更容易饱和,于是提高饱和功率需要在输出端口附近施行。很显然,如果我们使得注入电流沿增益区波导长度方向呈非均匀分布,注入电流密度在输入端口处最低,而后沿波导往输出端口方向逐渐增高,这样就可以使增益区内的载流子浓度在输入端口附近较低,而在输出端口附近较高,于是可以同时满足抑制噪声和提高饱和功率的要求。这样设计的器件与普通均匀注入器件特性的对比如图7所示,采用非均匀注入后对ASE噪声的抑制以及对饱和功率的提高作用是十分明显的^[8]。

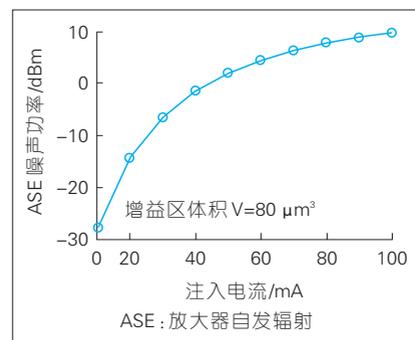
利用噪声的非相干性,还可以考虑在频域上或空域上滤除ASE噪声。例如:可以考虑在放大器后集成为一个光频段的窄带通滤波器,利用滤波器的选频特性可以滤除通带外



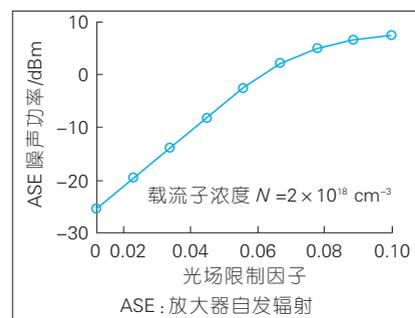
▲图7 非均匀注入(电流密度由输入往输出端口方向逐渐增加)与均匀注入的半导体光放大器噪声与增益特性对比



▲图4 相同注入不同增益区体积下半导体光放大器的ASE噪声功率



▲图5 相同增益区体积不同注入下半导体光放大器的ASE噪声功率



▲图6 相同载流子浓度不同光场限制因子下半导体光放大器的ASE噪声功率

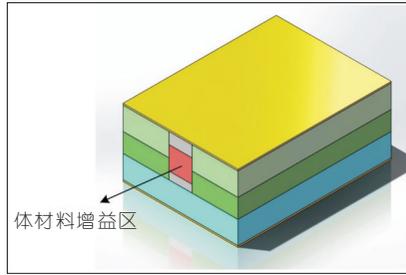
的 ASE 噪声,而通带内的光波信号是不受影响的。实现这种方案的一个方便途径是在波导的输出端面蒸镀具有带通特性的膜系,使得通带外的 ASE 噪声被阻挡而无法输出。空域上噪声滤除的方式可以采用干涉的方法,即利用光波信号的相干性设计基于波导的干涉装置(例如:波导光栅),受干涉的影响,光波信号被集中在输出端口,而不受干涉影响的 ASE 噪声却无法集中在空间的某个特别之处,这样就可以在空间上适度分离光波信号和噪声,使得 ASE 噪声被部分滤除。

1.2 增益偏振相关性的消除

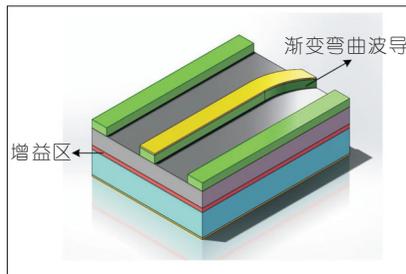
针对如何降低 SOA 的增益偏振相关度或彻底消除其增益偏振相关性已有了大量的工作报告,其方案主要有以下 3 类:

(1) 消除材料增益的偏振相关性并采用对称波导设计,例如:使用体材料增益区结合基本呈正方形截面的掩埋结构,如图 8 所示。

(2) 使材料增益与波导非对称各自引起的偏振相关性相消,例如:脊波导结构与横磁波 (TE) 偏振一般有着更大的光场限制因子,所以需要材料增益区对增益区材料施以一定的张应变。由于张应变材料对于横电波 (TM) 偏振的增益贡献更大,所以一旦做到对 TE 和 TM 2 个偏振的模式增益(即光场限制因子与材料增益之积)一致,则因 $e^{\Gamma_{TE}gL} = e^{\Gamma_{TM}gL}$, 所以整个器件增益的偏振相关性即可被消除。值得注意的是:完美的补偿实际上是很难实现的,所以采用这种方案一般需要结合在平面内渐变弯曲波导的方法对不同偏振进行二次补偿,如图 9 所示。这种补偿的原理为:平面内弯曲波导会使得水平偏振光产生辐射泄漏,而垂直偏振光所受到的影响则很小。考虑到自由空间中的平面波在波的传播方向上不会有电磁偏振这一基本效应,我们就不难理解产生这一效应的原因。事实上,一旦波导在



▲ 图 8 具有正方形体材料增益区的掩埋异质结半导体光放大器



▲ 图 9 具有渐变弯曲波导用以调整增益偏振相关度的半导体光放大器

平面内产生弯曲,则导波的传输必然开始偏向水平偏振的方向,但是偏振方向不可能与传播方向一致(尽管这里波导中的导波不是自由空间平面波,这一结论还是近似成立的),所以水平偏振的导波必然会随着波导弯曲程度的加大而逐渐截止传播,并转化为辐射波泄漏。垂直偏振的导波其偏振方向始终是与波导方向垂直的,所以受波导弯曲的影响相对比较小。

(3) 采用集总补偿,即使入射光波先直接经历一次放大,还需再使其偏振态旋转 90° (或增益波导旋转 90°) 后再经历一次相同的放大。这样即使入射光的偏振与水平方向有任意不确定的夹角 θ ,其所经历的增益为:

$$\begin{aligned} & \cos^2\theta(e^{\Gamma_{TE}gL}) + \sin^2\theta(e^{\Gamma_{TM}gL}) + \\ & \sin^2\theta(e^{\Gamma_{TE}gL}) + \cos^2\theta(e^{\Gamma_{TM}gL}) = \\ & (e^{\Gamma_{TE}gL}) + (e^{\Gamma_{TM}gL}) \end{aligned} \quad (1)$$

该增益与入射角无关。基于同样的想法,我们还可以设计一个波导式线偏-圆偏转换器,圆偏光被均匀材料反射后再经历同一结构反向传

输后会被扭转 90° 。利用这一特性容易得到反射式的增益偏振无关放大器。因为入射光在经过同一段增益区的往返程上偏振态正好相差 90° ,所以正好同样满足上述条件。这一器件的结构示意如图 10。类似的方法还有把增益区波导同时设计成一个针对任意入射角的 180° 旋偏器,如图 11 所示,在这样的器件中入射光所经历的增益是:

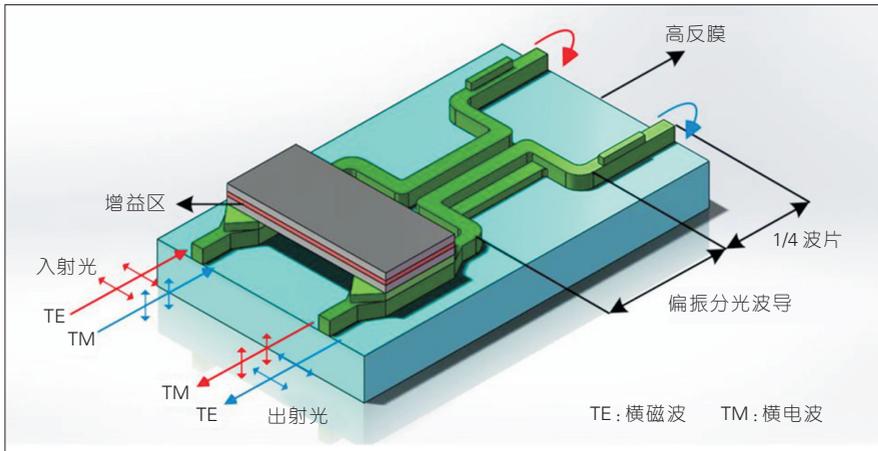
$$\int_0^\pi [\cos^2\theta(e^{\Gamma_{TE}gL}) + \sin^2\theta(e^{\Gamma_{TM}gL})] d\theta = \pi[(e^{\Gamma_{TE}gL}) + (e^{\Gamma_{TM}gL})] \quad (2)$$

该增益仍然与入射角无关。

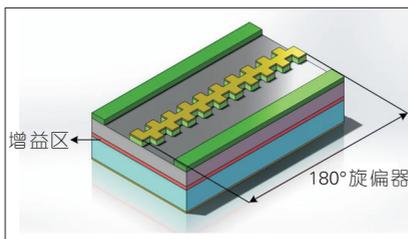
2 接收端前置放大器的基本制作工艺要点

前面的讨论集中在用于接收端前置放大时对 SOA 设计的一些特殊设计的考虑上;但这些特殊考虑是建立在通用 SOA 的基本设计和现行制作工艺基础之上的,不首先了解通用 SOA 的设计制作要点则任何特殊考虑都无从谈起。受篇幅限制,之后的讨论将假设读者已熟知普通半导体激光器的制作工艺。

对普通 SOA 的基本要求是高增益和高饱和功率,为达此目的,我们显然希望使 SOA 的增益区内积存有较高的载流子浓度。由于增益与载流子浓度成正比,所以高载流子浓度导致高增益,这一点直观上也很容易理解。由于放大饱和是增益区内载流子被耗尽所致,所以高饱和功率一样也要求增益区内保持有较高的载流子浓度。为了在给定的注入下保持高载流子浓度,最有效的方法显然是尽可能缩减增益区截面积。由于波导的条宽受光纤耦合及制作工艺限制难以进一步压缩,那么剩下的方法就只有缩减体材料增益区的厚度或量子阱增益区内量子阱的个数和每个阱的厚度。一般 SOA 的增益区都是采用单阱或双阱结构(双阱主要是为了防止太多的光波横向场分布



▲图10 增益与偏振无关的半导体光放大器 I



▲图11 增益与偏振无关的半导体光放大器 II

在增益区之外的P型掺杂层,因为对光波的非带间吸收主要来自于P型掺杂所造成的自由载流子吸收),在这点上SOA与半导体激光器(尤其是高速直调半导体激光器)有着显著的区别。

当增益区的载流子浓度已无法再提高时,还可以通过调整光波导的设计,即利用横向光场与载流子分别限制促使光波的横向场分布与增益区有着尽可能小的重叠,这样才能使得沿波导每个截面上的载流子尽可能不被入射光波光子耗尽,从而提升饱和功率。当然,这样做的结果会导致单位长度上的增益减小。为了使需求的增益得以满足,一般可以再延长增益区的长度。事实上,决定放大器增益的基本量是 $e^{\Gamma L}$,所以当材料增益 g 一定时,为增加饱和功率而需要减小的光场限制因子 Γ 可以靠延长增益区长度 L 补偿,从而确保放大器增益不变。在这点上SOA与半导体激光器也有着显著的区别,而且小光

场因子的要求也是与直觉相违背的。

除了在增益区结构上有着上述的基本不同点之外,SOA的制作工艺与一般的半导体激光器没有太多区别,同样工作波长的波段也采用同一体系的材料。由于更多地采用了薄增益层设计,甚至有可能需要在增益区中再插入生长薄到只有1~2个单原子层的所谓 δ 势垒层,以便通过单独调控子价带(重空穴带)来平衡增益区的TE和TM材料增益,所以对于SOA结构的外延生长使用分子束外延(MBE)设备与使用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备一样流行。在MBE中还可以使用Be替代Zn作为受主杂质进行P区掺杂,这样就可以避免因Zn容易扩散而产生PN结移位;而在MOCVD中由于其毒性问题一般不能使用Be源。特别值得注意的是:由于光放大器的增益区需要采用低光场限制因子设计,光场在增益区外的延伸更为显著,从而与P型掺杂区域的重叠也更为严重。由于光场在增益区外呈指数式衰减,我们于是将P型掺杂区的浓度设计成由增益区向外呈指数式上升,这样可以保证在一定的P型掺杂浓度下光场与P型掺杂区的重叠程度最小,PN结也不至于偏位。

除外延之外,半导体光放大器的制作工艺还主要涉及到氧化物沉积(通过PECVD或ALD等设备进行)、

普通光刻、干法刻蚀(通过ICP-RIE或CAIBE等设备进行)或湿法刻蚀、金属沉积(通过溅射或电子束蒸发),以及端面镀膜(通过电子束蒸发)等,但这些工艺在一般意义上与制作半导体激光器没有什么不同,所以这里不再进行深入讨论。只是需要注意光放大器对与端面镀膜,尤其是增透膜的要求远远高于激光器。为获取宽带低反射的增透膜,一般除了需要采用多层膜系设计外,对电子束蒸镀过程的精确控制分外重要。一般而言,采用带有电子回旋共振(ECR)系统的设备比普通设备更有利,采用晶振(宽带)和光学干涉(单波长高精度)双重监测控制比单一监测控制更有利。

优良器件的获得离不开理论设计与制作工艺的密切配合,光放大器中端面反射问题的消除恰是一个典型的例证。在镀膜工艺的精度达到极限之后,进一步降低端面反射的要点在于如何对端口(主要是输出口)进行散斑设计,使得在端口处的截面光场分布尽量均匀,即使得出射光波尽量接近TEM波(或局域化的平面波,注意介质波导中真正的TEM波是不可能存在的)。由于TEM波的传播方向单一并垂直于截面,理论上容易证明此时的膜系设计可以使得反射最低。很明显,由于此时的反射方向也单一,所以只要稍许倾斜输出端口的波导,即可使得仅有的反射也难以重新耦合进入波导造成真正意义上的反射。这种散斑设计总体上的要求与扩束模斑增进与光纤的耦合以及低光场限制因子波导设计都是一致的,只是要求截面上的束(模)斑内部场分布更加均匀。

在SOA的实际应用中还经常要求有较宽的增益谱,所以需要采取措施尽可能地展宽材料增益谱。工艺上的措施包括加大量子阱的应变变量,或采用厚度略有不同的多个阱构造增益区,这样将造成材料增益峰的直接展宽,或各个阱增益峰的错位,在

2个措施共用的情况下效果更为显著。例如:使用1.5%的压应变和3个厚度分别为4 nm、5 nm和6 nm的量子阱增益区结构可以获得100 nm的材料增益峰半高全宽(FWHM),而通过压应变为1%及厚度为5 nm的单阱常规增益区设计只能获得60 nm的材料增益峰半高全宽。

3 结束语

作为一个重要的功能性器件,光放大器既可在其线性区被用于光信号的直接线性放大,又可在其饱和区被用于实现某些特定的非线性功能。半导体光放大器自然继承了半导体器件的所有优点,其发展前景是不言而喻的。但仅就接收端探测器前置放大要求而言,半导体光放大器的噪声指数仍有下降的空间,其增益-带宽积也有上升的空间。另一个需要重要考虑点是其增益的偏振相关度,面入射型器件没有增益的偏振相关性问题,但是增益-带宽积受限(100 dB-nm)。边入射型器件的增益-带宽积理论上可以拓展1 000倍(3 000 dB-nm),但其增益的偏振相关性需要靠特殊的设计措施消除。在制作上半导体光放大器与半导体激光器的主要区别在于前者需要有

少阱及低光场限制因子的长增益区,而后者正相反。

参考文献

- [1] PARK J, LI X, HUANG W P. Comparative Study of Mixed Frequency-Time-Domain Models of Semiconductor Laser Optical Amplifiers[J]. IEE Proceedings - Optoelectronics, 2005, 152(3):151-159. DOI: 10.1049/ip-opt:20045034
- [2] BOUCHER Y, SHARAIHA A. Spectral Properties of Amplified Spontaneous Emission in Semiconductor Optical Amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(6):708-720. DOI: 10.1109/3.845728
- [3] XIA Y, YU Y, WANG K, et al. A Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier Monolithically Integrated with the Photodetector[C]//Asia Communications and Photonics Conference. China: OSA, 2016
- [4] DUAN X, HUANG Y, SHANG Y, et al. High-Efficiency Dual-Absorption InGaAs/InP Photodetector Incorporating GaAs/AlGaAs Bragg Reflectors [J]. Optics Letters, 2014, 39(8):2447-2450. DOI: 10.1364/OL.39.002447
- [5] HUANG Z, LI C, LIANG D, et al. 25 Gbps Low-Voltage Waveguide Si-Ge Avalanche Photodiode[J]. Optic Letters, 2016, 3(8):793-798. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000793
- [6] ZHU Z, LI X, XI Y. A Polarization Insensitive Semiconductor Optical Amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17): 1831-1834. DOI: 10.1109/LPT.2016.2573291
- [7] WANG T, LI X, MU J W, et al. Electro-Optic Controllable Transverse Electric/Transverse Magnetic Polarization Converter based on the GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N Superlattice Waveguide [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, B(35): 1888-1895

- [8] 朱仲书. 基于波导的抗反射结构及其在偏振无关半导体光放大器中的应用[D]. 华中科技大学, 2016

作者简介



李洵, 加拿大麦克马斯特大学电子与计算机工程系教授、山东大学兼职教授; 长期从事III-V族化合物半导体激光器及其他有源和无源集成光子和光电子器件的设计、仿真、研制、测试和封装等工作, 曾经为包括 Intel、NTT、前 Nortel 等在内的 20 多个全球著名企业提供过专业技术咨询服务, 作为 Apollo Photonics 的创始人之一, 早在 1998 年主持开发了一直沿用至今的半导体激光器商用仿真软件 ALDS; 多次获得各种奖励; 曾主持过多个重大项目; 发表论文 230 余篇, 报告 110 余篇, 获得授权美国专利 5 个, 授权中国专利 12 个。



左成亮, 华中科技大学武汉光电国家实验室武汉光电国家研究中心在读博士研究生; 主要研究方向为半导体光放大器的设计、仿真和测试, 以及其在波分复用无源光网络中的应用; 发表论文 3 篇。



董智星, 华中科技大学武汉光电国家实验室武汉光电国家研究中心在读硕士研究生; 主要研究方向为垂直腔半导体光放大器和 PIN 探测器的仿真和测试; 发表论文 1 篇。