

顶部反射镜对GaN基共振腔发光二极管性能的影响研究

赵淑钰 徐滨滨 赵振宇 吕雪芹

Influence of top mirror on performance of GaN-based resonant cavity light-emitting diode

Zhao Shu-Yu Xu Bin-Bin Zhao Zhen-Yu Lü Xue-Qin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 047801 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211720

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211720>

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

具有石墨烯/铟锡氧化物复合透明电极的Ga_N发光二极管

GaN-based light emitting diode with graphene/indium antimony oxide composite transparent electrode

物理学报. 2019, 68(24): 247303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190983>

GaN基微缩化发光二极管尺寸效应和阵列显示

GaN based micro-light-emitting diode size effect and array display

物理学报. 2020, 69(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200305>

锡基钙钛矿的研究进展及其在发光二极管中的应用

Recent progress of tin-based perovskites and their applications in light-emitting diodes

物理学报. 2021, 70(4): 048503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201284>

基于离子注入隔离的微缩化发光二极管阵列性能

Ion implantation isolation based micro-light-emitting diode device array properties

物理学报. 2020, 69(2): 027802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191418>

蓝紫光发光二极管中的低频产生-复合噪声行为研究

Low-frequency generation-recombination noise behaviors of blue/violet-light-emitting diode

物理学报. 2019, 68(12): 128104 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190189>

自旋发光二极管研究进展

Research progress of spin light emitting diode

物理学报. 2020, 69(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200866>

顶部反射镜对 GaN 基共振腔发光二极管性能的影响研究*

赵淑钰 徐滨滨 赵振宇 吕雪芹†

(厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 厦门 361005)

(2021 年 9 月 15 日收到; 2021 年 10 月 27 日收到修改稿)

本文在 GaN 基共振腔发光二极管 (RCLED) 顶部设计制备了高反膜结构分布式布拉格反射镜 (DBR) 和滤波器结构 DBR, 对比分析了两种反射镜的反射率曲线特征以及对应的 RCLED 器件的光输出纵模模式、光谱线宽和输出光强等性能差异, 详细研究了顶部反射镜的光反射特性对 RCLED 器件输出光谱性能的影响机理. 研究表明, 顶部反射镜是 RCLED 的重要组成部分, 其反射率曲线特征决定器件的光输出性能. 常规高反膜结构 DBR 顶部反射镜的反射率曲线具有较宽的高反射带, 将其作为顶部反射镜可有效压窄 RCLED 发光纵模线宽, 但是发光光谱仍呈现多纵模光输出特征. 滤波器结构 DBR 顶部反射镜的反射率曲线在中心波长处具有较窄的透光凹带, 利用透光凹带对输出光的调制作用, 器件可实现单纵模光输出, 在光通信、光纤传感等领域展示了广阔的应用前景. 通过进一步设计 RCLED 顶部反射镜结构, 可以改变其反射率曲线特性, 进而优化 RCLED 器件的输出光谱特性, 以满足器件在多个领域的应用需求.

关键词: GaN 基 RCLED, 高反膜结构 DBR, 滤波器结构 DBR, 单纵模发光

PACS: 78.20.Bh, 78.66.Fd, 85.30.De, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.71.20211720

1 引言

GaN 属于第三代宽禁带半导体材料, 其与 AlN, InN 组成的合金材料的禁带宽度可以在 0.7—6.2 eV 之间连续可调, 覆盖了红外到紫外光谱范围, 是一种制作发光器件的理想材料^[1,2]. 近年来, 采用 GaN 材料制作的发光二极管 (Light emitting diode, LED) 已经取得了巨大的进步, 其寿命、可靠性、功耗及响应速度与传统发光器件相比都具有显著的优势^[3,4], 已广泛应用于室内照明、景观照明、汽车灯具、显示屏、背光源等领域. 另外, 共振腔结构可以增强器件的发光强度、提高光谱纯度、优化出光方向性. 因此, 基于 GaN 材料的共振腔发光二极管 (Resonant cavity light emitting diode, RCLED)

作为一种新型的高效半导体光电器件受到了广泛关注.

RCLED 是一种将有源区置于法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 光学谐振腔中的特殊结构 LED, 相比于传统结构的 GaN 基 LED, RCLED 具有许多独特的优势. 微腔效应发生在谐振腔中^[5,6], 有源区产生的自发辐射光在腔中发生谐振, 进而提高了出射光的光谱纯度, 改善了光辐射的方向性. 同时, 由于器件的光辐射特性决定于腔共振模式, RCLED 发光波长还具有更好的温度及电流稳定性. 因此, RCLED 具有光谱线宽窄、出光效率高、光输出方向性好、波长稳定性强等诸多优点. 在可见光通信、无散斑照明、高分辨显示、光学扫描仪、医学美容仪等领域^[7–10]具有广阔的应用前景.

早在 1992 年, Schubert 等^[11]根据 FP 腔原理

* 国家自然科学基金 (批准号: 61574119) 和福建省自然科学基金 (批准号: 2021J01048, 2017J01120) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xqlv@xmu.edu.cn

首次提出 RCLED 的概念, 由此开启了关于 RCLED 新的研究方向. 伴随着 GaN 材料和器件的快速发展, GaN 基 RCLED 也引起了研究者的广泛关注 [12–19]. 研究发现, RCLED 的顶部反射镜结构和性能对器件发射光谱线宽、输出光强度、发光方向性等光学性能具有较大的影响. Hu 等 [16] 制备了顶部和底部反射镜均为 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ DBR 的 GaN 基蓝光 RCLED, 电致发光光谱在波长 461.2 nm 处线宽仅为 0.3 nm, 对应品质因子为 1530, 制作了一种高质量的光学共振腔器件. Yang 等 [17] 在紫外 GaN 基 RCLED 顶部设计了一种由 7 对、5.5 对和 1.5 对 $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ DBR 串联而成的反射镜结构, 与常规 DBR 结构相比, 串联结构 DBR 在不同角度的反射率数值较高, 将其作为顶部反射镜有效提高了器件的光提取效率, 同时出射光谱线宽由 3 nm 压窄至 2.1 nm. Zhou 等 [18] 在 GaN 基 RCLED 的顶部生长了不同对数的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ DBR, 研究了顶部反射镜反射率对器件性能的影响. 结果表明, 当顶部 DBR 反射率为 55% 时, 器件性能最佳, 得到最高输出功率 62 mW、外部量子效率 14.8%、出射光谱线宽 12 nm、远场 50% 观测角 122° 、-3 dB 调制带宽 48 MHz. Cai 等 [19] 在硅衬底上制备了顶部和底部反射镜均为 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ DBR 的 GaN 基 RCLED, 输出光谱与传统的 LED 相比, 线宽由 27 nm 降至 15 nm, 输出光强提高了 1.6 倍.

目前研究报道的 GaN 基 RCLED 的顶部反射镜多采用介质膜分布布拉格反射镜, 与传统的 LED 相比, 均获得了较窄的线宽和较强的输出光强. 但是, 这种结构 DBR 的高反射带较宽, 加上半导体材料宽的增益谱特征, 出射光谱多呈现多纵模光输出. 而在光通信和光纤传感等领域, 一般需要具备单峰窄带光发射特征的光源, 目前在 GaN 基 RCLED 研究中还未见相关报道. 为了实现单峰窄带光发射, 本文深入探讨了 GaN 基 RCLED 顶部反射镜结构对器件光输出性能的影响. 文中设计了常规高反膜结构 DBR 和滤波器结构 DBR 两种顶部反射镜, 分别模拟了两种结构 DBR 的反射率曲线和对应 RCLED 器件的输出光谱, 分析了顶部反射镜反射率曲线特征对 RCLED 输出纵模模式、光谱线宽和输出光强等性能的影响机理. 基于理论模拟结果, 制备了具有两种 DBR 结构顶部反射镜的 GaN 基 RCLED, 并测试分析了两种器件的输出光

谱性能, 采用滤波器结构 DBR 作为器件的顶部反射镜, 在 RCLED 器件中实现了窄带单纵模光出射, 在光通信和光纤传感等领域展示了广阔的应用前景.

2 器件结构和顶部 DBR 结构设计

2.1 器件结构设计

本文设计的 RCLED 器件结构如图 1 所示. 有源区为 InGaIn/GaN 多量子阱, 底部反射镜采用金属 Ag 基反射镜, 反射率大约为 95%, 顶部反射镜为 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 介质膜 DBR, 可采用成熟的电子束蒸发方法制作. 为保证器件良好的散热性能, 在制作过程中将热导率差的蓝宝石衬底去掉, 外延层转移到导热性好的 Cu 衬底上. 器件的电极结构为垂直结构构型, 底部 Ag 基反射镜不仅可作为反射镜, 还可作为欧姆接触层. 整个器件制作工艺与现有的垂直结构 LED 工艺兼容, 有利于将来产业化应用.

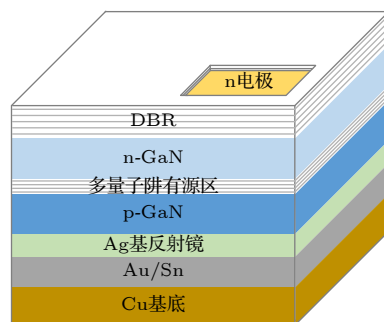


图 1 GaN 基 RCLED 器件结构示意图

Fig. 1. Schematic illustration of GaN-based resonant cavity light emitting diode.

2.2 顶部介质膜 DBR 结构设计

本文设计了两种顶部反射镜结构, 一种是常规高反膜结构 DBR, 另一种是滤波器结构 DBR, 分别模拟了两种反射镜的反射率曲线, 探讨了反射镜的生长对数对反射率和反射带宽参数的影响.

2.2.1 常规高反膜结构 DBR 膜系设计

常规高反膜 DBR 膜系由高、低折射率材料 Ta_2O_5 , SiO_2 交替生长制成, 每层膜光学厚度均为 $\lambda/4$, λ 为设计的中心波长 439.1 nm. 具体结构表述为 $(\text{HL})^m\text{H}$, 其中“H”表示光学厚度为 $\lambda/4$ 的高折射率材料层, “L”表示光学厚度为 $\lambda/4$ 的低折射率材料层, m 表示生长的对数, 介质膜系两边最外层

均为高折射率材料层. 常规高反膜 DBR 膜系结构的中心波长处反射率可表示为

$$R = \left[\frac{1 - Y}{1 + Y} \right]^2, \quad (1)$$

其中 $Y = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2m} \cdot \frac{n_s^2}{n_H^2}$, n_H 和 n_L 分别为高、低折射率膜层材料的折射率, n_s 为 DBR 生长基片 GaN 材料的折射率. 图 2 给出了 DBR 生长对数由 2 对增加到 7 对的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反膜结构 DBR 的反射率模拟曲线. 从图 2 可以看出, DBR 在中心波长附近存在一个高反射带, 随着对数的增加, 反射率增大, 高反射带逐渐变得平直, 并且高反射带的边缘也逐渐陡直. 当 DBR 对数为 7 时, 中心波长处的反射率最高达到 99.1%, 高反射带宽为 105 nm (反射率 $R > 90\%$ 的波段).

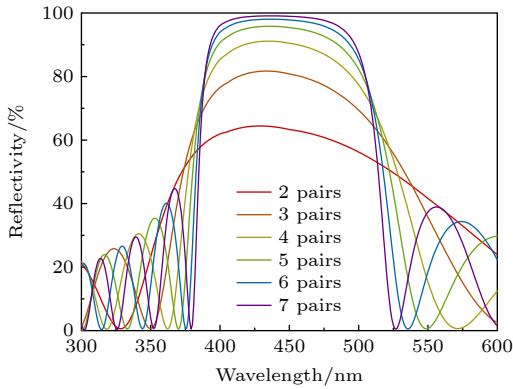


图 2 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反膜结构 DBR 的反射率模拟曲线
Fig. 2. Simulated reflectivity spectra of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ DBR with high-reflective-film structure.

2.2.2 滤波器结构 DBR 膜系设计

滤波器结构 DBR 膜系结构为 $(\text{HL})^m(\text{LH})^m$, 由相互对称的高低折射率材料交替生长制成, 每层膜的光学厚度均为 $\lambda/4$, λ 为设计的中心波长 439.1 nm, 具体结构如图 3 所示, 膜系组合中包括了两侧的两个子膜层 (膜层 1 和膜层 2) 和中间的一个选定膜层 (膜层 3).

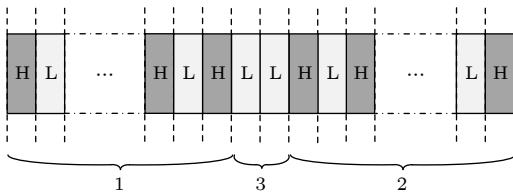


图 3 滤波器结构 DBR 的结构示意图
Fig. 3. Schematic illustration of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ DBR with filter structure.

基于光学传输矩阵理论和有效界面法^[20–22], 对滤波器结构 DBR 的反射率曲线进行了模拟计算, 滤波器结构 DBR 的反射率计算公式为

$$R = 1 - T = 1 - \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \times \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

其中, T 为 DBR 透射率; $\theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$; R_1 和 R_2 分别为膜层 1 和膜层 2 的反射率; φ_1 和 φ_2 为膜层 1 和膜层 2 的反射相移; δ 为选定膜层的有效相位厚度.

图 4 所示为不同 m 时, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 滤波器结构 DBR 的反射率模拟曲线图. 由图中可以看出, 反射率曲线在中心波长处存在一个反射率极小值, 即存在一个透光凹带, 只允许凹带内对应波长的光透射出去. 在中心波长 439.1 nm 处, 反射率取得最小值 17.6%, 即对应透射率 82.4%, 且其数值不随 DBR 对数发生变化. 随着 DBR 对数不断增多, 透光凹带两侧曲线越来越陡直, 即透光凹带的半高宽越来越窄, 当 DBR 对数为 9 对时, 半高宽仅为 0.18 nm.

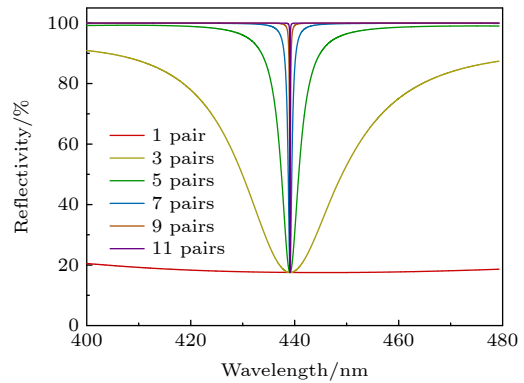


图 4 滤波器结构 DBR 的反射率模拟曲线
Fig. 4. Simulated reflectivity spectra of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ DBR with filter structure.

3 器件性能仿真结果与分析

3.1 器件自发辐射谱分析

在对 RCLED 器件进行性能仿真之前, 首先确定了器件的增益谱. 图 5 中黑色线给出了器件在蒸镀顶部反射镜之前在垂直发光面方向测试得到的电致发光光谱. 虽然顶部未蒸镀反射镜, 但是顶部

GaN 材料具有约 17% 的反射率, 在其和底部反射镜共同作用下, 输出光谱呈现出明显的干涉峰. 根据相邻干涉峰位之间的波长间隔估算出器件腔长约为 6917 nm.

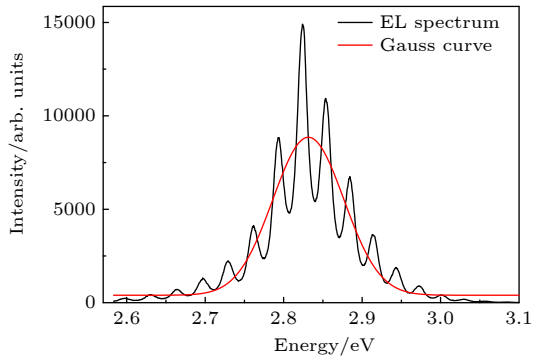


图 5 蒸镀顶部反射镜前在垂直发光面方向测试的器件电致发光光谱 (黑色线) 及其 Gauss 拟合曲线 (红色线)

Fig. 5. Electroluminescence spectrum (black line) and its Gaussian fitting curve (red line) of the device without top DBR measured perpendicular to the light-emitting surface.

为了获得器件增益材料的原始增益谱, 对图中发光光谱进行 Gauss 拟合, 拟合结果如图 5 中红线所示, Gauss 曲线的中心波长约为 438.1 nm (2.83 eV), 因此可以此作为材料的增益谱, 以便于进一步对 RCLED 器件进行性能仿真.

3.2 具有常规高反膜结构 DBR 的 RCLED 器件性能仿真

基于如图 2 所示的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反膜系 DBR 的反射率曲线和如图 5 红色线所示的器件增益谱的高斯拟合谱图, 利用 MATLAB 计算出不同对数 DBR 作为顶部反射镜组成的 RCLED 的模拟输出光谱图, 如图 6 中黑色线所示. 为了对比, 图中同时给出对应的 DBR 反射率模拟曲线, 如红色线所示.

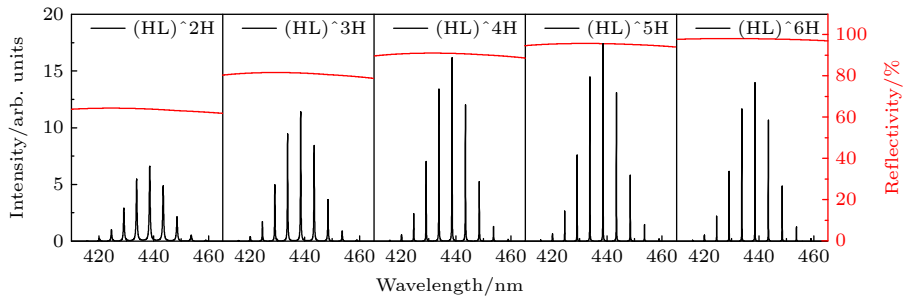


图 6 顶部蒸镀不同对数高反膜结构 DBR 时 RCLED 的模拟输出光谱 (黑色线) 和对应的顶部反射镜反射率模拟曲线 (红色线)

Fig. 6. Simulated electroluminescence spectra (black line) of RCLEDs and reflectivity spectra (red line) of the DBRs with high-reflective-film structure.

由图 6 可以看出, 随着 DBR 对数增多, 其膜系结构反射率数值逐渐增大, 器件输出光强逐渐增强, 当 $m = 5$ 时, 输出光强达到最大, 此时中心波长处的反射率为 95.6%, 与底部 Ag 基反射镜的反射率 95% 相当, 共振腔增强作用最强. 继续增加 DBR 生长对数, DBR 反射率进一步提高, 顶部出光腔面光损耗增大, 输出光强逐渐减弱. 为了更好地说明 RCLED 发光强度对顶部反射镜反射率的依赖关系, 图 7 模拟了 RCLED 输出光强随顶部反射镜反射率变化的曲线, 模拟过程中设定底部 Ag 基反射镜的反射率为 95%. 由图 7 可看出, 随顶部反射镜反射率增加, 输出光强先增强后减弱, 当顶部反射镜反射率为 95% 时, 共振腔的谐振增强效果最好, 输出光强最强.

另外, 由图 6 还可以看出, DBR 的反射率越高, 发光纵模的光谱线宽越窄, 当 DBR 对数为 5 时, 中心波长发光峰线宽只有 0.07 nm. 然而, 由于 DBR 具有较宽的反射带宽, DBR 对数为 5 对时, 在 RCLED 自发发射谱范围内 (410—470 nm) 反射率大于 90%, 因此, 发光谱内的所有纵模均可获得共振增强, RCLED 的发光峰呈现出多纵模发射的特征, 继续增加 DBR 对数, 不能改善 RCLED 的多纵模发光特性.

3.3 具有顶部滤波器结构 DBR 的 RCLED 器件性能仿真

基于如图 4 所示的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 滤波器结构 DBR 的反射率曲线和如图 5 所示的增益器件自发发射光谱的高斯拟合谱图, 利用 MATLAB 仿真工具, 模拟了以不同对数滤波器结构 DBR 作为顶部反射镜组成的 RCLED 器件的输出光谱, 如图 8 中黑色线所示. 为了对比, 图中同时给出对应的 DBR 反射率模拟曲线, 如红色线所示.

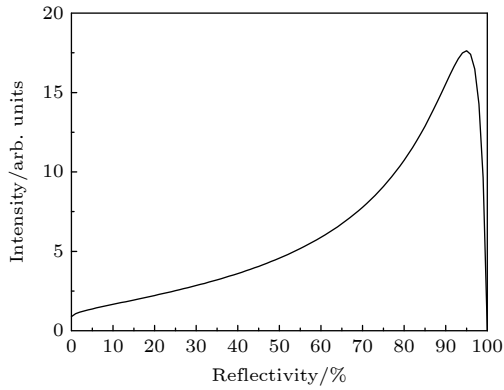


图7 RCLED 输出光强随顶部反射镜反射率变化模拟曲线
Fig. 7. Simulated light emission intensity of RCLED as a function of the reflectivity of top DBR.

由图8中可看出, 当 DBR 对数从 1 对递增至 5 对时, 中心波长处输出光纵模强度不变, 中心波长两侧的输出光纵模强度增强, 这与不同对数滤波器结构 DBR 反射率曲线的变化直接相关. 由图7分析知, RCLED 的发光强度依赖于顶部和底部反

射镜的反射率数值的匹配程度, 当顶部反射镜反射率接近底部反射镜反射率 95% 时, 谐振效应最明显, 发光最强; 反射率高于或者低于 95%, 发光强度均相应减小; 当反射率接近 100% 时, 输出光被反射回腔内, 几乎无光输出. 由滤波器结构 DBR 反射率曲线变化知, DBR 对数为 1—5 对时, 中心波长处反射率数值保持不变, 所以共振腔对此波长处光的谐振效应不变, 其发光强度也保持不变; 同时, 还可以观察到, 此范围内 DBR 反射率曲线的透光凹带较宽, 反射率 95% 所对应的波长偏离中心纵模. 为了更好地说明这一点, 图8中用蓝色虚线标注了反射率 95% 对应的波长, 该波长处谐振效应最强. 可以清晰地看出, 谐振效应最强的位置并非与中心纵模一致, 而是位于中心波长两侧的其他纵模附近. 因此中心波长处的输出光纵模谐振效应弱, 而其两侧纵模谐振效应明显, 光强较强. 当 DBR 对数由 6 对逐渐递增至, 中心波长处输出光

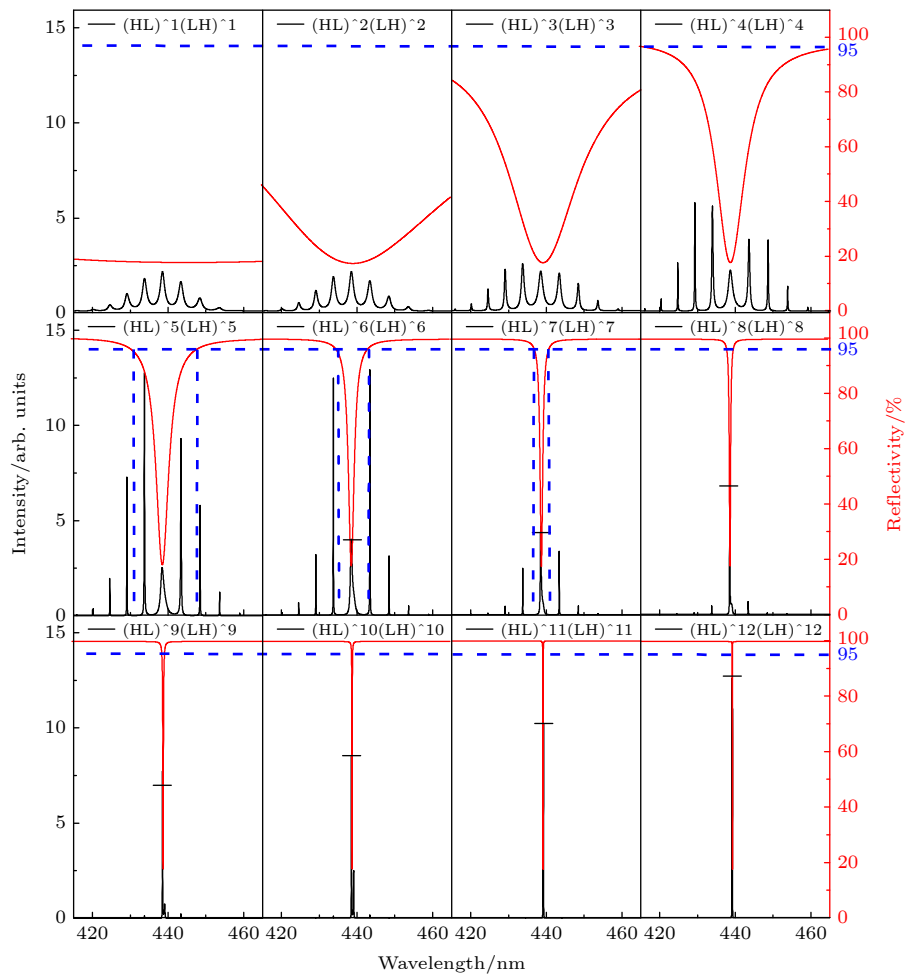


图8 顶部蒸镀不同对数滤波器结构 DBR 时的模拟输出光谱 (黑色线) 和对应的顶部反射镜反射率模拟曲线 (红色线)
Fig. 8. Simulated light emission spectra (black line) of RCLEDs and reflectivity spectra (red line) of the DBRs with filter structure.

纵模强度逐渐增强, 中心波长两侧的输出光纵模强度逐渐减弱至为零. 这是由于随着顶部反射镜反射率曲线中心透光凹带逐渐变窄, 顶部反射镜反射率 95% 对应的波长逐渐靠近中心纵模, 导致了中心波长处的纵模谐振效应最明显; 同时, 中心波长两侧顶部反射镜反射率逐渐接近 100%, 输出光全部被反射回腔内, 顶部基本无其他波长的光输出. 因此, 由图 8 仿真光谱数据知, 使用滤波器结构 DBR 作为 RCLED 的顶部反射镜, 当 DBR 对数高于 9 对时, 可以在 RCLED 中实现单纵模光输出.

4 器件性能测试与分析

基于以上理论模拟结果, 采用电子束蒸发镀膜设备分别在 RCLED 的顶部蒸镀了 4 对常规高反膜和 9 对滤波器结构的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ DBR, 其膜层结构分别为 $(\text{HL})^4\text{H}$ 和 $(\text{HL})^9(\text{LH})^9$, 设计的中心波长 λ 为 439.1 nm, 每层膜光学厚度均为 $\lambda/4$. 同时, 为了得到 RCLED 顶部蒸镀的 DBR 的反射率, 在玻璃陪片上蒸镀了同样的 DBR 膜层以便进行测试分析.

图 9 所示为玻璃陪片上生长的高反膜和滤波器结构 DBR 的反射率曲线测试结果. 从图中可以看出, 常规高反膜结构 DBR 的反射率曲线展示了 91.2% 的反射率峰值和 44 nm 的较宽的高反射带 (反射率 $R > 90\%$ 的波段). 滤波器结构 DBR 的反射率曲线在中心波长 437.8 nm 处存在一个半高宽为 2.44 nm 的透光凹带, 中心波长处反射率最低为 94.6%, 凹带两侧反射率接近 100%. 测试结果与理论模拟结果基本一致, 其中, 滤波器结构 DBR 反射率曲线中透光凹带的半高宽以及最低反射率数值与理论模拟结果存在一定偏差, 这主要是由于在 DBR 膜层蒸镀过程中, 膜层厚度控制存在一定的误差.

随后, 对顶部分别蒸镀常规高反膜和滤波器结构 DBR 的 RCLED 器件进行测试, 图 10 所示为在垂直出光面方向测试得到的两种器件的电致发光光谱图, 为了对比, 图中同时给出顶部没有蒸镀 DBR 的器件的电致发光光谱.

由图 10 可以看出, 当器件顶部蒸镀 4 对高反膜结构 DBR 时, 输出光谱在中心纵模处输出光强最强, 且各纵模模式线宽变窄, 中心纵模线宽由 2.9 nm 减小至 1.4 nm. 但是, 输出光谱仍然呈现

出多纵模输出的特征. 这是由于顶部反射镜反射率曲线存在一个较宽的高反射带, 各输出光纵模对应的谐振效应基本相同, 所以不能实现对输出光纵模的选择.

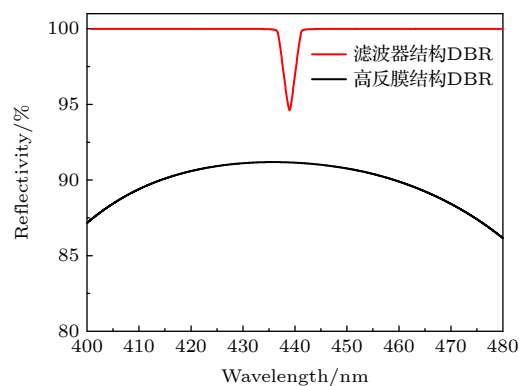


图 9 高反膜结构 DBR 和滤波器结构 DBR 的反射率曲线测试结果

Fig. 9. Measured reflectivity spectra of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ DBRs with high-reflective-film structure and filter structure respectively.

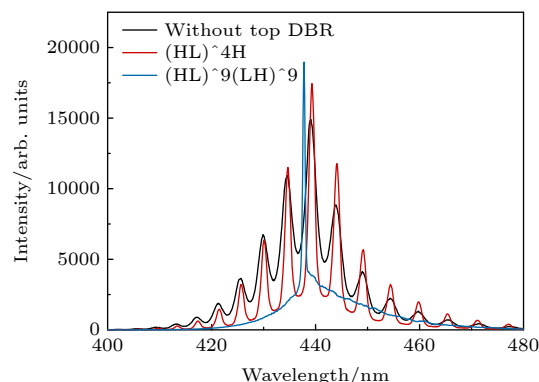


图 10 顶部没有蒸镀反射镜 (黑色线)、蒸镀高反膜 DBR (红色线) 和滤波器结构 DBR (蓝色线) RCLED 器件在垂直出光面方向测试的电致发光光谱

Fig. 10. Measured electroluminescence spectra perpendicular to the light emitting surface for the RCLEDs without DBR (black line), with top high-reflective-film structure DBR (red line) and with filter structure DBR (blue line), respectively.

当器件顶部蒸镀 9 对滤波器结构 DBR 时, 器件发光光谱中心波长两侧纵模消失, 只留下了中心波长处的纵模, 呈现出单峰发射的特征, 实现了单纵模光输出. 这是由于顶部反射镜反射率 95% 对应的波长位于中心纵模处, 此位置处的干涉增强效果最明显, 而中心波长两侧的顶部反射镜反射率接近 100%, 基本没有光输出, 单纵模线宽仅有 0.6 nm.

5 结 论

本文研究了 GaN 基 RCLED 的顶部反射镜反射率特性对器件发光性能的影响. 设计制备了具有高反膜结构 DBR 和滤波器结构 DBR 两种顶部反射镜结构的 RCLED 器件, 对两种器件的顶部反射镜反射率和输出光谱进行了仿真和分析, 并从实验上对仿真结果进行了验证.

仿真结果表明, 使用高反膜结构的 DBR 作为 RCLED 的顶部反射镜, 可以提高器件的输出光强, 同时压窄发光纵模的线宽. 但是, 由于高反膜结构 DBR 的高反射带较宽, 输出光谱呈现多纵模模式, 不能实现对纵模的筛选. 使用滤波器结构 DBR 作为 RCLED 的顶部反射镜, 其中心波长处存在一个透光凹带, 利用透光凹带对输出光的调制作用, 当 DBR 对数在 9 对以上时, 器件发光为单峰发射, 实现了单纵模光输出, 并且发光强度逐渐增强, 输出光谱线宽变窄. 实验结果表明, 相比于顶部反射镜为高反膜结构 DBR 的 GaN 基 RCLED, 在顶部蒸镀滤波器结构 DBR 的器件可以实现单纵模光输出, 光谱线宽仅有 0.6 nm, 器件输出光谱特性得到大幅优化, 展示了 GaN 基 RCLED 在光通信和光纤传感等领域广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Strite S, Morkoc H 1992 *J. Vac. Sci. Technol. B* **10** 1237
- [2] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 5815
- [3] Wang W L, Lin Y H, Li Y, Li X C, Huang L G, Zheng Y L, Lin Z T, Wang H Y, Li G Q 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 1642
- [4] Ricardo X G, Ferreira, Enyuan X, Jonathan J D, Sujun R, Hyunchae C, Grahame F, Scott W, Anthony E, Erdan G, Richard V, Ian H, Dominic C, Martin D 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 2023
- [5] Roycroft B, Akhter M, Masskant P, Mierry P, Fernandez S, Naranjo F B, Calleja E, McCormack T, Corbett B 2002 *Phys. Stat. Sol.* **192** 97
- [6] Benisty H, Neve H D, Weisbuch C 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1612
- [7] Chu Y C, Su Y K, Chao C H, Yeh W Y 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 01AG03
- [8] Tsai C L, Xu Z F 2013 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25** 1793
- [9] Tsai C L, Lu Y C, Ko S C 2016 *IEEE Trans. Electron Devices* **63** 2802
- [10] Li J J, Cao H K, Deng J, Wen Z Y, Zou D S, Zhou X Q, Yang Q W 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 1526002 (in Chinese) [李建军, 曹红康, 邓军, 文振宇, 邹德恕, 周晓倩, 杨启伟 2020 *光学学报* **40** 1526002]
- [11] Schubert E F, Wang Y H, Cho A Y, Tu L W, Zydzik G J 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 921
- [12] Horng R H, Wang W K, Huang S Y, Wu D S 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 457
- [13] Shaw A J, Bradley A L, Donegan J F, Lunney J G 2004 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16** 2006
- [14] Tsai C L, Lu Y C, Ko S C 2016 *IEEE Transactions on Electron Devices* **63** 2802
- [15] Dorsaz J, Carlin J F, Zellweger C M, Gradecak S, Ilegems M 2004 *Phys. Stat. Sol.* **201** 2675
- [16] Hu X L, Zhang J Y, Liu W J, Chen M, Zhang B P, Xu B S, Wang Q M 2001 *Electron. Lett.* **47** 986
- [17] Yang Y, Ji Q B, Zong H, Yan T X, Li J C, Wei T T, Hu X D 2016 *Opt. Commun.* **374** 80
- [18] Zhou LM, Ren B C, Zheng Z W, Ying L Y, Long H, Zhang B P 2018 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **7** 34
- [19] Cai W, Yuan J L, Ni S Y, Shi Z, Zhou W D, Liu Y H, Wang Y J, Hiroshi A 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 032004
- [20] Li J J, Yang Z, HaN J, Deng J, Zou D S, Kang Y Z, Ding L, Shen G D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6304 (in Chinese) [李建军, 杨臻, 韩军, 邓军, 邹德恕, 康玉柱, 丁亮, 沈光地 2009 *物理学报* **58** 6304]
- [21] Li Z X, Pei L, Qi C H, Peng W J, Ning T G, Zhao R F, Gao S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8615 (in Chinese) [李卓轩, 裴丽, 祁春慧, 彭万敬, 宁提纲, 赵瑞峰, 高嵩 2010 *物理学报* **59** 8615]
- [22] Capmany J, Mriel M A, Sales S, Rubio J J, Pastor D 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3125

Influence of top mirror on performance of GaN-based resonant cavity light-emitting diode^{*}

Zhao Shu-Yu Xu Bin-Bin Zhao Zhen-Yu Lü Xue-Qin[†]

(*Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

(Received 15 September 2021; revised manuscript received 27 October 2021)

Abstract

In this paper, two kinds of distributed Bragg reflectors (DBRs) with high-reflective-film structure and filter structure are designed and evaporated on the top of GaN-based resonant cavity light emitting diode (RCLED), respectively. Firstly, the reflectivity spectra of the two kinds of DBRs are simulated. Then, the differences in performance including optical longitudinal modes, spectral linewidth, and output light intensity between the two kinds of RCLED devices with different top mirrors, are compared and analyzed. Finally, the influence of the top mirror reflection characteristics on the output spectrum of the RCLED is studied in detail. The results show that the top mirror is an important part of RCLED, and its reflection characteristics determine the optical performance of the device. For the conventional DBR with high-reflective-film structure, its reflectivity spectrum has a wide high-reflection band. Accordingly, the spectral linewidth of the RCLED can be effectively narrowed by using the conventional DBR as the top mirror. However, the spectrum still consists of multi-longitudinal modes. For the DBR with filter structure, its reflectivity spectrum has a narrow high-transmittance band at the central wavelength. Depending on the modulation effect of the high-transmittance band to the output light, single longitudinal mode light emission is realized for the RCLED with the specially designed DBR as the top mirror, which shows a broad application prospect in optical communication and optical fiber sensing. Moreover, the spectral characteristics of the RCLED can be further optimized to meet its application requirements in much more fields, by designing the top mirror structure and changing its reflectivity spectrum characteristics.

Keywords: GaN-based RCLED, DBR with high-reflective-film structure, DBR with filter structure, single-longitudinal-mode light emission

PACS: 78.20.Bh, 78.66.Fd, 85.30.De, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.71.20211720

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.61574119) and the Natural Science Foundation of Fujian Province, China(Grant Nos.2021J01048, 2017J01120).

[†] Corresponding author. E-mail: xqlv@xmu.edu.cn