

高功率转换效率905 nm垂直腔面发射激光器的设计与制备

赵壮壮 荀孟 潘冠中 孙昀 周静涛 王大海 吴德馨

Design and fabrication of 905nm vertical cavity surface emitting laser with high power conversion efficiency

Zhao Zhuang-Zhuang Xun Meng Pan Guan-Zhong Sun Yun Zhou Jing-Tao Wang Da-Hai Wu De-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 114202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210043

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210043>

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

高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备

Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication

物理学报. 2020, 69(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191787>

940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备

Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2019, 68(6): 064207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822>

高速850 nm垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 67(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

1550 nm垂直腔面发射激光器的特征参量随温度的变化

Temperature dependence of characteristic parameters of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2018, 67(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180572>

垂直腔面发射激光器低温光电特性

Optoelectronic properties of vertical-cavity surface-emitting laser at low temperature

物理学报. 2019, 68(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190427>

垂直腔面发射激光器与异质结双极型晶体管集成结构的设计和模拟

Design and simulation of integration of vertical cavity surface emitting lasers and heterojunction bipolar transistor

物理学报. 2019, 68(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190529>

高功率转换效率 905 nm 垂直腔面发射激光器的设计与制备*

赵壮壮 荀孟† 潘冠中 孙昀 周静涛 王大海 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2021 年 1 月 8 日收到; 2021 年 1 月 30 日收到修改稿)

通过对影响垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 的功率转换效率的因素进行理论分析, 得出斜率效率是影响功率转换效率的主要因素. 为获得高功率转换效率, 通过对有源区量子阱、P 型和 N 型分布布拉格反射镜 (DBR) 等进行优化, 设计出了 905 nm VCSEL 的外延结构并进行了高质量外延生长. 成功制备出了不同氧化孔径的 905 nm VCSEL 器件, 获得的最大斜率效率为 1.12 W/A, 最大转换效率为 44.8%. 此外, 探究了氧化孔径对 VCSEL 的远场和光谱特性的影响. 这种具有高功率转换效率的 905 nm VCSEL 器件为激光雷达的小型化、低成本化提供了良好的基础数据.

关键词: 905 nm 垂直腔面发射激光器, 高功率转换效率, 外延结构设计, 器件制备

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.70.20210043

1 引言

垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 具有许多优异的特性, 如圆形光斑、低阈值、单纵模、高速调制、波长温漂小、易于二维集成等^[1–5], 已在数据通信, 短距离光互连中得到了广泛的应用^[6–10]. 近年来, 随着手机 3D 传感、虚拟与现实、手势识别等技术的兴起, VCSEL 在消费电子市场迅速崛起, 并呈现逐年增长的态势. 另外, 在距离探测、自动驾驶等领域, 高精度、小体积的激光雷达成为必不可少的关键部件. 其中, 905 nm 的半导体激光器成为激光雷达的主流核心光源, 这是因为空气中的水蒸汽对 905 nm 波段附近的激光具有较小的吸收. 此外, 905 nm 波段可以与成熟廉价的 Si 探测器以及具有高响应度的雪崩二极管探测器 (APD) 匹配. 在激光雷达中

应用时, VCSEL 相对于边发射激光器具有非常明显的优势. 首先, VCSEL 可以发射出圆形光斑, 这使后期的光学准直变得相对容易. 而边发射激光器的出射光是椭圆形光斑, 在水平和垂直方向会造成分辨率的不同. 其次, VCSEL 的激射波长温漂小, 通常为 0.065 nm/°C, 远小于边发射激光器的温漂 0.3 nm/°C, 这在实际应用时是非常关键的. 由于 VCSEL 温漂小, 可以采用窄窗口的滤波片, 防止更多的杂光进入探测端, 从而大大提高信噪比. 另外, VCSEL 可实现完整的片上制备流程和在片测试, 可以降低生产成本. 此外, 由于其较容易集成二维阵列, 可适应不同领域的输出功率需求.

目前国内外大多数 VCSEL 的研究集中于 808, 850, 980 nm 等波段^[11–17], 对于 905 nm VCSEL 研究较少. 据了解, 只有 TriLumina 公司初步报道了高峰值功率的 905 nm VCSEL 阵列的结果^[18], 以及 Zhang 等^[19]报道了 910 nm VCSEL 阵列实

* 国家自然科学基金 (批准号: 61804175)、中国科学院前沿科学重点研究计划 (批准号: ZDBS-LYJSC031) 和博新计划 (批准号: BX20200358) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xunmeng@ime.ac.cn

现了 100 W 峰值功率输出. 而对 905 nm VCSEL 的高功率转换效率的详细设计与制备的研究, 还未见报道. 在实际的应用中, VCSEL 的功率转换效率 (power conversion efficiency, PCE) 是非常关键的指标. 因为功率转换效率越高, 器件在相同的输出功率下会产生更少的热量, 有利于提高器件的可靠性和寿命, 同时也可降低设备散热成本, 提高电池的使用时长. 因此, 在移动设备和微型激光雷达等应用均要求激光光源具有高 PCE. 针对不同的应用, 不同波段的 VCSEL 的功率转换效率也有差别. 例如, 850 nm 波段多用于短距离光互联领域, 由于短腔长、低能耗的设计, VCSEL 的 PCE 一般在 30%—35% 之间^[20,21]; 1310 nm 和 1550 nm 波段可用于中远距离通信, 但由于有源区与 DBR 材料的不匹配, 外延和制备的难度较大, 使 VCSEL 的 PCE 一般低于 35%^[22,23]. 808 nm VCSEL 一般用于固体激光器的泵浦源, 目前报道的大功率 VCSEL 阵列的 PCE 可达 39% 以上^[24]. 对于 980 nm 波段, 由于 GaAs 材料对该波段透明, 因此 980 nm 的 VCSEL 可以设计成底发射结构, 很大程度上提高了器件的散热性能, 使其最大 PCE 可达 51.2%^[25].

本论文首先分析了 VCSEL 中影响 PCE 的主要因素, 然后对 905 nm VCSEL 的有源区、反射镜等外延结构进行了优化设计, 最后成功制备出具有高 PCE 的多种孔径的 905 nm VCSEL 器件, 并对其 LIV 特性、远场和光谱等进行了详细的测试分析.

2 905 nm VCSEL 外延结构设计与生长

VCSEL 的功率转换效率 (PCE) 与斜率效率、阈值电流和微分电阻的关系可以用以下公式表示^[26]:

$$\eta_{\text{pce}} = \eta_e [hv / (qV_0)] \left[\frac{I - I_{\text{th}}}{I(V_0 + IR_d)} \right], \quad (1)$$

其中, η_e 为 VCSEL 的斜率效率, q 为电荷量, hv 为光子能量, V_0 为激光器的开启电压, R_d 为激光器的微分电阻, I_{th} 为阈值电流. 当 $d\eta_{\text{pce}}/dI = 0$ 时, 可得到 PCE 峰值为

$$\eta_{\text{pce}}^{\text{peak}} = \eta_e [hv / (qV_0)] \left\{ \frac{\frac{V_0}{I_{\text{th}}R_d}}{\left[1 + \sqrt{1 + \frac{V_0}{I_{\text{th}}R_d}} \right]^2} \right\}, \quad (2)$$

由 (2) 式变形得到:

$$\eta_{\text{pce}}^{\text{peak}} = \eta_e \left[\frac{hv}{qV_0} \right] \left[1 - \frac{2}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{V_0}{I_{\text{th}}R_d}} \right)} \right], \quad (3)$$

由 (3) 式可以看出, 提高斜率效率、降低微分电阻和降低阈值电流都可以提高 PCE 的最大值. 为了进一步分析三者对峰值 PCE 影响的权重大小, 令 $\beta = V_0 / (I_{\text{th}}R_d)$, 假定阈值电流和微分电阻保持不变, 即 $[hv / (qV_0)][1 - 2 / (1 + \sqrt{1 + \beta})]$ 为常数. 此时, 峰值 PCE ($\eta_{\text{pce}}^{\text{peak}}$) 与斜率效率 η_e 的关系呈现正比例变化, 即当斜率效率提升 10%, 峰值 PCE ($\eta_{\text{pce}}^{\text{peak}}$) 也提升 10%. 如果假定斜率效率不变时, 峰值 PCE ($\eta_{\text{pce}}^{\text{peak}}$) 与 β 的微分关系为:

$$\frac{\Delta \eta_{\text{pce}}^{\text{peak}}}{\eta_{\text{pce}}^{\text{peak}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \beta}} \frac{\Delta \beta}{\beta}, \quad (4)$$

根据实际测试数据, 以 10 μm 氧化孔径的 VCSEL 为例, 其阈值电流 I_{th} 为 0.85 mA, 开启电压 V_0 为 1.43 V, 电阻 R_d 为 42.3 Ω , 实际计算得到 $\beta = 39.77$. 可以看出, 要想使峰值 PCE 提升 10%, 需要将阈值电流或微分电阻降低 64.03%. 因此, 斜率效率的变化对 PCE 的影响要比阈值电流和微分电阻对 PCE 的影响大得多. 要提高 VCSEL 的 PCE, 优先考虑提高斜率效率, 其次是降低阈值电流或电阻. 由于斜率效率与内量子效率成正比例关系^[27], 而内量子效率与量子阱增益、谐振腔等设计非常相关, 所以对量子阱以及谐振腔的设计尤为重要.

传统的 VCSEL 有源区一般采用 GaAs/AlGaAs 作为量子阱材料, 这种体系的量子阱结构简单, 易于生长. 为了提高量子阱微分增益, 采用具有应变的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱结构. 这是因为应变可以增大价带的曲率, 降低价带的有效质量, 使得准费米能级的间隔更为对称, 且两个准费米能级尽可能地接近带边, 降低了透明载流子浓度, 从而提高了有源区的微分增益^[28]. 值得注意的是, 有源区增益谱和腔模均会随温度上升而发生红移, 而增益谱的红移速度 (0.3 nm/°C 左右) 要比腔模的红移速度 (0.065 nm/°C 左右) 快, 因此需要设计一定的增益谱峰值与腔膜的失谐补偿, 一般为 10—15 nm. 利用 8-band $k \cdot p$ 能带理论^[29] 首先计算了量子阱宽度为 6 nm, 势垒层宽度为 8 nm 的不同 In 组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱增益谱的变化趋势, 如图 1 所示. 可以看出, 随着 In 组分的增大, 增益谱峰值发生红移.

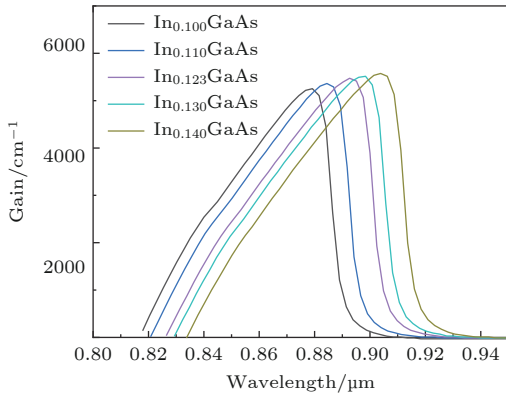


图 1 不同 In 组分下的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱增益谱 (载流子浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

Fig. 1. Gain spectra of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ QW with different In compositions (carrier concentration is $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

量子阱层厚度的增大也会使增益谱峰值发生红移. 在设计量子阱材料时, 需要同时调节阱层厚度和 In 组分的大小使增益峰值位于 892 nm 附近, 以得到 13 nm 左右的失谐波长. 为了得到更大的增益, 需要对阱层厚度和 In 组分进行优化. 图 2 为计算的势垒层厚度固定为 8 nm 时, 不同阱层厚度和 In 组分下的 3 对量子阱的增益峰值随载流子浓度的变化关系. 图 2 中设计的量子阱的增益峰值均位于 892 nm 附近. 从图中可以看出, 当阱层较厚时, 虽然获得固定的材料增益所需的载流子密度降低, 但是材料增益曲线的斜率下降, 也更容易出现饱和现象. 当阱层较窄时, 材料增益曲线斜率增大. 但是如果阱层厚度太窄, 基态能级上升, 那么基态与垒层顶端之间的能量差会变小. 由于载流子填充时首先要填充基态, 电子跳出阱层所需要克服的势垒会进一步降低, 那么载流子发生泄漏的概率会明显增加^[30]. 因此, 量子阱厚度太厚或太薄均会影响发光区的增益性能, 不利于器件的稳定工作. 经过综合考虑, 采用量子阱材料为 $\text{In}_{0.123}\text{GaAs}$, 阱厚度为 6 nm, 势垒层为 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 材料, 厚度为 8 nm.

VCSEL 谐振腔是由有源区、N 型和 P 型分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflectors, DBRs) 组成. DBRs 的优化设计对于 VCSEL 输出特性的提升也至关重要. P-DBRs 和 N-DBRs 的对数会影响腔面的反射率以及串联电阻. 由于电子的迁移率远大于空穴, 因此 N-DBRs 引起的串联电阻较小, 在设计时只考虑其反射率. 为了减小腔内损耗, 将 N-DBRs 的对数设计为 40 对, 使其反射率接近

100%. P-DBRs 的对数会对斜率效率和串联电阻有较大影响, 如果 P-DBRs 的对数过多, 虽然可以减小阈值电流, 但是会使斜率效率降低, 同时也会增大串联电阻. 考虑到斜率效率是影响 PCE 的主要因素, 在设计时需要适当减小 P-DBRs 的对数来获得高斜率效率. 图 3 为利用传输矩阵法^[28]计算的不同对数的 P 型 DBRs 的反射率. 当 P-DBRs 对数为 16, 18, 20, 22 时, 905 nm 波长处对应的反射率分别为 98.05%, 98.82%, 99.20%, 99.51%. P-DBRs 的对数选择需保证拥有足够的反射率 (一般 99% 以上) 实现激光器的激励. 由于 P-DBRs 对数的减少会引起阈值电流增大, 使获得高 PCE 的

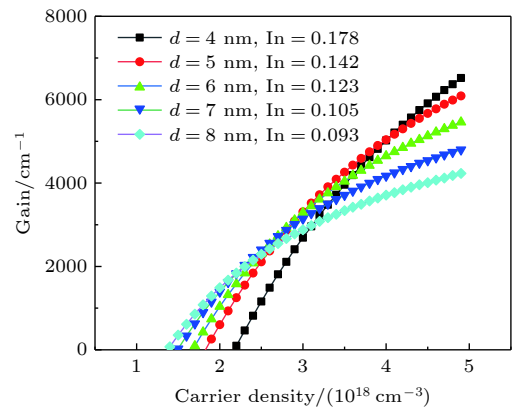


图 2 不同量子阱厚度、In 组分下的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱增益随载流子浓度的变化

Fig. 2. Gain spectra of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ QW with different well widths and In compositions versus carrier density.

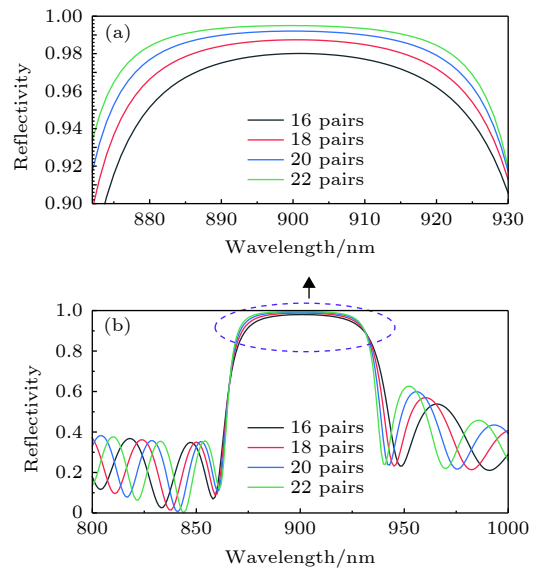


图 3 计算的不同对数的 P-DBRs 的反射谱

Fig. 3. Calculated reflection spectra of P-DBRs with different pairs.

工作电流也变大, 因此设计时也需要同时考虑 VCSEL 器件实际工作的电流范围. 根据实验测得, 当 P 型 DBR 对数为 22 对时, 阈值电流和斜率效率分别为 0.55 mA 和 0.87 W/A. 当 P 型 DBR 对数为 20 对时, 阈值电流和斜率效率分别为 0.85 mA 和 1.11 W/A. 可以看出, P 型 DBR 减小 2 对后, 斜率效率获得了较大提升, 而且阈值也在合适的范围. 当 P 型 DBR 对数减小为 18 对时, 阈值电流增大到 1.2 mA, 斜率效率稍微增大, 为 1.13 W/A. 经过折中考虑, 选取的 P-DBRs 为 20 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 组成, 为减小材料间势垒, 中间插入 20 nm 的 AlGaAs 组分渐变层.

设计完成后, 利用型号为 Axitron G4 的 MOCVD 设备进行外延生长. 首先, 在 N 型掺杂的 GaAs 衬底上交替生长 40 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 的 N-DBRs, 为了减小材料间势垒, 中间插入生长 20 nm 的 AlGaAs 渐变层; 然后, 生长 $\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$ 限制层和 3 对 $\text{In}_{0.123}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱; 之后生长 20 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层, 作为氧化限制层; 再交替生长 20 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 的 P 型 DBRs, 最后, 生长重掺杂的 P 型欧姆接触层. 完成外延生长后, 测试了外延片的白光反射谱和 PL 谱, 分别如图 4(a),(b) 所示. 测试的腔模位置位于 903.7 nm 附近, 与设计值接近. 量子阱 PL 谱的峰值为 893.7 nm, 半高全宽 (FWHM) 为 21.6 nm, 说明量子阱的生长质量较好.

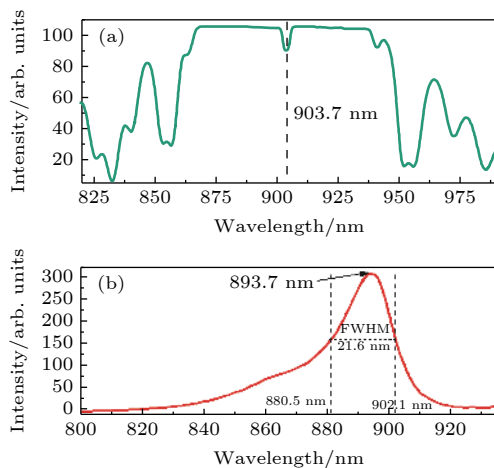


图 4 测试的 905 nm VCSEL 外延片的 (a) 白光反射谱和 (b) PL 谱

Fig. 4. Measured (a) white light reflection spectrum and (b) PL spectrum of 905 nm VCSEL epitaxial wafer.

3 器件制备与测试分析

利用生长的 905 nm VCSEL 外延片, 制备了氧化孔径为 6—18 μm 多种 VCSEL 器件. 器件的具体制备过程如下: 首先, 采用电子束蒸发法制备 P 型欧姆接触电极; 然后, 通过电感耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀 P-DBR 后, 露出高铝组分的 $\text{Al}_{0.98}\text{GaAs}$ 层, 蚀刻深度由原位反射率测量系统监控; 之后在 400 $^{\circ}\text{C}$, $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ 环境下对 $\text{Al}_{0.98}\text{GaAs}$ 层进行湿法氧化形成 Al_xO_y , 实现对光场和电流的同时限制; 接下来, 生长 SiN_x 层形成钝化层, 防止 N-DBR 与 P 型电极接触导致器件漏电; 然后在刻蚀的沟道内电镀厚金以增加横向热传导, 减薄衬底至 150 μm 后蒸发 AuGeNi/Au N 型电极. 最后, 在 350 $^{\circ}\text{C}$ 氮气环境中快速热退火, 形成良好的欧姆接触, 完成 VCSEL 器件的制备. 图 5 为制备的 VCSEL 器件的结构示意图.

在室温下对制备的 VCSEL 器件进行了测试, 采用的测试系统主要包括: 探针台、校准的光电探测器、半导体参数分析仪 (Keithley 236)、高精度的电流源 (Keithley 2601 B)、光束质量分析仪 (Spiricon SP928) 以及高分辨率光谱分析仪 (Advantest Q8384). 测得不同氧化孔径的 905 nm VCSEL 器件在连续电流条件下的光功率-电流-电压 (LIV) 特性曲线如图 6(a),(b) 所示. 提取的阈值电流、最大功率、饱和电流和阈值损耗功率如图 6(c)—6(f) 所示. 可以看出, 阈值电流随着氧化孔径的增大而增大, 最大输出功率和饱和电流随着氧化孔径的增大呈现近似线性的变化. 当氧化孔为 6 μm 时, 最大出光功率达到 10.5 mW, 阈值电流为 0.35 mA; 当氧化孔为 18 μm 时, 最大出光功率达到 32.8 mW, 阈值电流为 2.1 mA. 氧化孔径越大, 微分电阻越小, 而且热翻转电流越大, 分别如图 6(b) 和 6(e) 所示.

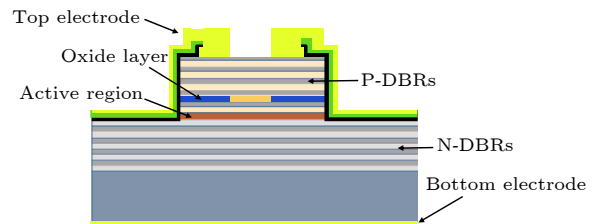


图 5 VCSEL 器件结构示意图

Fig. 5. Schematic diagram of VCSEL device structure.

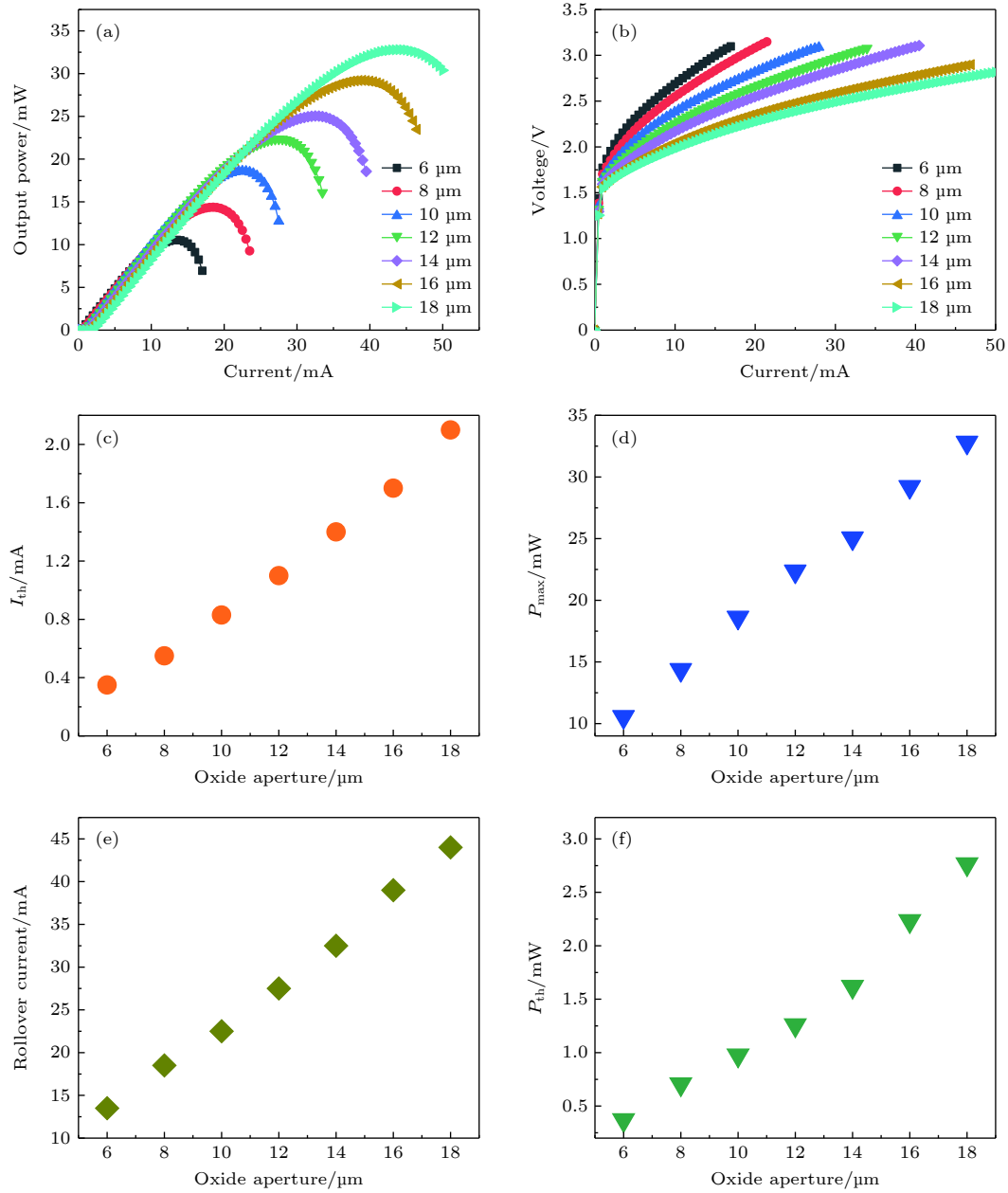


图 6 不同氧化孔径的 VCSEL 对应的 (a) 输出功率-电流特性; (b) 电压-电流特性; (c) 阈值电流; (d) 最大功率; (e) 饱和电流; (f) 阈值损耗功率

Fig. 6. (a) L - I characteristics; (b) V - I characteristics; (c) threshold currents; (d) maximum output powers; (e) roll-over currents; (f) threshold power consumption of VCSELs with varied oxide apertures.

图 7(a) 为不同氧化孔径的 VCSEL 对应的斜率效率随注入电流的变化曲线, 其对应的最大斜率效率被提取在图 7(b) 中. 其中, 氧化孔为 10 μm 的 VCSEL 对应的峰值斜率效率最高, 达到 1.12 W/A, 其他氧化孔径的峰值斜率效率也能达到 1.05 W/A 以上. 这说明实验制备的 VCSEL 具有较高的斜率效率, 与外延设计的预期结果相符. 不同氧化孔下的 PCE 随注入电流的变化曲线如图 7(c) 所示, 随着注入电流的增大, PCE 的变化呈现先快速增大,

达到峰值后缓慢下降的趋势. 可以发现, 氧化孔径越大, PCE 达到峰值后随注入电流的下降速度越缓慢. 不同氧化孔径下的 VCSEL 的最大 PCE 的值处于 42.2%—44.8% 范围内. 其中, 氧化孔为 10 μm 时, VCSEL 的峰值 PCE 最大, 为 44.8%. 即使在氧化孔径为 18 μm 时, 仍然可以得到 42.2% 以上的 PCE, 如图 7(d) 所示. 可以看出, 研制的 905 nm VCSEL 器件具有非常高的 PCE. 高 PCE 的 905 nm VCSEL 对于高性能激光雷达的应用具有重要意

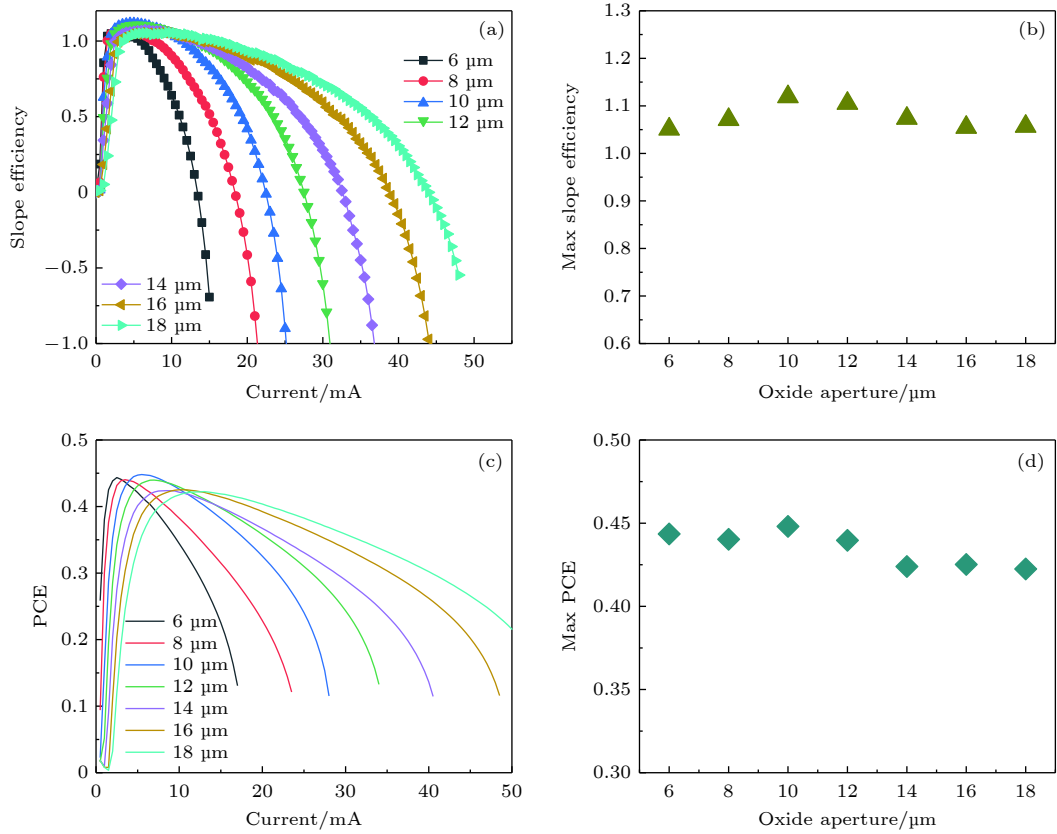


图 7 测试的不同氧化孔径的 VCSEL 的 (a) 斜率效率; (b) 提取的最大微分斜率效率; (c) PCE; (d) 提取的最大 PCE 的值
Fig. 7. Measured (a) slope efficiency; (b) extracted maximum differential slope efficiency; (c) PCE and (d) extracted maximum PCE for VCSELs with varied oxide apertures.

义. 可以观察到, PCE 随氧化孔径的变化趋势与斜率效率随氧化孔径的变化趋势基本一致, 验证了前文中的结论, 即斜率效率对 PCE 的贡献最大.

通过测试不同氧化孔径下的 VCSEL 的远场和光谱图案. 图 8 所示为注入 10 倍阈值电流的结果. 当氧化孔径为 6 μm , 注入电流为 2.5 mA 时, 远场光强分布较为均匀, 此时 $1/e^2$ 处对应的发散角为 18.8° . 从激射的光谱图中可以看到, 此时仅有 3 个峰值, 分别为 901.22, 901.8 和 902.5 nm. 当氧化孔径为 10 μm , 注入电流为 6.9 mA 时, 远场中心强度相对于边缘位置变弱, 呈现类似于环状分布, 此时的发散角为 23.5° . 激射的光谱图中出现多个峰值, 且每个峰值的间距变小, 这是由于大氧化孔径下会有更多的高阶模式激射的结果, 成为导致发散角增大的主要因素. 当氧化孔径为 14 μm 和 18 μm 时, 远场图的中心强度变得更弱, 发散角也变的更大, 分别为 25.5° 和 28.0° , 这是由于更多的模式激射以及电流注入不均匀造成的. 此时的光谱出现更多的峰值, 并且间隔变得更小. 可以得出, 随着氧化孔径的增大, 远场发散角变大, 远场中心

强度变弱, 光谱宽度变大, 各横向模式间隔变小. 虽然大氧化孔径可以得到更高的输出功率, 但光谱和光束质量会变差, 因此在实际应用中需要在诸多因素中权衡考虑.

4 结 论

成功设计并制备出具有高 PCE 的 905 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL). 探究了氧化孔径对光功率、阈值电流、斜率效率、PCE、远场和光谱特性的影响. 论证了斜率效率是影响 VCSEL PCE 的主要因素, 给出了获得高功率转换效率的设计方法. 在 10 μm 氧化孔径下, 得到的 905 nm VCSEL 的最大 PCE 达到 44.8%. 此外, VCSEL 远场发散角和光谱线宽均随氧化孔径的增大而增大. 当氧化孔径增大时, 更多的高阶模式激射导致远场发散角会增大, 模式间隔会减小. 因此, 在实际的应用中, 需根据 VCSEL 器件的应用场景对器件结构和外延进行特定的设计和优化.

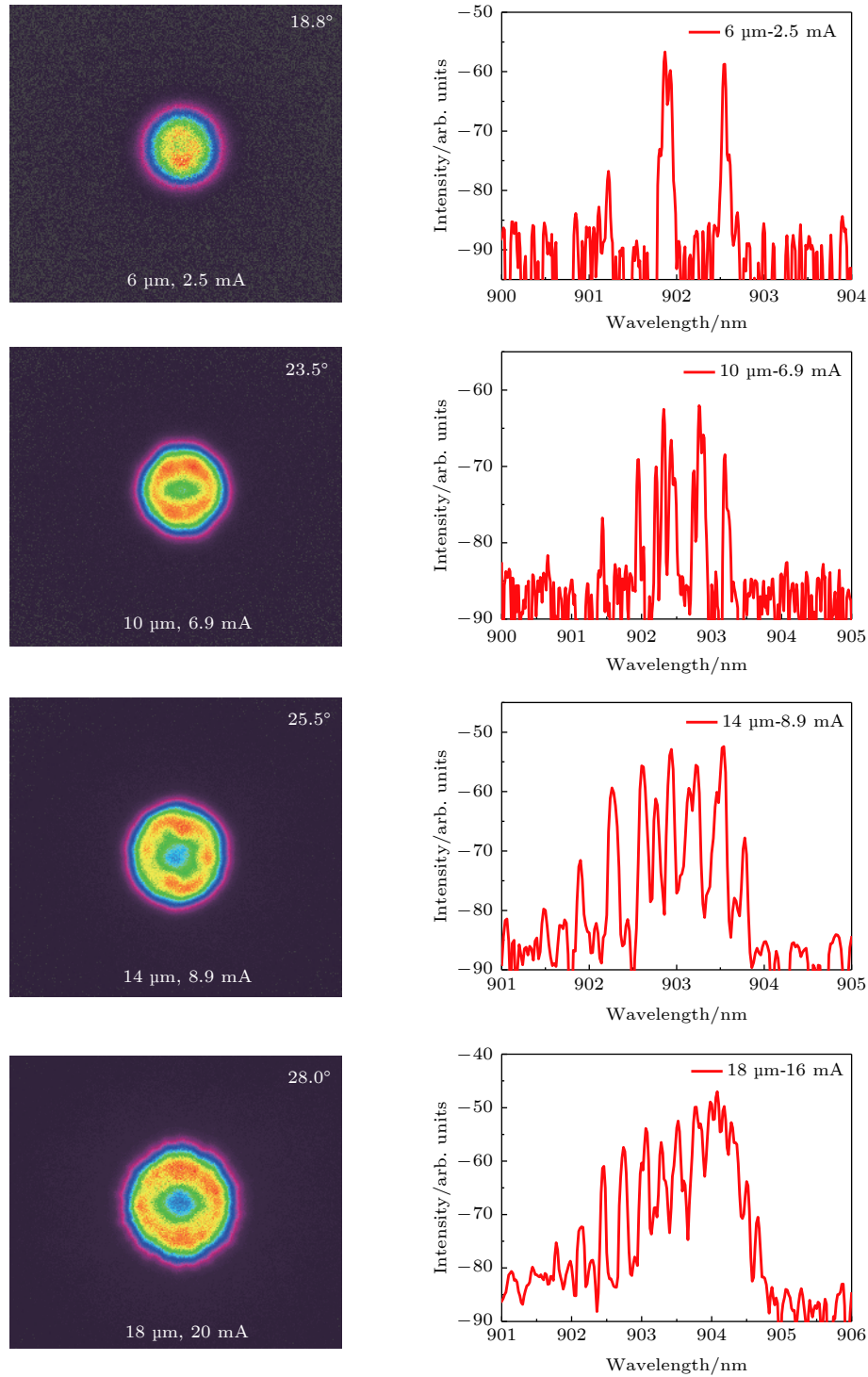


图 8 不同氧化孔径的 VCSEL 的远场和光谱

Fig. 8. Far-field and spectra of VCSELs with different oxide apertures.

参考文献

- [1] Huffaker D L, Deppe D G 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 97
- [2] Zhang X, Zhang Y, Zhang J W, Zhang J, Zhong C Y, Huang Y W, Ning Y Q, Gu S H, Wang L J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 134204 (in Chinese) [张星, 张奕, 张建伟, 张建, 钟础宇, 黄佑文, 宁永强, 顾思洪, 王立军 2016 *物理学报* **65** 134204]
- [3] Larisch G, Moser P, Lott J A, Bimberg D 2016 *IEEE Photonic Technol. Lett.* **28** 2327
- [4] Jaeger, R, Grabherr, M, Jung, C, Michalzick, Reiner, G, Weigl 1997 *Electron. Lett.* **33** 330
- [5] Yang X, Li M X, Zhao G, Freisem S, Deppe D G 2014 *Electron. Lett.* **50** 1864
- [6] Mukoyama N, Otoma H, Sakurai J, Ueki N, Nakayama H 2008 *Proc. SPIE* **6908** 690815
- [7] Seurin J F, Zhou D, Xu G, Miglo A, Ghosh C 2016 *Proc. SPIE* **9766** 97660D
- [8] Larsson A 2011 *IEEE J. Sel.Top. Quantum Electron.* **17** 1552

- [9] Harris J S, Sullivan T O, Sarmiento T, Lee M M, Vo S 2010 *Semicond. Sci. Technol.* **26** 14010
- [10] Zhou D, Seurin J F, Xu G, Leeuwen R V, Miglo A, Wang Q, Kovsh A, Ghosh C 2017 *Proc. SPIE* **10122** 1012206
- [11] Hao Y Q, Ma J L, Yan C L, Liu G J, Zhao Y J 2013 *Laser Physics Letters* **10** 527
- [12] Pan G Z, Xie Y, Xu C, Xun M, Dong Y, Deng J, Chen H, Sun J 2018 *IEEE J. Quantum Electron.* **54** 1
- [13] Zhong C, Zhang X, Hofmann W H E, Ning Y Q, Wang L J 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 1
- [14] Huang C Y, Wang H Y, Wu C H, Lo W C, Lin G R 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 573
- [15] Xun M, Xu C, Xie Y, Deng J, Xu K, Chen H 2014 *IEEE J. Quantum Electron.* **51** 1
- [16] Hao Y Q, Feng Y, Wang F, Yan C L, Zhao Y J, Wang X H, Wang Y X, Jiang H L, Gao X 2011 *Acta Phy. Sin.* **60** 064201 (in Chinese) [郝永芹, 冯源, 王菲, 晏长岭, 赵英杰, 王晓华, 王玉霞, 姜会林, 高欣 2011 物理学报 **60** 064201]
- [17] Zhou G Z, Rao S, Yu H Y, Lv C C, Wang Q, Zhou T B, Li Y, Lan T, Xia Y, Lang L G, Cheng L W, Dong G L, Kang L H, Wang Z Y 2018 *Acta Phy. Sin.* **67** 104205 (in Chinese) [周广正, 尧舜, 于洪岩, 吕朝晨, 王青, 周天宝, 李颖, 兰天, 夏宇, 郎陆广, 程立文, 董国亮, 康联鸿, 王智勇 2018 物理学报 **67** 104205]
- [18] Warren M E, Carson R F, Joseph J R, Wilcox T, Dacha P, D. Abell J, Otis K J 2015 *Proc. SPIE* **9381** 93810C
- [19] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, Qiu J, Zeng Y G, Fu X H, Zhang J Y, Qin L, Wang L J 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 100302
- [20] Chen X N, Shi J W, Chi K L, Y J L, Chen Jaso 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 3242
- [21] Nanni J, Fernandez L, Hadi M U, Viana C, Tartarini G 2020 *Electron. Lett.* **56** 385
- [22] Caliman A, Mereuta A, Wolf P, Sirbu A, Iakovlev V, Bimberg D, Kapon E 2016 *Opt. Express* **24** 16329
- [23] Chase C, Yi R, Hofmann W, Chang-Hasnain C J 2010 *Opt. Express* **15** 15461
- [24] Li X P, Peng Q J, Xu Z Y, Zhang X D, Wang X J 2020 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **32** 434
- [25] Seurin J F, Ghosh C L, Khalfin V, Miglo A, Xu G, Wynn J D, Pradhan P, D'Asaro L A 2008 *Proc. SPIE* **6908** 690808
- [26] Kressel, Henry 1977 *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs* (New York: Academic) pp459–465
- [27] Coldren, Larry A 1995 *Opt. Eng.* **36** 616
- [28] Yu H Y, Yao S, Zhang H M, Wang Q, Zhang Y, Zhou G Z, Lv Z C, Cheng L W, Lang L G, Xia Y 2019 *Acta Phy. Sin.* **68** 064207 (in Chinese) [于洪岩, 尧舜, 张红梅, 王青, 张杨, 周广正, 吕朝晨, 程立文, 郎陆广, 夏宇 2019 物理学报 **68** 064207]
- [29] Fujisawa T, Sato T, Mitsuhashi M, Kakitsuka T, Yamanaka T, Kondo Y, Kano F 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 1183
- [30] Zhou M, Zhao D G 2016 *Acta Phy. Sin.* **65** 077802 (in Chinese) [周梅, 赵德刚 2016 物理学报 **65** 077802]

Design and fabrication of 905 nm vertical cavity surface emitting laser with high power conversion efficiency^{*}

Zhao Zhuang-Zhuang Xun Meng[†] Pan Guan-Zhong Sun Yun

Zhou Jing-Tao Wang Da-Hai Wu De-Xin

(Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 8 January 2021; revised manuscript received 30 January 2021)

Abstract

Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) have lots of excellent properties, such as circular beam, low threshold, single longitudinal mode, high speed modulation and monolithic array fabrication capability. The VCSELs have been widely used in data communication and short-distance optical interconnection. In the fields of distance detection and automatic driving, high accuracy lidars have become an indispensable component. In practical applications, 905 nm laser exhibits little absorption by the water vapor in the air. In addition, the 905 nm laser can match with both inexpensive Si detector and high response avalanche photodiode (APD). Therefore, the 905 nm semiconductor laser has become a key light source of lidar. This paper presents the design and fabrication of 905 nm VCSEL with high power conversion efficiency. First, the main factors influencing the power conversion efficiency (PCE) of VCSEL are analyzed theoretically. It is concluded that the slope efficiency contributes to the PCE most. In order to achieve a high slope efficiency, strained InGaAs is used as a quantum well material. Due to the wavelength redshift caused by the thermal effect, the lasing peak wavelength of the multiple quantum well (MQW) is designed to be about 892 nm by optimizing the In composition. The active region consists of three pairs of $\text{In}_{0.123}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{MQWs}$. The N-distributed Bragg reflectors (DBRs) are designed to have 40 pairs of $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$, and the P-DBRs are designed to have 20 pairs of $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$. The epitaxial structure is designed and grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The cavity mode of the epitaxial wafer is around 903.7 nm. The photoluminescence (PL) spectrum is also measured. The peak wavelength is approximately 893.7 nm, and the full width at half maximum is 21.6 nm. Then, the 905 nm VCSELs with different apertures (6–18 μm) are fabricated via semiconductor technologies such as photolithography, evaporation, inductively coupled plasma (ICP), wet oxidation, electroplating, etc. Finally, the L-I-V characteristics and spectra of VCSELs with different apertures are tested. The obtained maximum slope efficiency and PCE of the devices are 1.12 W/A and 44.8%, respectively. In addition, the influences of aperture size on the far-field profiles and spectra of the devices are investigated. These 905 nm VCSELs with high PCE are potential for the miniaturization and lowering the cost of LiDAR.

Keywords: 905 nm vertical cavity surface emitting laser, high power conversion efficiency, epitaxial structure design, device fabrication

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.70.20210043

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61804175), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant No. ZDBS-LYJSC031), and the Project Funded by China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. BX20200358).

[†] Corresponding author. E-mail: xunmeng@ime.ac.cn