

具有多 MO 喷嘴垂直 MOCVD 反应腔外延层厚度均匀性的优化理论及应用*

李建军[†] 崔屿峥 付聪乐 秦晓伟 李雨畅 邓军

(北京工业大学, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

(2023 年 9 月 23 日收到; 2023 年 10 月 31 日收到修改稿)

金属有机物化学气相淀积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 作为异质结半导体材料外延的关键手段, 其外延层厚度均匀性会直接影响产品的良率. 本文将理论与实验相结合, 针对 3 个 MO 源喷嘴的垂直反应腔 MOCVD, 将各 MO 源喷嘴等效为蒸发面源, 并引入一等效高度来涵盖 MOCVD 的相关外延参数, 建立外延层厚度与各 MO 源喷嘴流量间的定量关系, 设计并利用 EMCORE D125 MOCVD 系统外延生长了 AlGaAs 谐振腔结构, 根据实验测得的外延层厚度分布结果, 利用最小二乘法对模型参数进行了拟合提取, 基于提取的模型参数, 给出了优化外延层厚度均匀性的方法. 4 in (1 in = 2.54 cm) 外延片 mapping 反射谱的统计结果为, 腔模的平均波长为 651.89 nm, 标准偏差为 1.03 nm, 厚度均匀性达到 0.16%. 同时外延生长了 GaInP 量子阱结构, 4 in 外延片 mapping 荧光光谱的统计结果为, 峰值波长平均值为 653.3 nm, 标准偏差仅为 0.46 nm, 厚度均匀性达到 0.07%. 本文提出的调整外延层厚度均匀性的方法具有简单、有效、快捷的特点, 且可以进一步推广至具有 4 个 MO 喷嘴以上的垂直反应腔 MOCVD 系统.

关键词: 外延生长, 最小二乘拟合, 薄膜均匀性, 金属有机物化学气相沉积

PACS: 68.55.ag, 81.15.Aa, 81.15.Gh, 77.55.Px

DOI: 10.7498/aps.73.20231555

1 引言

20 世纪 60 年代 Manasevit^[1] 提出了金属有机物化学气相淀积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 外延技术, 他在蓝宝石衬底上进行了不同 III-V 族材料的异质结外延生长, 但当时的外延层质量远远低于液相外延 (liquid phase epitaxy, LPE) 和氯化物气相外延 (Cl-vapor phase epitaxy, Cl-VPE) 技术生长的外延层质量^[2]. 随着 MOCVD 的原材料纯度的提高、生长工艺的改进, 逐渐引起人们的兴趣并进行了广泛的研究, 如今 MOCVD 技术已成为异质结晶体管 (hetero-junction bipolar transistor, HBT)、发光二极管

(light emitting diodes, LED)、激光二极管 (laser diodes, LD)、光探测器 (photon detectors, PD) 和太阳能电池等异质结半导体器件制备的关键性技术^[3-7]. 近年来, 由于半导体器件向着微型化、集成化发展, 对于大面积生长的外延层质量有着更高的要求. 2021 年, Wang 等^[8] 对化学气相沉积反应的过程进行分析, 并总结了制备大面积二维材料的调控方法; 2022 年, Liu 等^[9] 对二维单晶材料表面纳米级调控进行了归纳总结. 所以, 对于异质结半导体器件, 其外延层厚度的精确控制至关重要. 例如: 1) 对于以量子阱 (quantum well, QW) 为有源区的 LD 来说, QW 的阱区厚度会影响阱中子能级的位置^[10], 进而改变子能级间的跃迁波长, 即 LD 的激射波长; 2) 对于垂直腔面发射激光器 (vertical

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0209003) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4222060) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

cavity surface emitting laser, VCSEL) 外延层厚度不但会影响 QW 有源区的波长, 还会决定其腔模波长及分布式布拉格反射镜 (DBR) 的峰值反射波长, 这三个波长如不能很好地匹配, 器件的性能不仅会降低甚至可能不激射 [11]; 3) 对于 HBT 来说, 基区的厚度会影响器件的增益特性和频率特性 [12]. 因此, 不论是研发阶段对样品结果一致性的要求, 还是规模化生产中对高成品率、低成本的要求, 都希望外延片的厚度均匀性越高越好, 以保证同批次各分立器件的性能一致.

为提高外延层厚度均匀性, 两大主流 MOCVD 设备厂商都对系统的核心反应腔部分进行了独特设计. 德国 AIXTRON 公司采用的是行星卫星式衬底托盘的水平反应腔结构 [4,13], 在外延过程中, 各衬底片不但在子托盘上自转, 各子托盘还在整个大盘上进行公转, 从而使外延片的均匀性大为提高. 美国 VEECO(前 EMCORE) 公司采用的则是垂直反应腔结构 [14,15], 通过多个 MO 源喷嘴的流量匹配及高速旋转的衬底托盘, 实现沿托盘径向的外延层厚度调控.

相比而言, VEECO 公司的 MOCVD 系统的生产效率、后序维护成本低. 之前, 我们曾利用 Fluent 流体动力学软件对垂直反应腔内部的气流场和温度场进行了模拟 [16,17], 结果表明, 该方法在宏观层面上对于优化温度、气流量、衬底转速和压强等条件的匹配是有效的. 然而, 实际的 MOCVD 外延是一个复杂的过程, 理论模拟只能给出一个优化的趋势, 当需要在微观层面上精确到纳米量级调控厚度均匀性时, 该方法是无能为力的. 另外, 利用 Fluent 软件模拟的另一个问题是计算工作量, 特别是涉及精确的三维模拟时, 计算量更大. 更进一步, 对于具有多个 MO 喷嘴的垂直反应腔, 虽然设备商提供了通过调节各 MO 喷嘴流量来提高厚度均匀性的手段, 然而到目前为止, 对于如何具体调整各 MO 源喷嘴流量来提高外延层厚度的均匀性, 相关的理论和实验方法都未见专门的报道.

本文针对多 MO 喷嘴垂直 MOCVD 反应腔的外延层厚度均匀性问题, 结合 Holland 和 Steckelmacher 的真空蒸镀沉积理论 [18], 将各 MO 喷嘴等效为一蒸发面源, 首先建立了各 MO 喷嘴流量与外延层厚度的理论模型, 并将理论与实验相结合, 利用最小二乘法提取相关模型参数, 之后针对厚度均匀性给出了优化各 MO 喷嘴流量的方法. 该方

法简单、高效且易于实施.

2 理论模型

为了从理论上得到外延层厚度与 MO 源流量间的关系, 建立了具有多个 III 族 MO 源喷嘴的垂直 MOCVD 反应腔简化模型, 如图 1 所示. 主载气 H_2 , V 族氢化物和 III 族 MO 源从顶部的法兰注入反应室, 在主载气的推送及下游真空泵抽取的作用下, V 族和 III 族源被输运到位于加热托盘的衬底上方发生化学反应, 进而在衬底上实现材料的外延生长. 为了对外延材料的厚度均匀性进行控制, MO 源在顶部法兰处沿径向被分配给 3 个喷嘴, 距法兰中心 O' 的距离分别为 y_{in} , y_{mid} 和 y_{out} , 流经各喷嘴的气体流量 (包括 MO 源和载气 H_2) 分别为 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} . 另外, 衬底托盘绕 OO' 轴高速旋转. 针对图 1 所示反应腔模型, 在材料外延过程中做如下假设:

- 1) 所有外延参数 (衬底温度、反应室压力、主载气流量、V 族源流量、III 族源流量、衬底托盘转速等) 保持不变;
- 2) 衬底温度控制在质量流量控制区, 即外延层的生长速率受控于输运到衬底的反应剂的量;
- 3) 通过主载气流量、反应室压力及衬底托盘转速的合理匹配, 反应室中的气流场为线流形式, 不存在涡流, 即 V 族源和 III 族源的反应只发生在衬底表面;
- 4) V/III 比足够高, 外延速率只决定于 III 族 MO 源的流量;

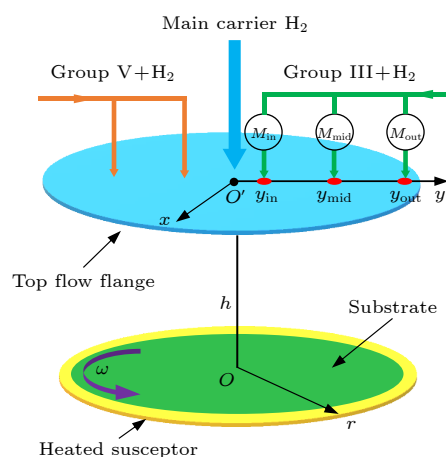


图 1 一种多个 III 族 MO 喷嘴垂直 MOCVD 反应腔的简化模型

Fig. 1. Simplified chamber model of the vertical MOCVD reactor with multiple group III MO injectors.

5) 对于流经各 MO 喷嘴在衬底托盘上的 MO 源分布, 可用一蒸发面源来等效各 MO 喷嘴, 即 MO 源在衬底表面服从余弦分布 [18,19].

由于衬底托盘高速旋转, 衬底上外延层的厚度 t 仅与径向半径 r 有关. 根据假设 2)–4), t 的大小仅决定于 III 族 MO 源在衬底表面的分布, 进一步根据假设 5), 当 MO 源仅流经第 i ($i = \text{in, mid, out}$) 个 MO 喷嘴, 而其他 MO 喷嘴的流量为零时, 衬底表面外延层的归一化厚度为

$$t_g^i(r) = \frac{t_i(r)}{t_i(0)} = \frac{(h^2 + y_i^2 + r^2)(h^2 + y_i^2)^2}{[(h^2 + r^2 + y_i^2)^2 - 4y_i^2 r^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

式中, $t_i(r)$ 是由流经第 i 个喷嘴的 MO 源在 r 点产生的外延层厚度; h 是顶部法兰到衬底表面的高度. 需要说明的是, t_g^i 是一归一化的无量纲量, 仅决定于反应腔的结构参数 h 和 y_i . 当 $r = 0$ 时, $t_g^i = 1$.

实际上, 图 1 所示的 MOCVD 反应腔比蒸发系统的腔体要复杂得多, 体现为: MOCVD 的衬底温度、反应室压力以及托盘旋转速度更高, 高速旋转的托盘会产生泵吸效应 [20], 且 MOCVD 还有 V 族源、分载气以及大量主载气流入反应室, 另外从各喷嘴注入的 MO 源对反应室内的气流场也会产生扰动. 为此, 对 (1) 式的常规蒸发模型进行修正, 将 h 用一等效高度 h_{eff} 进行替换, 修正后的 (1) 式改写为

$$t_g^i(r) = \frac{t_i(r)}{t_i(0)} = \frac{(h_{\text{eff}}^2 + y_i^2 + r^2)(h_{\text{eff}}^2 + y_i^2)^2}{[(h_{\text{eff}}^2 + r^2 + y_i^2)^2 - 4y_i^2 r^2]^{3/2}}. \quad (2)$$

需要强调的是, h_{eff} 隐含了所有 MOCVD 外延参数的作用, 如衬底温度、反应室压力、衬底转速、V/III 比, 主载气流量等, 任何参数的改变都会引起 h_{eff} 的改变. 根据假设 (1), 在外延过程中, 由于所有外延参数保持不变, 因此 h_{eff} 是一常数.

以典型的 EMCORE D125 MOCVD 系统为例, 衬底托盘的直径为 125 mm, 表 1 给出了 (2) 式中其他的反应腔结构参数. 当 $h_{\text{eff}} = 27$ mm 时, 图 2 给出了各 t_g^i 曲线, r 的最大值为 50 mm, 相应于 4 in 衬底的半径. 可以看出, 流经喷嘴 in 的 MO 源主要分布在托盘的中心处, 流经喷嘴 out 的 MO 源主要分布在托盘边缘处, 而由喷嘴 mid 注入的 MO 源则分布在峰值 $r = 27.5$ mm 的附近. 不管怎么说, 流经任一喷嘴的 MO 源对托盘上任

何位置 r 处的外延层厚度都会产生影响, 因此, 外延片上各点的外延层厚度受控于各个 MO 源喷嘴流量的相对大小.

表 1 EMCORE D125 MOCVD 腔室的结构参数
Table 1. Structure parameters of the EMCORE D125 MOCVD chamber.

y_{in}/mm	y_{mid}/mm	y_{out}/mm
10	32.5	53

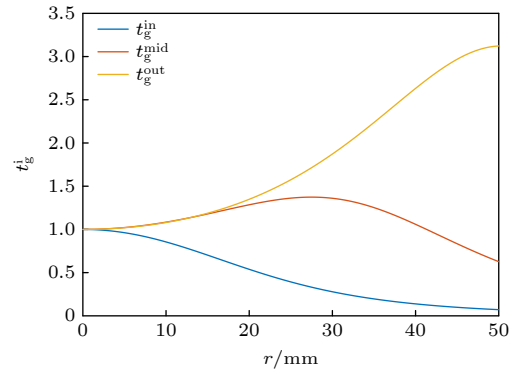


图 2 对应于每个 MO 喷嘴的相对外延层厚度

Fig. 2. Relative epitaxial layer thickness corresponding to each MO injector.

在实际外延过程中, MO 源将会流经三个 MO 源喷嘴, 因此外延层的总厚度 t 表示为

$$t(r) = \sum_i t_i(r) = t_{\text{in}}(r) + t_{\text{mid}}(r) + t_{\text{out}}(r), \quad (3a)$$

$$t_i(r) = t_i(0) t_g^i(r), \quad (3b)$$

$$t_i(0) = M_i \alpha_i \quad (i = \text{in, mid, out}), \quad (3c)$$

其中, t_i 是流经第 i 个喷嘴的 MO 源对外延层厚度的贡献; M_i 是流经第 i 个 MO 源喷嘴的气流量, 单位是 sccm; α_i 是对于第 i 个喷嘴, 气体单位流量产生的 $r = 0$ 处的外延层厚度, 单位是 nm/sccm. α_i 与 MO 源转化为外延层的效率有关, 并与外延时间成正比.

根据 (2) 式和 (3) 式, 决定外延层厚度的参数可分为三类: 1) 反应腔结构参数 y_{in} , y_{mid} 和 y_{out} . 对于已制备好的反应腔, 这些参数是不能改变的. 2) 外延过程关联参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} . 外延条件 (温度、压力、V/III 比、衬底转速、主载气流量、生长时间等) 确定后, 这些参数也是基本不变的. 3) 工艺参数 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} . 通过调整这些参数的相对大小, 可实现外延层厚度均匀性的控制. 当上述三类参数都确定后, 即可由 (3) 式求得外延片上各点的外延层厚度.

3 提取模型参数

根据 (2) 式和 (3) 式, 反应腔结构参数 (y_{in} , y_{mid} 和 y_{out}) 固定后, 对于设定的工艺参数 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} , 如果希望得到外延层的厚度, 就必须知道过程关联参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} . 本节根据实验测得的外延层厚度结果, 利用最小二乘法拟合来提取这些关联参数, 并给出应用示例.

3.1 通过最小二乘法提取模型参数

外延过程结束后, 沿衬底托盘的径向, 分别测试 N 个点 r_j 处的外延层厚度 $T(r_j)$ ($j = 1, 2, \dots, N$), 简记为 T_j . 根据最小二乘法 [21], 拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} 应满足下式:

$$Q(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \sum_{j=1}^N [T_j - t(r_j)]^2 = \text{MIN}, \quad (4)$$

式中, MIN 表示对于选取的拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} , 应使得 Q 的取值为最小. 需要注意的是, (4) 式中的 $t(r_j)$ 隐含了拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} .

求 (4) 式中 Q 的极小值问题可转化为以下四个方程组的求解,

$$F_{\text{in}}(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \frac{\partial Q}{\partial \alpha_{\text{in}}} = 0, \quad (5a)$$

$$F_{\text{mid}}(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \frac{\partial Q}{\partial \alpha_{\text{mid}}} = 0, \quad (5b)$$

$$F_{\text{out}}(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \frac{\partial Q}{\partial \alpha_{\text{out}}} = 0, \quad (5c)$$

$$F_h(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \frac{\partial Q}{\partial h_{\text{eff}}} = 0. \quad (5d)$$

将 (4) 式代入上述各式, 可以很容易地写出各式的具体形式, 即

$$F_{\text{in}}(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \sum_{j=1}^N [T_j - t(r_j)] t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) = 0, \quad (6a)$$

$$F_{\text{mid}}(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \sum_{j=1}^N [T_j - t(r_j)] t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) = 0, \quad (6b)$$

$$F_{\text{out}}(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}}) = \sum_{j=1}^N [T_j - t(r_j)] t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) = 0, \quad (6c)$$

$$F_h(\alpha_{\text{in}}, \alpha_{\text{mid}}, \alpha_{\text{out}}, h_{\text{eff}})$$

$$= \sum_{j=1}^N [T_j - t(r_j)] \frac{\partial t(r_j)}{\partial h_{\text{eff}}} = 0, \quad (6d)$$

其中,

$$\frac{\partial t(r_j)}{\partial h_{\text{eff}}} = \sum_i \frac{\partial t_i(r_j)}{\partial h_{\text{eff}}}, \quad (7a)$$

$$\frac{\partial t_i(r_j)}{\partial h_{\text{eff}}} = M_i \alpha_i \frac{\partial t_{\text{g}}^i(r_j)}{\partial h_{\text{eff}}}, \quad (7b)$$

$$\frac{\partial t_{\text{g}}^i(r_j)}{\partial h_{\text{eff}}} = \frac{4a_i r_j^2 h_{\text{eff}} (b_i - 6a_i y_i^2)}{\sqrt{b_i}}, \quad (7c)$$

$$a_i = h_{\text{eff}}^2 + y_i^2, \quad (7d)$$

$$b_i = (a_i + r_j^2)^2 - 4y_i^2 r_j^2. \quad (7e)$$

方程组 (6a)—(6d) 共有 4 个方程, 且有 4 个未知量, 因此解是可以确定的. 由于 (6a)—(6d) 式是关于 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} 的非线性方程, 不容易直接求解, 为此, 可以将其转化为线性化方程, 通过牛顿迭代法进行求解. 首先, 设定待求解量的初值 $\mathbf{X}^0 = (\alpha_{\text{in}}^0, \alpha_{\text{mid}}^0, \alpha_{\text{out}}^0, h_{\text{eff}}^0)^T$ (注: 上标 T 表示矩阵的转置), 接着将方程组 (6a)—(6d) 在 $\mathbf{X}^0$ 处进行泰勒级数展开, 并忽略二阶以上高次项, 得

$$\mathbf{A} \times \Delta \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_{\text{in}}}{\partial \alpha_{\text{in}}} & \frac{\partial F_{\text{in}}}{\partial \alpha_{\text{mid}}} & \frac{\partial F_{\text{in}}}{\partial \alpha_{\text{out}}} & \frac{\partial F_{\text{in}}}{\partial h_{\text{eff}}} \\ \frac{\partial F_{\text{mid}}}{\partial \alpha_{\text{in}}} & \frac{\partial F_{\text{mid}}}{\partial \alpha_{\text{mid}}} & \frac{\partial F_{\text{mid}}}{\partial \alpha_{\text{out}}} & \frac{\partial F_{\text{mid}}}{\partial h_{\text{eff}}} \\ \frac{\partial F_{\text{out}}}{\partial \alpha_{\text{in}}} & \frac{\partial F_{\text{out}}}{\partial \alpha_{\text{mid}}} & \frac{\partial F_{\text{out}}}{\partial \alpha_{\text{out}}} & \frac{\partial F_{\text{out}}}{\partial h_{\text{eff}}} \\ \frac{\partial F_h}{\partial \alpha_{\text{in}}} & \frac{\partial F_h}{\partial \alpha_{\text{mid}}} & \frac{\partial F_h}{\partial \alpha_{\text{out}}} & \frac{\partial F_h}{\partial h_{\text{eff}}} \end{pmatrix}_0, \quad \mathbf{B} = - \begin{pmatrix} F_{\text{in}} \\ F_{\text{mid}} \\ F_{\text{out}} \\ F_h \end{pmatrix}_0, \quad \Delta \mathbf{X} = \begin{pmatrix} \Delta \alpha_{\text{in}} \\ \Delta \alpha_{\text{mid}} \\ \Delta \alpha_{\text{out}} \\ \Delta h_{\text{eff}} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

式中, 下标“0”表示各矩阵元应代入相应的初值 $\mathbf{X}^0$.

根据 (8) 式求得 $\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$ 后, 对初值进行如下修正,

$$\mathbf{X}^0 + \Delta \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}^0, \quad (10)$$

式中, 箭头表示将左边的量赋予右边的量, 箭头右

边的 $\mathbf{X}^0$ 是新的初值. 通过反复求解 $\Delta\mathbf{X}$ 并利用 (10) 式对初值进行修正, 直到 $\Delta\mathbf{X}$ 小于规定的精度, 最后得到的 $\mathbf{X}^0$ 即为方程组 (6a)—(6d) 的解.

3.2 应用示例

根据 3.1 节理论, 为了拟合求解 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} , 需要知道外延层厚度的精确实验值, 为此设计了表 2 所列的谐振腔外延结构. 该结构由 10 对 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 下 DBR, 10.5 对 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ 上 DBR, 以及夹在二者之间的 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ 谐振腔组成. DBR 每层的厚度为 $1/4$ 波长光程, 谐振腔的厚度为 1 个波长光程. 整个结构外延在 GaAs 衬底上. 外延生长结束后, 通过测试外延片的 mapping 反射谱, 可以精确测得片内不同位置 r_j 处腔模对应的波长 λ_{cj} , 再用 λ_{cj} 除以腔材料的折射率 n_c , 即可得到外延片上不同位置处 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ 谐振腔层的厚度 T_j . 事实上, 由于我们关心的是外延层厚度均匀性的问题, 因此可以直接将 λ_{cj} 代替 T_j 带入方程组 (6a)—(6d) 中, 结果只不过是 α_{in} , α_{mid} 和 α_{out} 都乘了一个相同的系数 n_c , 对均匀性的拟合结果并不会产生影响.

表 2 用于确定外延层厚度的谐振腔结构

Table 2. Resonant cavity structure to determine the epitaxial layer thickness.

Name	材料	厚度
上DBR	$\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$	$1/4\lambda$
	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$1/4\lambda$
Cavity	$\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$	1λ
下DBR	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$1/4\lambda$
	$\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$	$1/4\lambda$
GaAs substrate		

针对表 2 所列结构, 利用 EMCORE D125 MOCVD 进行了材料的外延生长. 由于衬底托盘的直径为 12.5 cm, 因此选用了 4 in 衬底 (直径约 10.1 cm), 并将衬底置于托盘的中心. 外延中所用的载气是经钼管纯化后的高纯 H_2 , V 族源是高纯 AsH_3 , III 族源是 TMGa 和 TMAI . 表 3 列出了典型的外延参数, sccm 表示每分钟标准毫升.

表 3 典型的外延参数

Table 3. Typical epitaxial parameters.

H_2 /sccm	AsH_3 /sccm	V/III ratio	温度 /°C	室压 /Pa	晶圆载体 转速/(r·min ⁻¹)
20000	100	60—100	600	8000	1000

在标准状况下, M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} 分别等于 275.5, 123.2 和 1101.3 mL/min 时, 外延生长了 Bragg cavity#20-2. 外延结束后, 利用 Philip PLM100 白光光源对外延片进行了反射谱的测试. 图 3(a) 是片子中心点的单点测试结果, 由图中测试曲线可以精确得到腔模波长为 653.5 nm. 进一步对整个外延片进行反射谱的 mapping 测试, mapping 的空间步长为 2.5 mm, 得到外延片上各点的腔模波长, 结果显示在图 3(b) 对应的各点上, 由于 mapping 点太小, 图中数字太小而显示不清楚, 为此图 3(c) 给出了片上各点腔模波长的统计结果, 统计过程中, 考虑到边缘效应, 扣除了外延片边缘附近 5 mm 的数据. 为明显起见, 将图 3 中的具体数据列在了表 4 中, $\bar{\lambda}_c$ 是各点腔模波长的平均值, 等于 657.9 nm, σ 是 λ_c 的标准偏差, 等于 3.7 nm. σ 越小, λ_c 的均匀性越好, 表征均匀性的参数 $\sigma/\bar{\lambda}_c$ 越小, 表中值为 0.6%. λ_c (10%) 表示所有测试点中有 10% 的腔模波长小于 λ_c (10%), 而 λ_c (90%) 表示所有测试点中有 90% 的腔模波长小于 λ_c (90%). λ_c (90%)— λ_c (10%) 越小, 说明 λ_c 的均匀一致性越好.

表 4 典型的外延参数

Table 4. Typical epitaxial parameters.

		Bragg cavity #20-2	Bragg cavity #22	Bragg cavity #23
MO源 喷嘴	$M_{\text{in}}/\text{sccm}$	275.5	281.3	281.3
	$M_{\text{mid}}/\text{sccm}$	123.2	125.8	125.8
	$M_{\text{out}}/\text{sccm}$	1101.3	1092.9	1092.9
腔模 波长的 mapping 结果	$\bar{\lambda}_c/\text{nm}$	657.9	681.9	651.9
	σ/nm	3.7	1.52	1.03
	Uniformity/%	0.6	0.2	0.2
	$\lambda_c(10\%)/\text{nm}$	653	681	651
	$\lambda_c(90\%)/\text{nm}$	663	683	653
拟合 结果	$\alpha_{\text{in}}/(\text{nm}\cdot\text{sccm}^{-1})$	0.891	0.917	0.870
	$\alpha_{\text{mid}}/(\text{nm}\cdot\text{sccm}^{-1})$	1.868	1.908	1.839
	$\alpha_{\text{out}}/(\text{nm}\cdot\text{sccm}^{-1})$	0.165	0.174	0.165
	h_{eff}/mm	30.448	30.748	30.630

根据图 3 的 mapping 测试结果, 沿图 3(b) 箭头所示径向, 从外延片的中心点 O 开始, 逐点读取腔模的波长 λ_c^i , 并将其等效为外延层厚度的测试值 T_j 代入方程组 (6a)—(6c), 拟合求解的结果如图 4 所示. 实验测试数据与理论拟合值 t 符合得很好, 图中同时给出了相应于各 MO 源喷嘴对外延

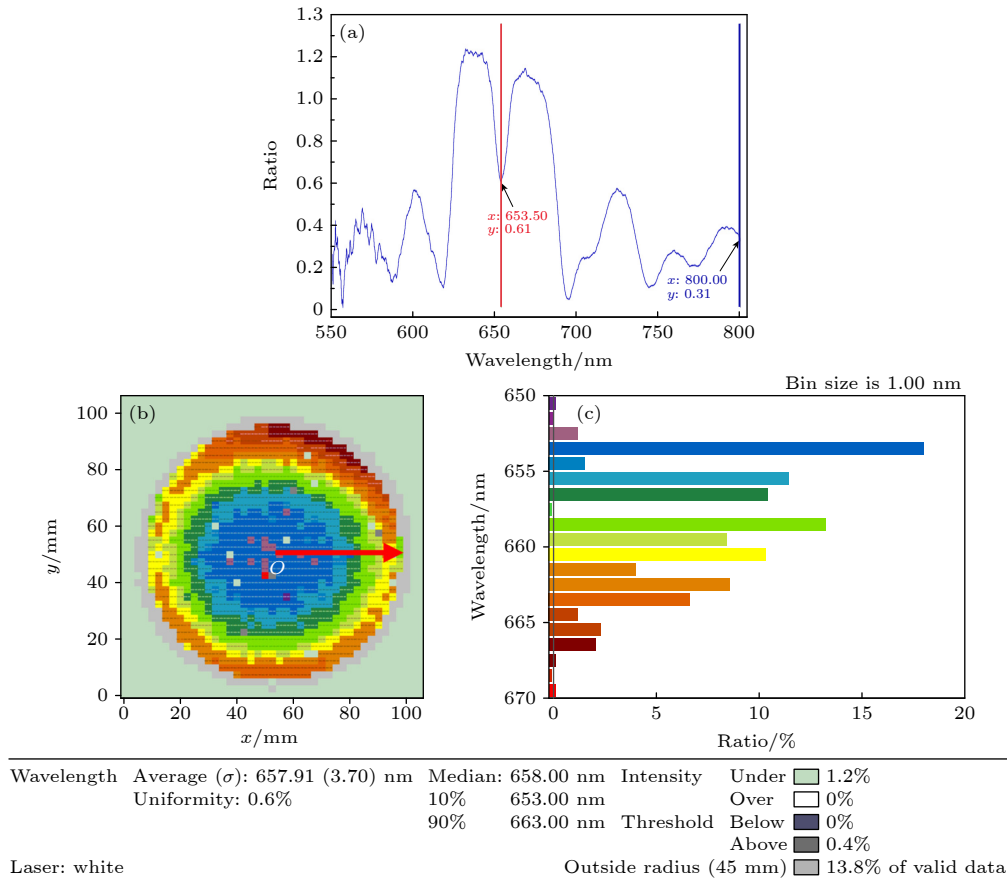


图 3 Bragg cavity#20-2 样品的反射谱结果 (a) 外延片中心点的反射光谱; (b) 腔模波长的 mapping 结果; (c) 整个外延片腔模波长的统计结果

Fig. 3. Reflective spectrum results of Bragg cavity#20-2: (a) Reflective spectrum at wafer center point; (b) mapping results of the cavity wavelength; (c) statistic results of the cavity wavelength for the whole wafer.

层厚度的贡献. 拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} 的具体数值列在了表 4 中, 通过表中数据可知, 流经喷嘴 mid 的 MO 源的利用效率最高, 而流经喷嘴 out 的 MO 源的利用效率最低. 需要强调说明的是, 实际反应室的 MO 源喷嘴距衬底托盘的距离约为 70 mm, 而用蒸发面源模型拟合得到的等效高度 h_{eff} 仅为 30.45 mm. 这是由于 h_{eff} 含概了所有

与 MOCVD 相关的外延参数的影响, 如温度、压力、托盘转速、V/III 比, 以及载气流量等.

4 优化厚度均匀性

根据表 4, Bragg cavity#20-2 的厚度均匀性达到了 0.6%, 对于普通的边发射 LD 或 LED 来说, 这样的均匀性条件是足够满足的. 但是, 其 $\lambda_c(90\%)$ 与 $\lambda_c(10\%)$ 的差为 10 nm, 这对于 VCSEL 或 RCLED 这样的垂直谐振腔器件来说是不能接受的. 因为垂直谐振腔器件的发光波长主要决定于谐振腔的层厚, 该层厚度的不均匀将使成品率降低, 生产成本提高. 为此, 本节给出优化外延层厚度均匀性的方法.

4.1 优化理论

根据第 3 节方法拟合求得 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} 之后, 为使外延层的厚度尽可能均匀, 希望通过调节 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} , 使片上各点的层厚与平

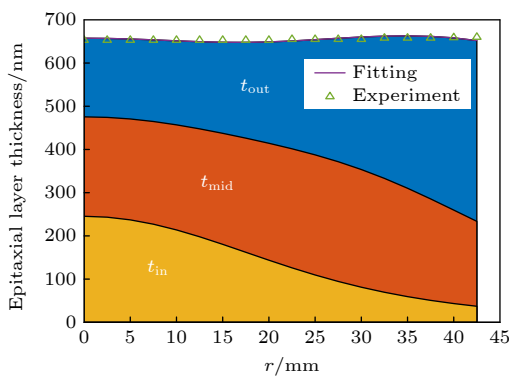


图 4 Bragg cavity#20-2 样品的厚度拟合结果

Fig. 4. Thickness fitting results of Bragg cavity#20-2.

均厚度的偏差越小越好, 即

$$F(M_{\text{in}}, M_{\text{mid}}, M_{\text{out}}) = \sum_{j=1}^N (t_j - \bar{t})^2 = \text{MIN}, \quad (11)$$

式中, MIN 表示 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} 的取值应使得 F 的值最小, $t_j = t(r_j)$ 是 r_j 处外延层的厚度 ($j = 1, 2, \dots, N$, N 是外延片上的离散点总数), $\bar{t}$ 是外延层的平均厚度, 结合 (3a) 式可得

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j = M_{\text{in}} \alpha_{\text{in}} \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}} + M_{\text{mid}} \alpha_{\text{mid}} \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}} \\ &\quad + M_{\text{out}} \alpha_{\text{out}} \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中,

$$\bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j), \quad (13a)$$

$$\bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j), \quad (13a)$$

$$\bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j). \quad (13c)$$

在调整 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} 的过程中, 可固定三个喷嘴的总流量不变, 即

$$M_{\text{in}} + M_{\text{mid}} + M_{\text{out}} = M_{\text{T}}, \quad (14)$$

其中总流量 M_{T} 是一常数. 将 M_{in} 和 M_{mid} 作为调节量, 则 $M_{\text{out}} = M_{\text{T}} - M_{\text{in}} - M_{\text{mid}}$. 因此, (11) 式等价于以下方程组的求解:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(M_{\text{in}}, M_{\text{mid}})}{\partial M_{\text{in}}} = 0, \\ \frac{\partial F(M_{\text{in}}, M_{\text{mid}})}{\partial M_{\text{mid}}} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

将 (11) 式代入 (15) 式, 经过推导化简, 可进一步写出关于 M_{in} 和 M_{mid} 的线性化方程组:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{\text{in}} \\ M_{\text{mid}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

式中, 各矩阵元为

$$a_{11} = \alpha_{\text{in}}^2 \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}}]^2 - \alpha_{\text{out}} \alpha_{\text{in}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}] [t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}}], \quad (17a)$$

$$a_{12} = \alpha_{\text{mid}} \alpha_{\text{in}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}}] [t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}}] - \alpha_{\text{out}} \alpha_{\text{in}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}] [t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}}], \quad (17b)$$

$$a_{21} = \alpha_{\text{mid}} \alpha_{\text{in}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}}] [t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}}] - \alpha_{\text{out}} \alpha_{\text{mid}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}] [t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}}], \quad (17c)$$

$$a_{22} = \alpha_{\text{mid}}^2 \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}}]^2 - \alpha_{\text{out}} \alpha_{\text{mid}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}] [t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}}], \quad (17d)$$

$$c_1 = -M_{\text{T}} \alpha_{\text{out}} \alpha_{\text{in}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}] [t_{\text{g}}^{\text{in}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{in}}], \quad (17e)$$

$$c_2 = -M_{\text{T}} \alpha_{\text{out}} \alpha_{\text{mid}} \sum_{j=1}^N [t_{\text{g}}^{\text{out}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{out}}] [t_{\text{g}}^{\text{mid}}(r_j) - \bar{t}_{\text{g}}^{\text{mid}}]. \quad (17f)$$

将拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} 代入方程 (17a)–(17f) 式, 再求解 (16) 式, 即可得到优化的三个 MO 源喷嘴的流量 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} .

4.2 应用示例

基于 Bragg cavity#20-2 的拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} , 将三个 MO 源喷嘴的总流量固定为

1500 sccm, 根据 4.1 节的优化理论, 得到对应于 M_{in} , M_{mid} 和 M_{out} 优化值分别为 281.3, 125.8 和 1092.9 sccm, 并外延生长了与 Bragg cavity#20-2 结构相同的 Bragg cavity#22, 反射谱的 mapping 测试结果如图 5 所示. 腔模波长的统计数据也列在了表 4 中, 与 Bragg cavity#20-2 比较得到, Bragg cavity#22 的平均腔模波长由 657.9 nm 增加到

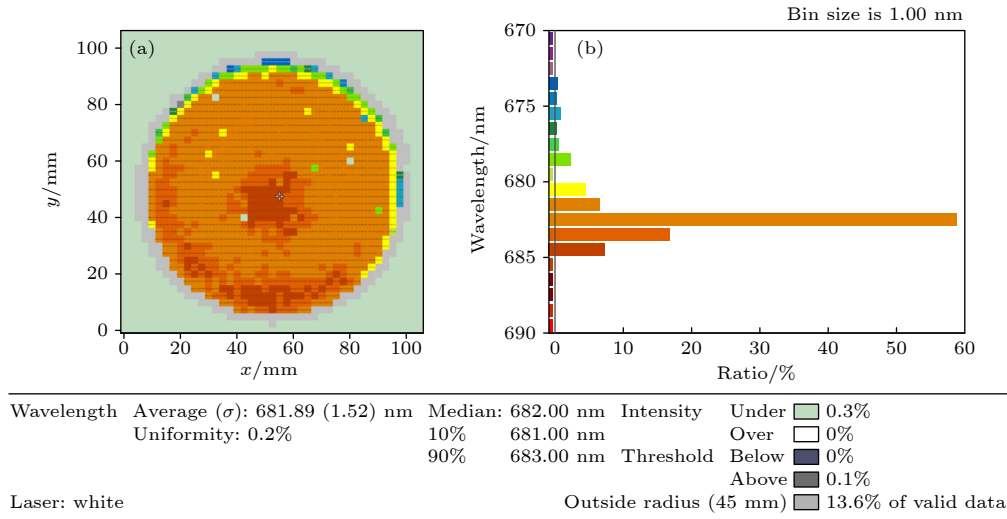


图 5 Bragg cavity#22 样品的反射谱结果 (a) 腔模波长的 mapping 结果; (b) 整个外延片腔模波长的统计结果

Fig. 5. Reflective spectrum results of Bragg cavity#22: (a) Mapping results of the cavity wavelength; (b) statistic results of the cavity wavelength for the whole wafer.

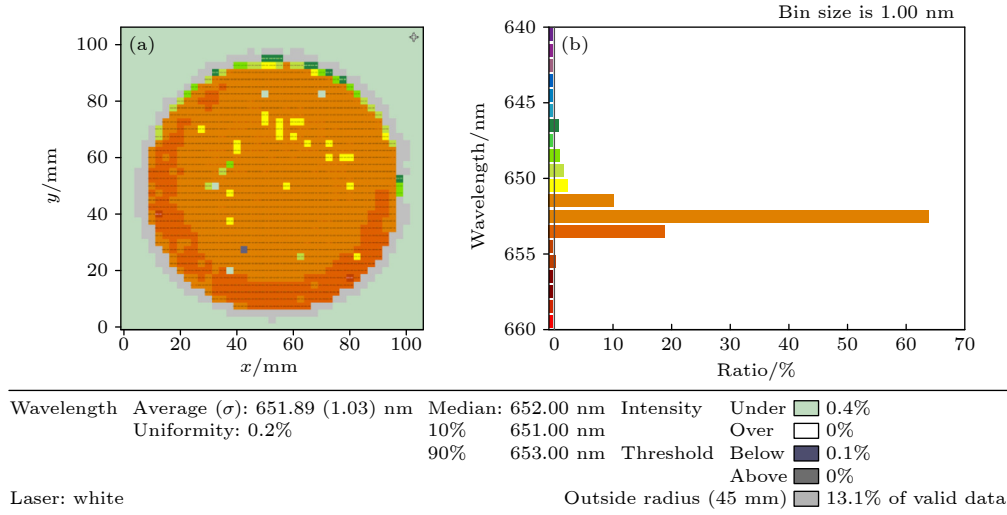


图 6 Bragg cavity#23 样品的反射谱结果 (a) 腔模波长的 mapping 结果; (b) 整个外延片腔模波长的统计结果

Fig. 6. Reflective spectrum results of Bragg cavity#23: (a) Mapping results of the cavity wavelength; (b) statistic results of the cavity wavelength for the whole wafer.

681.9 nm, 这与 in 和 mid 喷嘴的 MO 源利用率高且这两个喷嘴的流量增加有关. 让我们振奋的结果是, 标准偏差由 3.7 nm 降为 1.52 nm, 均匀性值从 0.6% 降为 0.22%, 且 λ_c (90%)— λ_c (10%) 的值由 10 nm 降为 2 nm. 可以说, Bragg cavity#22 的厚度均匀性是满足 VCSEL 和 RCLED 等垂直腔型器件的需求的. 拟合参数 α_{in} , α_{mid} , α_{out} 和 h_{eff} 的变化可能是由于各 MO 源喷嘴流量的变化对反应腔内气流场的扰动引起的.

为了进一步得到用于 650 nm RCLED 的 DBR 的外延条件, 将 Bragg cavity#22 各层的时间简单乘以 650/681.9 倍, 保持其他条件不变生长了

Bragg cavity#23, 反射谱的 mapping 测试结果如图 6 所示, 相关统计数据也列在了表 5 中. Bragg cavity#23 的平均腔模波长为 651.89 nm, 标准偏差为 1.03 nm, 厚度均匀性为 0.16%, λ_c (90%) 为 653 nm, λ_c (10%) 为 651 nm, 相差 2 nm, 可以完全满足面向 POF 的 RCLED 的 DBR 外延结构的需求. 相比 Bragg cavity#22, Bragg cavity#23 的 h_{eff} 的变化不大, α_{in} , α_{mid} 和 α_{out} 的减小是由于外延层的时间减小造成的.

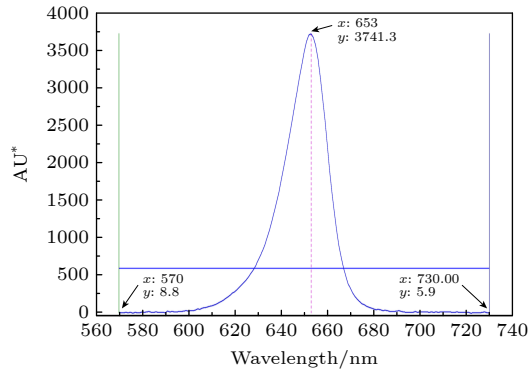
基于优化后的 MO 喷嘴流量, 生长了表 5 所列的 650 nm QW 外延结构 RCLED QW#69, 并利用 PHILIPS PLM100 的 532 nm 激光源测试

外延片的室温 PL 谱. 图 7 是外延片中心点的 PL 谱测试结果, 峰值波长 λ_p 为 653 nm, 半高宽为 20.5 nm. 图 8 是外延片峰值波长的 mapping 结果,

表 5 650 nm 量子阱外延结构

Table 5. Epitaxial structure of 650 nm QW.

材料	厚度/nm
GaAs	5
(Al _{0.7} G _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P	150
(Al _{0.5} G _{0.5}) _{0.5} In _{0.5} P	35
G _{0.5} In _{0.5} P	5
(Al _{0.5} G _{0.5}) _{0.5} In _{0.5} P × 2	5
G _{0.5} In _{0.5} P × 2	5
(Al _{0.5} G _{0.5}) _{0.5} In _{0.5} P	35
(Al _{0.7} G _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P	150
GaAs substrate	



Spectral step: 1.0 nm	Peak intensity	: 3741.3 AU
Laser : Green	Peak wavelength	: 653.0 nm
Lens : BK7	Full width at half max.	: 20.5 nm
Detector type: Silicon	Upper half max. wavelength:	661.2 nm
Grating : Vis1200	Lower half Max. wavelength:	640.7 nm

图 7 650 nm 量子阱外延片中心点的 PL 谱

Fig. 7. PL spectrum of 650 nm QW at wafer center point.

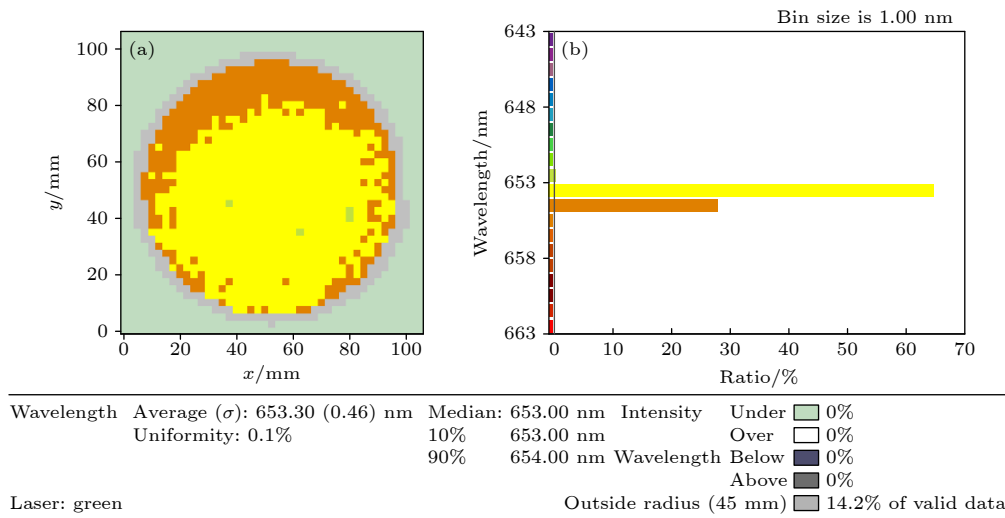


图 8 RCLED QW#69 样品的 PL 谱 (a) 峰值波长的 mapping 结果; (b) 整个外延片峰值波长的统计结果

Fig. 8. PL spectrum results of RCLED QW#69: (a) Mapping results of the peak wavelength; (b) statistic results of the peak wavelength for the whole wafer.

统计表明, 峰值波长的平均值为 653.3 nm, 标准偏差仅为 0.46 nm, 均匀性达到了 $0.46/653.3 = 0.07\%$. λ_p (90%) 和 λ_p (10%) 分别为 654 和 653 nm, 二者相差仅 1 nm.

需要强调说明的是, 设备厂商一般担保的均匀性验收指标中, 不论是外延层厚度还是 QW 峰值波长, 通常只有 2%, 而利用本文的方法将均匀性指标提高了 1 个量级以上.

5 结 论

外延层的厚度均匀性是 MOCVD 在规模化生产中的一个至关重要的参数. 本文针对多 MO 源喷嘴垂直 MOCVD 反应腔, 提出了提高外延层厚度均匀性的有效方法. 该方法的关键点包括: 1) 将 MO 源喷嘴等效为蒸发系统的余弦型面源, 并引入一等效高度来涵盖所有相关的 MOCVD 外延参数; 2) 与实验相结合, 采用最小二乘法对模型参数进行了有效提取; 3) 根据提取的模型参数, 给出了提高外延层厚度均匀性的有效方法. 应用结果表明, 4 in 外延片的厚度均匀性达到 0.16%, 650 nm QW 的 PL 峰值波长均匀性达到 0.07%. 这些结果比设备厂家的验收标准提高了 1 个量级. 虽然本文中 MO 源喷嘴的数目为 3 个, 但是我们相信该模型可以进一步推广至 4 个甚至更多个 MO 源喷嘴的情形, 这有益于规模化生产中良率的提高和生产成本的降低. 特别是对于 VCSEL 和 RCLED 等垂直谐振腔型器件的 MOCVD 量产外延, 本文的模型方法应为不可或缺.

参考文献

- [1] Manasevit H M 1968 *Appl. Phys. Lett.* **12** 156
- [2] Lu D C, Duan S K 2009 *Fundamentals and Applications of Metal Organic Compound Gas Phase Epitaxy* (Beijing: Science Press) p6 (in Chinese) [陆大成, 段树坤 2009 金属有机化合物气相外延基础及应用 (北京: 科学出版社) 第 6 页]
- [3] Loke W K, Lee K H, Wang Y, Tan C S, Fitzgerald E A, Yoon S F 2018 *Semicond. Sci. Technol.* **33** 115011
- [4] Beckers A, Fahle D, Mauder C, Kruecken T, Boyd A R, Heuken M 2018 *SID Symposium Digest of Technical Papers* **49** 601
- [5] Monge-Bartolome L, Shi B, Lai B, Boissier G, Cerutti L, Rodriguez J B, Lau K M, Tournié E 2021 *Opt. Express* **29** 11268
- [6] Gawron W, Damiecki A, Kozniowski A, Martyniuk P, Stasiewicz K A, Madejczyk P, Rutkowski J 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 4509
- [7] Achilli E, Calicchio M, Armani N, Malvisi E, Annoni F, Cornelli M, Trespidi F, Minuto A, Celi E, Abagnale G, Rizzi S, Timò G 2023 *J. Cryst. Growth* **607** 127131
- [8] Wang S, Wang W H, Lü J P, Ni Z H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 026802 (in Chinese) [王铄, 王文辉, 吕俊鹏, 倪振华 2021 物理学报 **70** 026802]
- [9] Liu T Y, Liu C, Liu K H 2018 *Acta Phys. Sin.* **71** 108103 (in Chinese) [刘天瑶, 刘灿, 刘开辉 2018 物理学报 **71** 108103]
- [10] Li J J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 067801 (in Chinese) [李建军 2018 物理学报 **67** 067801]
- [11] Zhou Y L, Jia Y C, Zhang X, Zhang J W, Liu Z C, Ning Y Q, Wang L J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 134204 (in Chinese) [周寅利, 贾雨琴, 张星, 张建伟, 刘占超, 宁永强, 王立军 2022 物理学报 **71** 134204]
- [12] Manasreh O 2005 *Semiconductor Heterojunctions and Nanostructures* (New York: The McGraw-Hill Companies, Inc)
- [13] Heuken M, Krotkus S, Pasko S, Whear O, Wang X, Connan B, McAleese C 2021 *ECS Meeting Abstracts* **MA2021-02** 606
- [14] Su J, Armour E, Lee S M, Arif R, Papasouliotis G D 2016 *Phys. Status Solidi A* **213** 856
- [15] Paranjpe A, Montgomery J, Lee S, Morath C 2018 *SID Symposium Digest of Technical Papers* **49** 597
- [16] Chen R, Li J, Ya X, Deng J, Han J, Luo S, Gao L 2010 *10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Shanghai, China, November 1–4, 2010* pp1853–1855
- [17] Zheng W, Li J, Chen R, Yang W, Cui B, Han J, Deng J 2011 *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering* Nanjing, China, June 24–29, 2011 pp5821–5823
- [18] Holland L, Steckelmacher W 1952 *Vacuum* **2** 346
- [19] Angus Macleod H 2010 *Thin-Film Optical Filters* (Fourth Edition) (Balkema: CRC Press) pp598–600
- [20] McKee M A, Norris P E, Stall R A, Tompa G S, Chern C S, Noh D, Kang S S, Jasinski T J 1991 *J. Cryst. Growth* **107** 445
- [21] Hartley H O 2012 *Technometrics* **3** 269

Optimization theory and application of epitaxial layer thickness uniformity in vertical MOCVD reaction chamber with multiple MO nozzles^{*}

Li Jian-Jun[†] Cui Yu-Zheng Fu Cong-Le Qin Xiao-Wei
Li Yu-Chang Deng Jun

(Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 23 September 2023; revised manuscript received 31 October 2023)

Abstract

Metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) is a key means of epitaxy of heterojunction semiconductor material, the uniformity of its epitaxial layer thickness will directly affect the yield of the product, especially the vertical cavity surface emitting device, which has a higher requirement for thickness uniformity. For the multi-MO nozzle vertical reaction cavity MOCVD, this paper combines theory and experiment to give an effective method of improving the epitaxial layer thickness uniformity through adjusting the flow rate of each MO nozzle. Firstly, each MO source nozzle is equivalent to an evaporation surface source, and an equivalent height is introduced to cover the relevant epitaxial parameters of MOCVD and the quantitative relationship between the epitaxial layer thickness and the flow rate of each MO source nozzle is established by taking three MO source nozzles as an example. After that, the model parameters are extracted by fitting through the least squares method based on the experimentally measured epitaxial layer thickness distribution results. Finally, based on the extracted model parameters, a method to optimize the epitaxial layer thickness uniformity is given. Accordingly, the AlGaAs resonant cavity structure, which is easy to accurately test the epitaxial layer thickness, is designed and epitaxially grown by using the EMCORE D125 MOCVD system. The statistical results of the mapping reflection spectra of the 4-inch epitaxial wafers are that the average wavelength of the cavity mode is 651.89 nm, with a standard deviation of 1.03 nm, and thickness uniformity of 0.16% is achieved. At the same time, epitaxial growth of GaInP quantum well structure, 4-inch epitaxial wafers mapping photoluminescence spectrum statistics for the average peak wavelength of 653.3 nm, the standard deviation of only 0.46 nm, and peak wavelength uniformity of 0.07% are achieved. Both the wavelength uniformity of cavity mode and the peak wavelength uniformity of quantum well fully meet the requirements of vertical cavity surface emitting device. The method of adjusting epitaxial layer thickness uniformity proposed in this paper is simple, effective, and fast, and it can be further extended to vertical reaction cavity MOCVD systems with more than four MO nozzles.

Keywords: epitaxial growth, least-squares fitting, thin-film uniformity, metal organic chemical vapor deposition

PACS: 68.55.ag, 81.15.Aa, 81.15.Gh, 77.55.Px

DOI: [10.7498/aps.73.20231555](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231555)

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFA0209003) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4222060).

[†] Corresponding author. E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

具有多MO喷嘴垂直MOCVD反应腔外延层厚度均匀性的优化理论及应用

李建军 崔屿峥 付聪乐 秦晓伟 李雨畅 邓军

Optimization theory and application of epitaxial layer thickness uniformity in vertical MOCVD reaction chamber with multiple MO nozzles

Li Jian-Jun Cui Yu-Zheng Fu Cong-Le Qin Xiao-Wei Li Yu-Chang Deng Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 046801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231555

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231555>

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

表界面调控米级二维单晶原子制造

Atomic-scale manufacture of metre-sized two-dimensional single crystals by interfacial modulation

物理学报. 2022, 71(10): 108103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212399>

极性补偿对LaMnO₃/LaNiO₃超晶格交换偏置场强度的影响

Influence of polarity compensation on exchange bias field in LaMnO₃/LaNiO₃ superlattices

物理学报. 2022, 71(15): 156801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220365>

液相外延层层浸渍组装金属-有机框架薄膜及其物理性能

Liquid phase epitaxial layer by layer dipping assembly of metal-organic framework thin films and their physical property

物理学报. 2020, 69(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200274>

化学气相沉积石墨烯薄膜的洁净转移

Clean transfer of chemical vapor deposition graphene film

物理学报. 2019, 68(9): 096801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190279>

基于GaN同质衬底的高迁移率AlGaN/GaN HEMT材料

Highmobility AlGaN/GaN high electronic mobility transistors on GaN homo-substrates

物理学报. 2018, 67(7): 076801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172581>

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>