

一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导半导体激光器的研制

邱橙 陈泳屹 高峰 秦莉 王立军

Design of a multimode interference waveguide semiconductor laser combining gain coupled distributed feedback grating

Qiu Cheng Chen Yong-Yi Gao Feng Qin Li Wang Li-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 164204 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190744

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190744>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于液晶/聚合物光栅的高转化效率有机半导体激光器

Enhancement of conversion efficiency for an organic semiconductor laser based on a holographic polymer dispersed liquid crystal
物理学报. 2017, 66(24): 244204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244204>

反馈强度对外腔反馈半导体激光器混沌熵源生成的随机数序列性能的影响

Influence of feedback strength on the characteristics of the random number sequence extracted from an external-cavity feedback semiconductor laser
物理学报. 2015, 64(8): 084204 <https://doi.org/10.7498/aps.64.084204>

线宽增强因子对光反馈半导体激光器混沌信号生成随机数性能的影响

Influence of the linewidth enhancement factor on the characteristics of the random number extracted from the optical feedback semiconductor laser
物理学报. 2017, 66(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.124203>

高斯切趾型光纤布拉格光栅外腔半导体激光器的混沌输出特性

Characteristics of chaotic output from a Gaussian apodized fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser
物理学报. 2017, 66(24): 244207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244207>

利用光反馈多模激光器结合滤波器产生平坦混沌

Flat chaos generated by optical feedback multi-mode laser with filter
物理学报. 2019, 68(11): 110501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190171>

半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽

Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser
物理学报. 2018, 67(14): 140501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180035>

一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导 半导体激光器的研制*

邱橙^{1)2)†} 陈泳屹¹⁾²⁾ 高峰¹⁾²⁾ 秦莉¹⁾²⁾ 王立军¹⁾²⁾

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 发光学国家重点实验室, 长春 130010)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2019年5月17日收到; 2019年5月29日收到修改稿)

半导体激光器是现代通讯领域的核心器件. 研究和开发具有高稳定性、高功率、高光束质量、窄线宽的单模半导体激光器是目前半导体激光器研究领域的一个重要的研究方向. 本文在窄脊型边发射半导体激光器的结构基础上, 提出并研制了一种在 980 nm 波段附近的利用有源多模干涉波导结构作为激光器的主要增益区, 利用增益耦合式分布反馈光栅对激光器的纵向模式进行调制的新型边发射半导体激光器芯片结构. 通过对比实验可以看出, 这种激光器相较于一般的分布反馈式半导体激光器, 其具有更高的斜率效率和输出功率; 而相较于一般的多模干涉波导激光器, 这种激光器具有更高的光束质量和更好的稳定性. 同时, 由于在芯片设计和制造过程中采用了表面刻蚀形成的高阶分布反馈光栅, 这种激光芯片的制造无需二次外延, 只需要微米量级精度的 i 线光刻即可实现, 是一种制备工艺较为简单、制造成本较低、利于商用量产的芯片结构.

关键词: 分布反馈光栅, 有源多模干涉波导, 边发射半导体激光器

PACS: 42.55.Wd, 42.82.Bq, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.68.20190744

1 引言

单纵模的边发射半导体激光器被广泛地应用于碱基原子钟和光纤激光器的泵浦激光光源^[1]、精确的气体探测和谱分析^[2]、相干光探测和激光雷达^[3,4]、集成光子学^[5-8]等诸多领域. 为了实现激光器的单纵模输出, 通常会在芯片上加入光栅一类的模式选择结构. 采用分布反馈式光栅 (distributed feedback grating, DFB) 的半导体激光器是这类激光器中较为成熟和主流的一类. 窄线宽的可调谐单纵模 DFB 半导体激光器不但可以满足工作波长的浮动调制需求, 还可以提高激光探测的效率. 因此, 这种激光器在可调制的激光雷达^[9]、三维感知、智能驾驶和微分吸收式激光雷达 (通过探测特定气体的

吸收谱线实现距离探测)^[10]等领域都有非常大的应用潜力. 采用分离电极构建的多段式折射率耦合型 DFB 激光器可以有效地增加激光器的波长调制范围^[11-15], 但是需要对注入电流进行复杂而精确的控制^[16], 致使激光器很难长时间维持在一个稳定的工作状态. 同时, 激光器波长的稳定性同样也是 DFB 激光器的一项重要参数. 泵浦掺铒激光放大器 (EDFA) 和激光陀螺仪都需要泵浦光源的波长非常稳定^[17]. 热集聚和电流变化都会引起常规的 DFB 半导体激光器产生明显的波长漂移^[18,19], 并因此严重的影响光泵浦的效率.

另一方面, 利用有源多模干涉波导结构 (multimode interference, MMI) 作为激光器的增益区, 相较于传统的窄条型半导体激光器, 其输出功率和电光转换效率更高^[20-22]. 但是多模干涉波

* 国家自然科学基金 (批准号: 51672264, 11874353, 61727822, 61674148) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiucheng_hahaha@163.com

导增益区域的工作状态受温度变化影响明显. 随着注入电流的不断增大, 激光器中的非辐射复合和电流在整个器件结构中产生的焦耳热也在不断上升, 当电流达到一定数值之后, 半导体激光器的散热系统无法将器件的工作温度稳定在一个恒定的水平, 在这种情况下激光器的工作温度会不断上升, 激光器的波导的折射率会随温度上升而变化, 当有效折射率发生变化之后, 激光器激射的中心波长和光学模式都可能因此而发生改变, 尤其对于 MMI, 折射率变化对于自镜像点的位置有较为明显的影响^[20], 而不准确的自镜像点又会显著地降低多模干涉波导激光器的输出功率和转化效率.

为了提高 DFB 激光器的输出功率, 抑制 MMI 激光器的温度漂移和跳摸现象, 本文提出了一种基于 i 线光刻技术, 并结合了高阶增益式耦合 DFB 光栅和多模干涉波导增益区结构的激光芯片结构, 由于芯片结构无需二次外延, 采用的高阶光栅的特征尺寸都在微米级以上, 这种激光器芯片结构在提高了传统的 DFB 激光器的输出功率的基础上, 还进一步简化了目前商用的 DFB 边发射半导体激光器的制作工艺, 为这类激光芯片的推广和实用化提供了一个新的思路.

2 器件的结构与设计

2.1 器件的结构

如图 1 所示, 结合了增益耦合式 DFB 光栅的有源 MMI 激光芯片的结构主要包括了带有增益耦合式 DFB 光栅的脊型单横模增益波导、有源多模干涉波导区域以及其他的含增益耦合 DFB 光栅的脊型增益区.

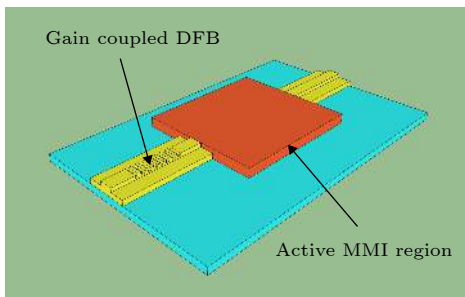


图 1 结合了增益耦合式 DFB 光栅的有源 MMI 激光芯片的结构示意图

Fig. 1. Schematic of an active MMI laser chip with gain coupled DFB grating.

2.2 器件的设计

对于这种激光芯片结构的设计主要就是带有增益耦合型 DFB 光栅的增益波导结构的设计和对有源 MMI 的设计两部分.

增益型 DFB 光栅的有源波导结构是在脊型的波导结构上, 通过浅刻蚀的方法在有源波导的上表面定义出周期性的绝缘槽结构, 通过在刻蚀掉的绝缘槽内沉积二氧化硅薄膜的方式可以对定义的绝缘槽进行良好的电隔离, 之后只需在整个波导的上表面构造欧姆接触电极, 即可形成周期性的电注入电极结构. 增益型的 DFB 激光器结构示意图如图 2.

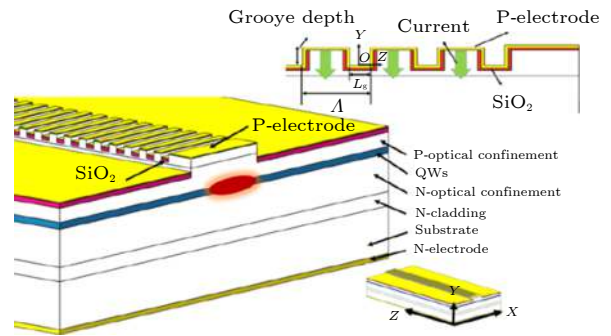


图 2 增益耦合式 DFB 有源波导结构的示意图^[23]

Fig. 2. Schematic of gain coupled DFB active waveguide structure^[23].

增益型的 DFB 光栅的反馈和滤波性能主要受到周期性刻蚀的绝缘槽的深度和宽度以及光栅周期的影响, 由于刻蚀绝缘槽在引入周期性增益耦合的过程中也同时引入了周期性的折射率耦合的部分, 绝缘槽的深度和宽度将会影响到折射率耦合项耦合系数. 因此, 设计和优化绝缘槽深度和宽度, 一方面增强增益耦合效应, 另一方面抑制折射率耦合效应是设计这类 DFB 光栅波导结构的一个重要任务.

对于 DFB 光栅, 耦合系数 κ 是表征光栅反馈能力的重要参数, 在本节所提出的光栅结构下, 它具有以下的形式:

$$\kappa = k_0 \Gamma \Delta n \frac{\sin\left(\frac{l\pi}{\Lambda} L_g\right)}{l\pi} + i\Gamma' \frac{\Delta g}{4}, \quad (1)$$

式中: κ 为 DFB 光栅的耦合系数; k_0 是光的真空波数; Γ 是外延层的限制因子; Δn 是有效折射率的变化量; l 是光栅阶数; Λ 是光栅周期; L_g 是沟槽的长度; Δg 是波导中增益的变化量. 式中等号右边第一项是折射率变化引起的耦合系数的变化, 等

号右面第二项是由增益变化引起的耦合系数的变化. 从 (1) 式可以看出, 为了减小折射率变化对耦合系数 κ 的贡献, 需要尽量减小有效折射率的变化量 Δn , 具体到本文的光栅结构, 就是尽量采用浅刻蚀, 刻蚀的深度越浅, 有效折射率的变化就会越小. 图 3 是利用 COMSOL Multiphysics 仿真计算出的耦合系数 κ 的实部与虚部 (即折射率变化引起的耦合系数和增益变化引起的耦合系数) 与绝缘槽刻蚀深度 D_g 之间的关系.

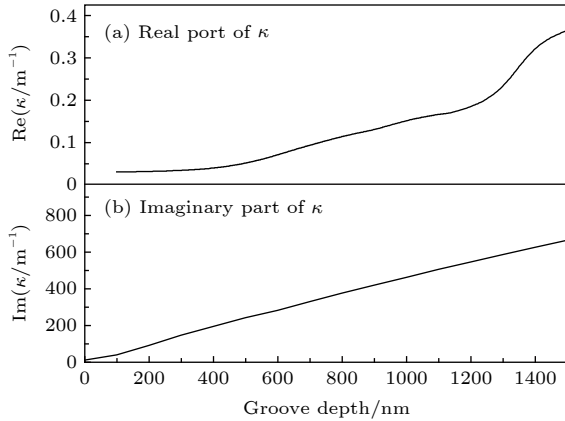


图 3 增益耦合式 DFB 光栅的刻蚀深度与耦合系数 κ 的关系^[23]
 Fig. 3. Relationship between groove depth and couple coefficient of gain coupled DFB grating^[23].

刻蚀绝缘槽在引入折射率变化的同时, 还会引起光在波导内传输过程中的散射损耗, 同样利用 COMSOL Multiphysics 可以对不同绝缘槽深度下的光束传播状态进行仿真, 得到散射损耗与沟槽深

度之间的关系, 图 4 为两种不同刻蚀深度下光传输的仿真结果. 根据仿真计算沟槽深度为 600 nm 时的散射损耗为 0.15%, 刻蚀深度为 1200 nm 时的散射损耗高达 16.07%.

对于耦合系数的虚部, 即增益变化产生的耦合系数, 主要是需要计算增益在整个光传输方向上的分布情况. 又由半导体激光器或光放大器的增益正比于增益介质当中的载流子浓度这个关系可知, 载流子在量子阱增益区上的分布情况即可代表增益的分布状况. 因此, 首先利用 PICS 3D 模拟仿真增益耦合 DFB 波导结构中的载流子分布状况, 利用 PICS 3D 模拟的载流子分布状况如图 5.

在获得了整个截面上的载流子分布信息之后, 可截取载流子在量子阱增益区截面附近的分布情况, 而这个分布状态即可用于表示增益变化的部分状态, 图 6 为载流子浓度在量子阱截面周围两个周期内的分布状况.

隔离槽的宽度同样会对载流子的分布状况产生影响, 隔离槽越宽, 对两侧的载流子的限制作用就越强, 增益的变化也会更加显著, 图 7 是仿真计算得到的两个光栅周期内的不同的隔离槽深度下载流子浓度在量子阱上的分布状况.

通过以上的分析, 并考虑接触式 i 线光刻的光刻精度, 选取了光栅周期为 4.5 μm , 绝缘沟槽长度为 3 μm , 绝缘沟槽深度在 500—800 nm 之间的光栅结构作为整个结构的 DFB 增益波导区.

对于有源多模干涉波导增益区的设计, 主要是确定多模干涉波导区域的长度和宽度. MMI 的宽

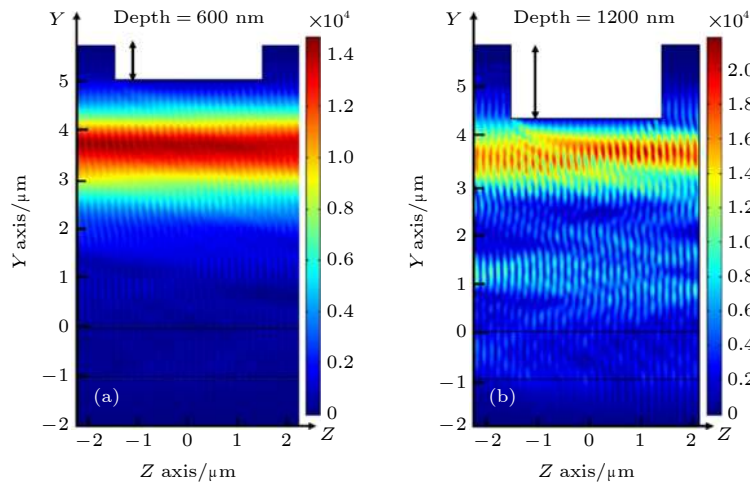


图 4 利用 COMSOL Multiphysics 仿真的光束传播的光场分布状态^[23] (a) 绝缘槽深度 600 nm; (b) 绝缘槽深度 1200 nm
 Fig. 4. Light field distribution of beam propagation simulated by COMSOL Multiphysics^[23]: (a) Insulation groove depth 600 nm; (b) insulation groove depth 1200 nm.

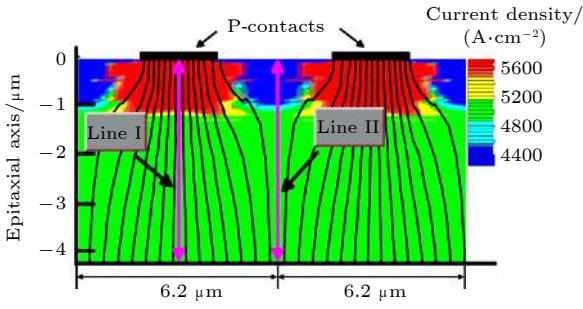


图 5 利用 PICS 3D 仿真的一个周期内的载流子分布情况
Fig. 5. Simulation results of carrier distribution in one period using PICS 3D.

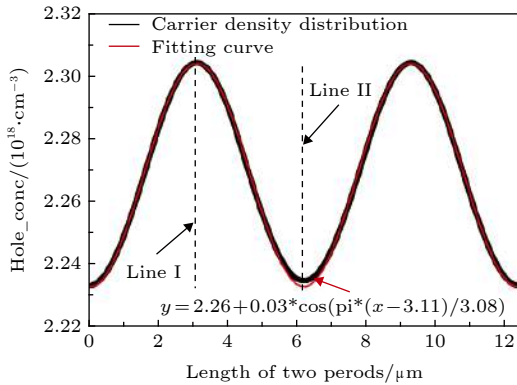


图 6 量子阱上载流子浓度在两个光栅周期内的分布情况
Fig. 6. Distribution of carrier concentration on quantum well in two grating period.

度越大, 结构内所容纳的模式就越多, 该增益区域所能提供的增益也就越大. 但是器件的长度也会随之增加. MMI 的长度随宽度的变化关系如 (2) 式^[24]所示,

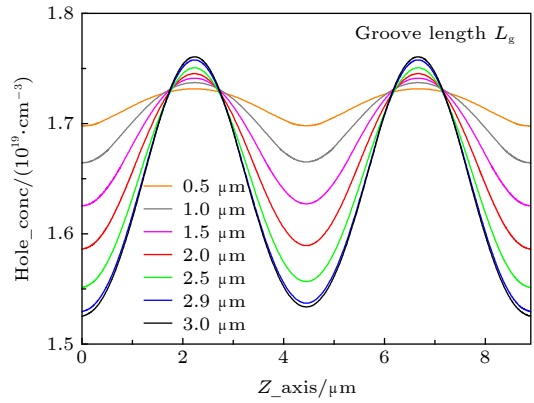


图 7 不同隔离槽深度量子阱上载流子浓度在两个光栅周期内的分布情况^[23]
Fig. 7. Distribution of carrier concentration on quantum well in two grating periods with different isolation groove depth^[23].

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \simeq \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}, \quad (2)$$

式中: L_{π} 为 MMI 结构的拍长; W_e 为 MMI 的有效宽度. 对于 1X1 的 MMI 结构, 其长度 L 等于 L_{π} 长度的 3 倍, 故 L 也正比于 W_e 的平方. 这表明 MMI 的长度会随着它的宽度的变化迅速增长, 所以在考虑器件整体尺寸不宜过大的情况下, MMI 的宽度不宜设计的过大. 通过 Lumerical 公司的 MODE Solution 软件对一定波长下光通过 MMI 结构时的光场分布进行了仿真, 得到了所需的 MMI 区域的宽度和长度的尺寸信息. 具体仿真结果示意如图 8 所示.

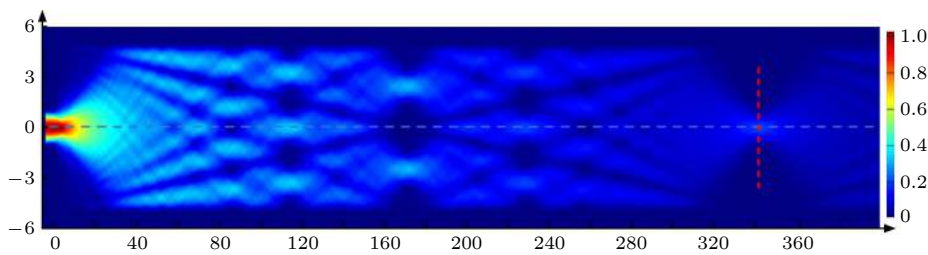


图 8 利用 MODE Solution 软件仿真的 1X1 的 MMI 结构内的光场分布
Fig. 8. Simulation results of light field distribution in 1X1 MMI structure using MODE Solution software.

图 8 中蓝色虚线所标示的是 MMI 结构的中心线, 通过对中心线上光场强度的观察, 找到光场强度最高的一点, 即为 1X1 的 MMI 结构的自镜像点的位置, 也就是图 8 中蓝色虚线与红色虚线的交点位置.

波导脊型区域的结构设计, 主要利用 COMSOL

MultiPhysics 的波动光学模块对脊型区域中的光学模式进行仿真, 确保光在激光器的窄脊型波导区域中是以单横模的形式进行传播的, 并对波导的脊宽和脊高进行了优化, 尽可能地降低光在波导中的模式传输损耗. 最终选择了脊宽为 6 μm, 脊高 1.2 μm 的脊型波导区域结构.

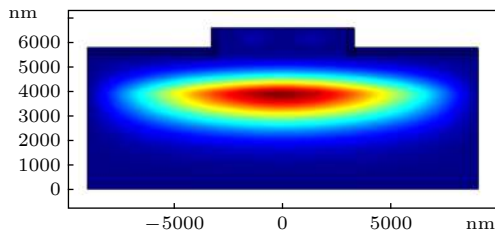


图 9 利用 COMSOL MultiPhysics 仿真的脊型波导内的二维光场模式分布

Fig. 9. 2D optical field mode distribution of ridge waveguide structure using Comsol Multiphysics.

3 实验与结果

3.1 器件的制备

结合了增益耦合式 DFB 光栅的有源 MMI 激光芯片的制备流程如下: 利用 MOCVD 在 GaAs

晶圆衬底上生长具有量子阱和对应异质结结构的外延层, 本文采用增益波长在 980 nm 的量子阱外延层; 利用 i 线光刻定义电隔离槽位置, 利用 ICP 干法刻蚀, 得到宽度为 3 μm 深度为 600 nm 的电隔离槽; 再次使用 i 线光刻定义脊型波导区域和有源多模干涉波导区域并利用 ICP 刻蚀, 得到 6 μm 宽的脊型波导区和 19.6 μm 宽的多模干涉波导区域, 刻蚀的深度 910 nm. 之后利用 PECVD, 在表面沉积生成一层厚 300 nm 的二氧化硅绝缘薄膜, 再利用 i 线光刻在二氧化硅薄膜上定义出电极窗口的位置, 再通过 RIE 干法刻蚀, 打开绝缘层上的窗口, 最后采用气相物理沉积或磁控溅射的方式蒸镀 300 nm 的 Ti-Pt-Au 合金材料, 并在 400 °C 的条件下进行退火处理, 形成欧姆接触的 P 面电极. DFB 增益耦合光栅部分的制备工艺流程如图 10 所示.

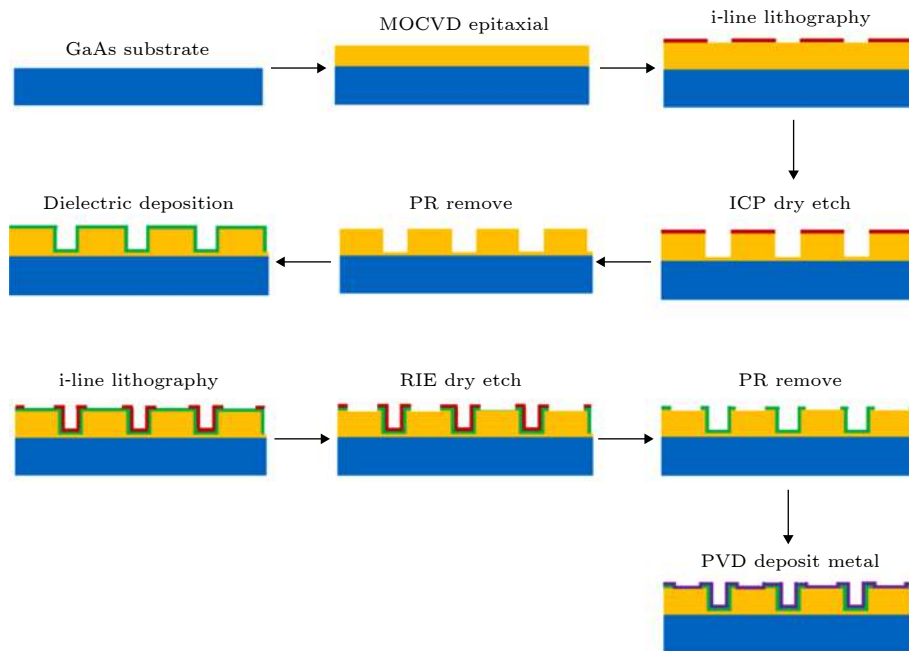


图 10 DFB 增益耦合光栅部分的制备工艺流程

Fig. 10. Schematic processing flow of gain coupled DFB laser diode.

为了能够让激光芯片具有良好的散热性能, 在完成正面的器件制备工艺之后, 还需要要对外延芯片的背面进行减薄处理, 从 N 面方向将芯片减薄到 120 nm 并对减薄的表面进行化学抛光和物理抛光; 在完成减薄和抛光之后, 同样使用气相物理沉积或磁控溅射的方法, 在 N 面蒸镀或溅射 500 nm 的 Ni-Ge-Au-Ni-Au 合金并在 420 °C 的条件下进

行退火处理, 形成 N 面电极. 之后再对芯片进行解理和 C-mount 封装, 就可以进行最后的测试了. 从以上的工艺流程可以看出, 器件的整个工艺过程不牵扯二次外延技术, 对光刻精度的要求也在 2 μm 的水平, 是一种易于实现和推广的工艺技术手段. 图 11 为增益耦合型 DFB 光栅的扫描电镜照片和整个激光芯片封装后的照片.

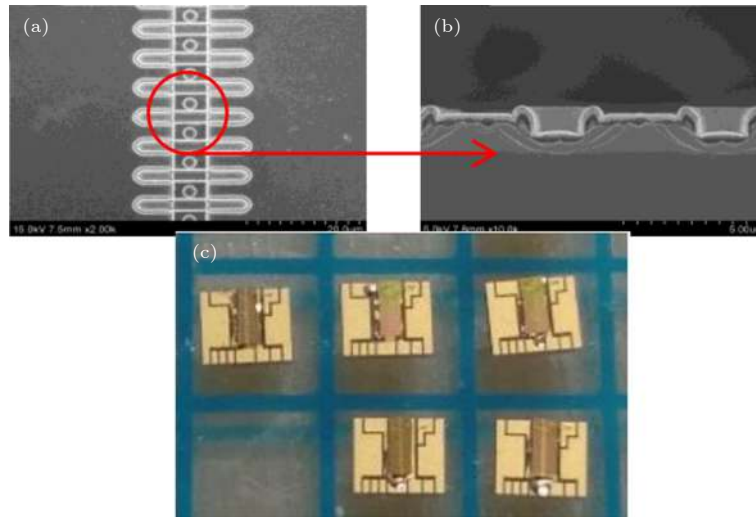


图 11 (a) DFB 增益耦合光栅的俯视扫描电镜图像; (b) DFB 增益耦合光栅的纵向截面扫描电镜图像; (c) 经过 C-mount 封装的增益耦合式 DFB 光栅 MMI 激光器的照片

Fig. 11. (a) Overlooking SEM image of gain coupled DFB grating; (b) SEM image of longitude cross-section view of gain coupled DFB grating; (c) photo image of C-mounted MMI plus DFB laser diode.

3.2 测试结果与分析

为了对器件的性能有更准确和直观的了解, 在制备 MMI + DFB 的激光芯片结构的同时, 还在同一块衬底上, 利用相同的工艺制备了不含 DFB 结构 MMI 激光器和不含 MMI 结构的窄脊 DFB 激光器作为对照. 由于采用相同的光刻板, 工艺条件也完全相同, 对几种器件的性能测试结果就可以体现器件在结构上的差异.

首先, 对 3 种器件在连续电流工作状态下的功率输出特性进行表征, 图 12 为 3 种器件的功率-电流特性测试结果.

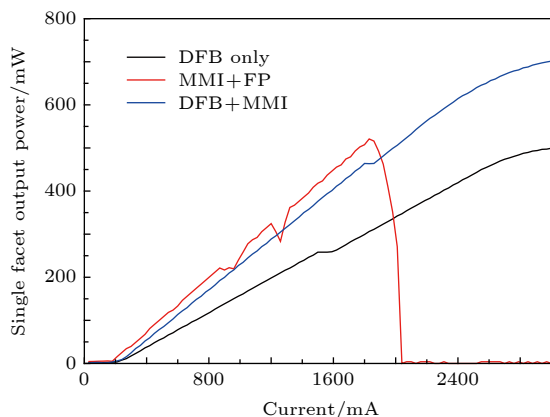


图 12 DFB + MMI 激光器结构在连续电流工作状态下的功率-电流输出特性

Fig. 12. $P-I$ output characterization curve of MMI plus DFB laser diode under the condition of continuous current operation.

从图 12 的测试结果可以看出, 在注入电流较小时, 不含 DFB 结构的 MMI 激光芯片具有最小的阈值电流和最高的斜率转换效率, 在 500 mA 时, 它的斜率效率达到了 0.25 W/A, 这说明之前所讨论的 DFB 光栅结构在光传输过程中所引起的散射损耗确实存在的, 由图 4 的仿真结果可以看出, 光在通过每一个 DFB 光栅结构时都会由于散射造成额外的传输损耗, 而激光器的斜率效率取决于激光器一个光程内的增益和传输损耗之和, 散射损耗增大了 DFB 激光器的传输损耗, 所以降低了 DFB 激光器的斜率效率和提高了 DFB 激光器的阈值电流. 同时, 还可以从测试结果看出, 对于具有 DFB 光栅的两种激光器, 含有 MMI 增益区结构的激光器的斜率效率要明显高于不含 MMI 增益区的窄脊型激光器, MMI + DFB 型的激光器在注入电流为 500 mA 时的斜率效率为 0.22 W/A, 而窄脊型的 DFB 激光器在注入电流为 500 mA 时的斜率效率仅为 0.14 W/A, 这与理论计算和之前报道的 MMI 激光器的性能是相一致的, 说明采用有源 MMI 作为增益区, 确实可以有效地增加激光器的增益区域面积, 而更大的增益面积可以为激光器提供更充分的增益, 所以有利于提高激光器的输出功率. 3 种激光器在注入电流增加的过程中都出现 $P-I$ 曲线扭结的现象, 这种现象一般代表光学模式从基模向其他高阶模式的跳变.

当注入电流不断增加达到 1.89 A 时, 不含

DFB 结构 MMI 激光器的输出功率出现了明显的衰减, 而含有 DFB 结构的两种激光器, 在注入电流达到 3 A 之前都没有出现这种现象, 这有可能是因为在不对激光器谐振腔内的光学模式进行限制的情况下, MMI 激光器内光学模式会随注入电流产生明显变化, 当变化达到一定量值时, 光束将不再能够在原始的自镜像点位置附近进行聚焦, 也就不能够被出射端的单模波导所捕获. 而对于含有 DFB 结构的激光器, 由于光栅对传播的光学模式

的限制作用, 激光器的激射波长随注入电流和温度的变化较小, 光束在 MMI 结构中的自聚焦点位置变化不大, 就不会出现以上的输出功率迅速减小的现象.

其次, 对几种激光器的输出光的光谱特性进行了表征, 在注入电流为 400 mA 连续光工作状态下, 用光谱仪对 3 种激光器的出射光的光谱进行分析, 3 种结构的激光器的光谱分析结构如图 13 所示.

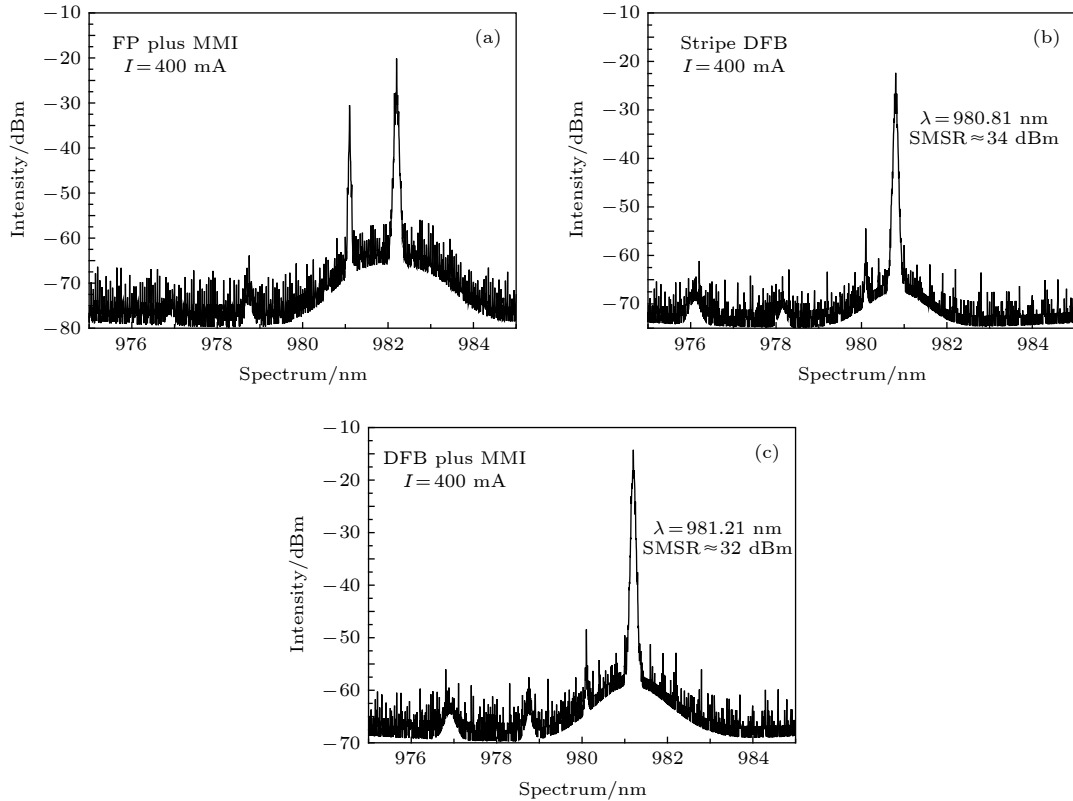


图 13 FP 腔的 MMI 激光器 (a), 窄脊型 DFB 激光器 (b) 和 MMI + DFB 激光器 (c) 的光谱图

Fig. 13. Measured spectrum of MMI with FP cavity laser (a), Stripe DFB laser (b) and MMI plus DFB laser (c).

从 3 种激光器的光谱图 (图 13) 可以看出, 由于没有光栅的限制, FP 腔的 MMI 激光器在注入电流为 400 mA 时已经不能工作在单纵模状态, (a) 光谱图中有两个明显激射峰, 说明光谱中同时存在两种激射的光学模式. 而窄脊型 DFB 激光器和 MMI 型 DFB 激光器在注入电流为 400 mA 时都保持了良好的单模特性, 窄脊型 DFB 激光器的发射中心波长在 980.81 nm, 波长中心线宽为 13.1 pm, 边模抑制比约等于 34 dB; MMI + DFB 结构的激光器的发射中心波长在 981.21 nm, 波长中心线宽 13.6 pm, 边模抑制比约为 32 dB. 从图 13(b),

(c) 图的结果可以看出两种结构在注入电流不大的情况下均能实现单模输出, 输出光束的线宽和边模抑制比也较为相近, 这说明增加有源 MMI 区域对增益耦合型 DFB 激光器的激射光谱性能影响不大, 两种激光器光谱的中心波长相差了 400 pm, 是一个相对较大的差异, 造成这种差异物理机制仍然不是非常明确, 可能是由于 MMI 区域中的平均光场强度低于窄脊区域, 造成这个区域的工作温度等状态与窄脊型的半导体激光器不同从而使两种结构中的有效折射率产生了差异而造成的.

最后对激光器的远场图形进行测试和表征,

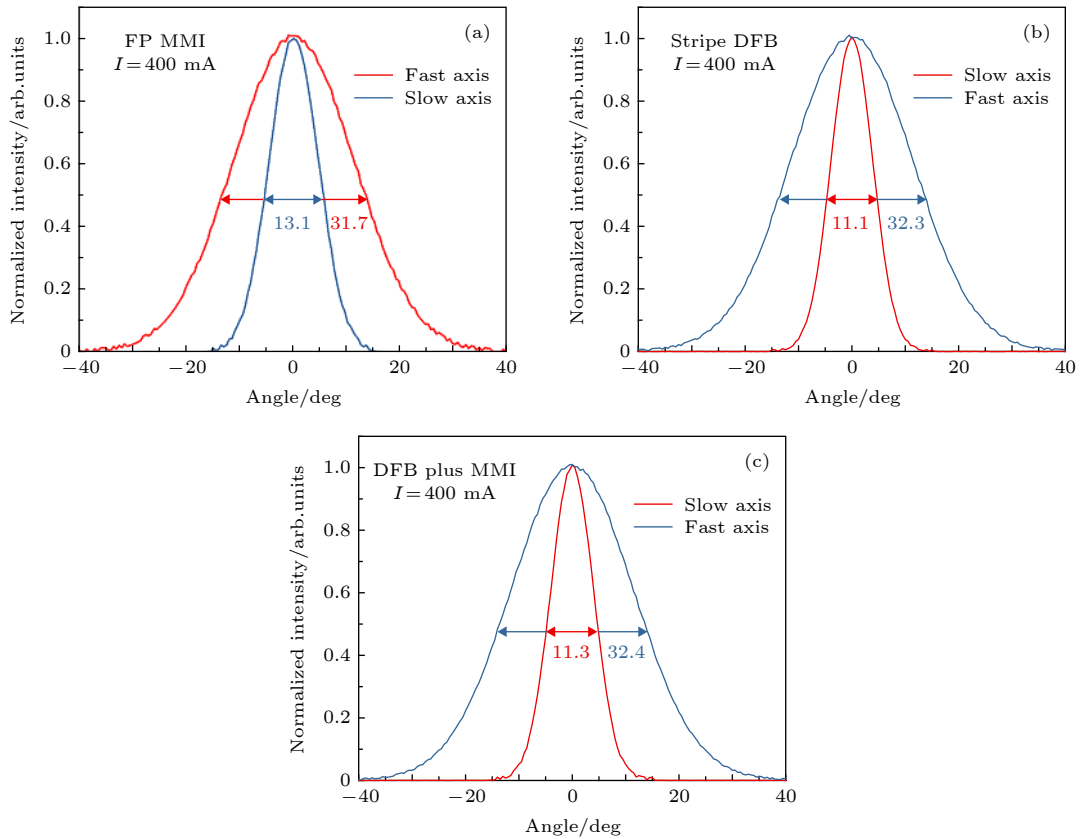


图 14 FP 腔的 MMI 激光器 (a), 窄脊型 DFB 激光器 (b) 和 MMI + DFB 激光器的远场分布 (c)

Fig. 14. Measured far field intensity of MMI with FP cavity laser (a), stripe DFB laser (b) and (c) MMI plus DFB laser.

3 种激光器的远场强度分布如图 14 所示。

从远场分布情况 (图 14) 可以看出, 不含 DFB 光栅的 MMI 激光器的快轴发散角为 31.7° , 窄脊型 DFB 激光器的快轴发散角为 32.3° , MMI 结合 DFB 的激光器的快轴发散角为 32.4° , 这是由于 3 种激光器采用了相同的外延层芯片结构, 所以它们的快轴发散角都较为相近. 而对于慢轴发散角, 由之前的光谱图 (图 13) 可知, 连续工作电流在 400 mA 时, 不含 DFB 的 MMI 激光器已经处于非基模工作状态, 所以它的远场分布发散角较工作在单模状态的其他两种激光器要宽. 而采用了 DFB 光栅结构的两种激光器的远场发散角则非常相近, 说明 DFB 光栅对慢轴发散角起到了很好的限制作用.

4 结 论

本文提出了一种结合了增益式耦合分布反馈光栅的有源多模干涉波导激光器, 对器件的具体结构进行了设计并对这种器件进行了制备和表征. 与传统的窄脊型分布反馈半导体激光器和 FP 腔的

多模干涉波导半导体激光器芯片性能的对比, 提出的结构结合了传统两种激光器结构的优点, 在保留 DFB 激光器温度和波长稳定性的前提下, 有效地提高了激光器的输出功率和斜率转换效率. 同时, 这种器件的制备采用了无需二次外延, 对光刻精度要求较低的工艺制作流程, 在应用和推广方面具有极大的潜力.

参考文献

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, Hanna D C 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1049
- [2] Jeon H, Verdiell J M, Ziari M, Mathur A 1998 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **3** 1344
- [3] Dieckmann A 1994 *Electron. Lett.* **30** 308
- [4] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, et al. 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e310
- [5] Zhou Z, Yin B, Michel J 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e358
- [6] Garcia-Meca C et al. 2017 *Light Sci. Appl.* **6** e17053
- [7] Nehrir A R, Repasky K S, Carlsten J L, Atmos J 2011 *Ocean. Technol.* **28** 131
- [8] Jeon H, Verdiell J M, Ziari M, Mathur A 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **3** 1344
- [9] Zimmerman J W, Price R K, Reddy U, Dias N L, Coleman J J 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1503712
- [10] Burrows E C, Liou K Y 1990 *Electron. Lett.* **26** 577

- [11] Kim I et al. 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2764
- [12] Ishii H, Tohmori Y, Yamamoto M, Tamamura T, Yoshikuni Y 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 1683
- [13] Oberg M, Nilsson S, Streubel K, Wallin J 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 735
- [14] Kikuchi K, Tomofuji H 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 1717
- [15] Nawrocka M et al. 2014 *Opt. Exp.* **22** 018949
- [16] Guo R J et al. 2016 *IEEE Photon. J.* **81** 503007
- [17] Hong J, Kim H, Makino T 1998 *J. Lightwave. Technol.* **16** 1323
- [18] Fricke J, John W, Klehr A, Ressel P, Weixelbaum L, Wenzel H, Erbert G 2012 *Semicond. Sci. Technol.* **27** 055009
- [19] Nichols D T, Lopata J, Hobson W S, Sciortino P F 1993 *Electron. Lett.* **29** 2035
- [20] Hamamoto K, De Merlier J, Ohya M, Shiba K, Naniwae K, Sudo S, Sasaki T 2005 *IEICE Electron. Exp.* **13** 399
- [21] Hamamoto K, Gini E, Holtmann C et al. 2000 *Quebec, Canada OMC.* 2-1 27
- [22] Hinokuma Y, Yuen Z, Fukuda T 2013 *IEICE Trans. Electron.* **96** 1413
- [23] Gao F et al. 2018 *Opt. Comm.* **410** 936
- [24] Soldano L B, Pennings E C M 1995 *J. Light. Technol.* **13** 615

Design of a multimode interference waveguide semiconductor laser combining gain coupled distributed feedback grating*

Qiu Cheng^{1)2)†} Chen Yong-Yi¹⁾²⁾ Gao Feng¹⁾²⁾ Qin Li¹⁾²⁾ Wang Li-Jun¹⁾²⁾

1) (*State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130010, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 17 May 2019; revised manuscript received 29 May 2019)

Abstract

Semiconductor laser is one of the most critical components in the field of modern communication. Research and development of single-mode semiconductor laser with high stability, high power, high beam quality and narrow line width is an important research area in this field. In this paper, A novel edge-emitting semiconductor laser diode structure is proposed. In the structure an active multimode interference waveguide structure serves as a main gain region. To modulate the longitudinal mode of the laser, a gain-coupled distributed feedback(DFB) laser based on high order surface gain coupled grating is introduced into the structure as well. The novel structure is then fabricated and compared with an conventional DFB laser. The experimental results show that higher slope efficiency and output power are achieved with the proposed structure than those with the conventional distributed feedback semiconductor lasers. The novel structure is also compared with conventional MMI laser with only Fabry-Parot(FP) cavity. The result shows that the proposed structure has higher beam quality and better stability than the FP cavity multimode interference waveguide lasers. To enhance the gain contrast in the quantum wells without introducing the effective index-coupled effect, the groove length and depth are well designed. Our device provides a single longitudinal mode with the maximum CW output power up to 53.8 mW/facet at 981.21 nm and 400 mA without facet coating, 3 dB linewidth < 13.6 pm, and SMSR > 32 dB. Optical bistable characteristic is observed with a threshold current difference. Meanwhile, by using high-order distribution feedback grating formed by shallow surface etching in the process of chip design and fabrication, the proposed structure of laser diode can realize regrowth freely and only micron-scale precision i-line lithography is required. Such a structure with simple fabrication process and low manufacturing cost has great potential for commercial mass production.

Keywords: distributed feedback grating, active multimode interference waveguide, edgeemitting semiconductor laser diode

PACS: 42.55.Wd, 42.82.Bq, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.68.20190744

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51672264, 11874353, 61727822, 61674148).

† Corresponding author. E-mail: qiucheng_hahaha@163.com