束源炉结构及布局对分子束外延薄膜材料均匀性影响的仿真

陶先童 段莹瑞 李壮壮 宋立媛 杨春章 杨晋 李艳辉
孔金丞 赵俊 姬荣斌 王善力*
(昆明物理研究所 昆明 650223)

Simulation of the Uniformity Influence of Effusion Cell Structure and Layout in Molecular Beam Epitaxy

TAO Xiantong, DUAN Yingrui, LI Zhuangzhuang, SONG Liyuan, YANG Chunzhang, YANG Jin, LI Yanhui, KONG Jincheng, ZHAO Jun, JI Rongbin, WANG Shanli*
(*Kunming Institute of Physics*, *Kunming* 650223, *China*)

Abstract Billion-pixel infrared detectors are an important direction for the development of next-generation infrared detectors, and the 8-inch high-uniform $Hg_{1-x}Cd_xTe$ thin film has become the most crucial component of this technology. The structure and layout of molecular beam epitaxy(MBE) effusion cells are key factors influencing the composition and thickness uniformity of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epitaxy films. This paper theoretically analyzes the beam flux generation and emission distribution of effusion cells based on requirements for large-area high-uniformity $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epitaxial films. It simulates and calculates the impacts of effusion cell layout and the usage of source materials within the cells on the thickness uniformity of epitaxial thin films. This article takes a cylindrical channel effusion cell as an example and uses COMSOL Multiphysics to simulate the MBE growth process with different distances and different angles from the effusion cell of MBE, and the uniformity of the beam reaching the substrate is calculated. The results show that the beam flux decreases nearly linearly with source material consumption. The highest thickness uniformity is achieved when the angle is 46°; as the distance increases, the thickness uniformity becomes better, and after 300 mm, the thickness uniformity is within ±1.5%. This ensures the successful preparation of 8-inch highly uniform $Hg_{1-x}Cd_xTe$ thin film.

Keywords Effusion cell，Uniformity，Molecular beam epitaxy，Beam variation

摘要 亿像素红外探测器是下一代红外探测器发展的重要方向，8 英寸高均匀碲镉汞薄膜成为实现该技术的最重要一环。分子束外延系统中束源炉结构及布局是影响分子束外延碲镉汞薄膜材料组分及厚度均匀性的关键因素之一。文章从满足大尺寸高均匀碲镉汞外延薄膜材料的要求出发，对束源炉的束流产生和出射分布做了理论分析，模拟计算了束源炉布局和坩埚内源材料状态对衬底上外延薄膜材料膜厚均匀性的影响。使用多物理场仿真软件 COMSOL，以圆柱形坩埚的束源炉为模型，模拟了束源炉装料量对到达衬底表面束流的影响，以束源炉到衬底平面的间距和束源炉与衬底平面的夹角两个维度的变化进行了仿真，计算了到达衬底表面的束流均匀性。结果显示，随着源材料的使用，到达衬底表面的束流接近线性下降；在束源炉与衬底平面角度为 46°时，衬底平面的束流均匀性最好；随束源炉到衬底平面中心间距的增加衬底平面的束流均匀性逐渐变好，当距离大于 300 mm 时，束流均匀性在±1.5% 以内，保障了 8 英寸高均匀碲镉汞薄膜材料的制备。

关键词 束源炉 均匀性 分子束外延 束流变化
中图分类号：TB79 **文献标识码：**A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202502013

收稿日期：2025−02−21
基金项目：云南省创新团队专项项目（202505AS350022）
* **联系人：**E-mail: wshanli@hotmail.com

分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)具有原子级薄膜制备和掺杂浓度精确控制的优点,是复杂结构薄膜材料制备的主要手段之一[1]。当前,量产型大尺寸分子束外延设备能够提高生产效率和降低生产成本,是全球分子束外延设备商开发的重点,国内外分子束外延设备公司均推出了具备 8 英寸以上材料外延能力的分子束外延设备。美国 Veeco 公司的 GEN2000 可同时生长 7 片 6 英寸外延片[2],法国 RIBER 公司的 MBE8000 可以同时生长 4 个 8 英寸外延片[3]。国内沈阳科学仪器股份有限公司的 FW110 具备生长 7 片 4 英寸外延片的能力,费勉仪器科技(上海)有限公司和中国电子科技集团公司四十八所也分别发布了 9 片 4 英寸和 4 片 6 英寸外延片的系统设计方案[4]。

在分子束外延设备中,束源炉作为核心部件之一,对外延薄膜材料的均匀性起着至关重要的作用[5]。在超高真空环境下,束源炉通过加热将坩埚内的源材料蒸发形成气相束流,这些原子或分子从坩埚口出射后到达衬底平面发生吸附和迁移等反应,最后在衬底上外延生长出新的薄膜材料[6]。束流的精确控制和均匀分布影响着薄膜材料的组分和生长质量,而束源炉的设计及布局直接影响出射束流的分布和稳定性[7]。

MBE 设备中的束源炉布局通常围绕着样品衬底分布,以确保来自各束源炉的分子束能够均匀覆盖衬底表面[8]。常见的布局形式包括对称环形布局和线性布局。对称环形布局:束源炉通常围绕生长平面法线方向呈环形分布,如图 1 所示,这种布局方式可以确保从各个束源炉出射的分子束在衬底表面形成均匀的覆盖;线性布局:在一些特殊的 MBE 系统中,束源炉沿一条直线或特定角度排列,这种布局多用于特定材料或异质结构生长,目的是在不同区域实现不同源材料的沉积,这种布局会对束流的均匀性产生一定的影响,特别是当样品旋转速度不够时,薄膜可能出现厚度不均匀。两种方式下束源炉相对于衬底平面的角度和距离都是影响源材料沉积均匀性的关键因素。

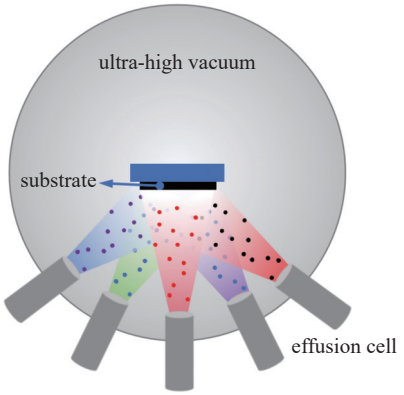

图1 束源炉环形布局示意图

Fig. 1 Ring layout diagram of effusion cell

束源炉作为分子束外延设备的关键部件,已经发展了 40 余年,其主要结构如图 2 所示,包括坩埚用于装源材料、加热元件用于控制材料的加热温度、热电偶用于测量炉内温度、外壳用于保温及结构支撑,部分束源炉还有束流调节装置如:束流孔或阀控炉口等[9]。束源炉中源材料蒸发形成的束流出射分布主要与坩埚结构有关,其形状和坩埚口对束流的分布具有导向性。

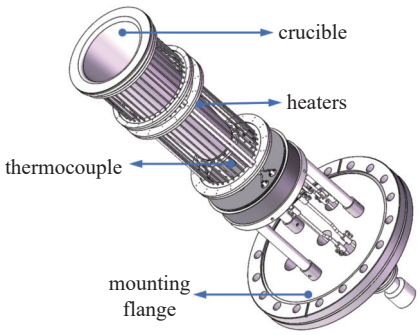

图2 束源炉结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of effusion cell

束源炉的束流大小和分布是影响着高质量薄膜材料生长的重要因素之一。开展束源炉束流产生的影响因素分析以及在分子束外延系统中束流的分布极其重要,为大尺寸分子束外延设备设计和研制提供理论基础。

1 模拟仿真原理

束源炉是通过加热从固体或液体源材料中蒸发产生气相分子束流,分子在真空环境中扩散,并在衬底平面物理沉积,分子束流的形成和分布是本文的研究重点。1909 年 Knudsen M[10] 提出了束源炉的小孔蒸发模型,通过实验和推导将束源炉束流的产生简化为在小孔面积 A_e 和温度 T 下,蒸发出的分子通量Γ_e:

$$\Gamma_e = A_e(p_{eq} - p_v)\sqrt{\frac{N_A}{2\pi M k_B T}} \tag{1}$$

式中,p_{eq}为源材料饱和蒸汽压强,p_v为出口压强,M

为源材料分子质量, k_B 为玻尔兹曼常量: 1.381×10^{-23} JK^{-1}, N_A 为阿伏伽德罗常量: 6.022×10^{23} mol^{-1}。在超高真空环境下, p_v 可忽略不计, 代入参数可简化为:

$$\Gamma_e = 3.51\times10^{22}\frac{pA_e}{\sqrt{MT}} \tag{2}$$

上式计算得到了内从束源炉炉口出射的总分子通量, 而分子从炉口出射后在空间中的分布是本文研究的重点关注内容, 其直接影响分子到达衬底平面的分布均匀性。Knudsen 的蒸发模型将束源炉的蒸发逸出简化为从一个封闭空间经过一个极薄的壁和极小直径的孔中逸出, 并在孔的外围自由扩散, 如图 3 所示。

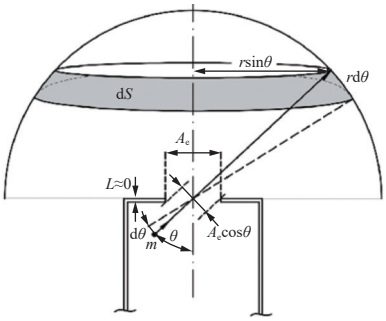

图3　出射束流分布示意图

Fig. 3　Schematic diagram of beam emission distribution

对于理想的 Knudsen 蒸发源, 平衡蒸汽压下的气体分子或原子从束流孔出射到真空环境中, 被蒸发出的粒子会分布在与小孔轴线同轴的半球内。在与束流孔轴线夹角为 θ 的区域取立体微元 dw, 即在图 3 中 θ 角与 θ+dθ 的夹角范围与半径为 r 半球的相交区域, 则单位时间内通过该立体角微元的分子数量为:

$$d\Gamma_\theta = \frac{\Gamma_e}{\pi}\cos\theta \mathrm{d}w \tag{3}$$

式中, Γ_e为束流小孔出射的总分子通量, $\mathrm{d}w = \mathrm{d}S/r^2$ 为该微元区域对应的立体角。公式(3)也称为余弦出射定律。

在垂直布局分子束外延系统中, 衬底平面水平, 束源炉轴线与衬底平面中心共线, 束源炉轴线与衬底平面法线成一定夹角, 束源炉相对衬底在三维空间有如图 4 所示的关系。

衬底平面中心点 A 的入射分子通量表示为:

$$I_A = \left.\frac{\mathrm{d}\Gamma_\theta}{\mathrm{d}S}\right|_{\theta=0^\circ} \tag{4}$$

式中, dS 为 A 点处的微元面。

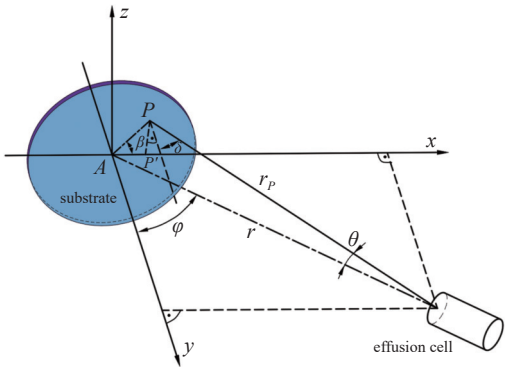

图4　束源炉与衬底平面三维空间示意图

Fig. 4　Three-dimensional space diagram of effusion cell and substrate plane

束源炉内源材料蒸发到衬底平面任一点P的分子通量N_P可表示为:

$$N_P = I_A\left(\frac{r}{r_P}\right)^2\cos\vartheta\cos(\vartheta+\varphi)\cos\delta \tag{5}$$

式中, I_A为束源炉沿轴线到达衬底中心 A 点的束流大小, r 和r_P分别为炉口到达衬底中心和到达衬底平面上一点P的距离, θ、φ、δ为以衬底中心为坐标轴束源炉与衬底的夹角关系。

公式(5)为表明到达衬底平面的束流除了与源材料自身性质和加热温度有关, 还与束源炉与衬底平面的角度和距离直接相关。以 CdTe 源材料为例, 其他参数如表 1 所示, 以夹角φ为单一变量计算到达衬底平面的束流分布情况如图 5 所示。

表 1　参数列表

Tab. 1　Table of parameters

描述	值
质量分数	0.20401 kg/mol
蒸发温度	883.15 K
蒸汽压	0.0012666 Pa
炉口直径	71.5 mm
距离	350 mm

由图 5 可知, 随着束源炉轴线与衬底轴线夹角φ从 0°开始增大, 瞬时到达衬底平面的束流分布从对称分布逐渐演变为峰值向束源炉方向偏移的分布, 同时瞬间到达衬底平面范围内的束流近似线性上升, 意味着到达衬底平面的瞬时分子通量分布不均匀, 因此实际薄膜材料生长中衬底按一定速度旋转, 以实现外延生长时到达衬底表面各位置分子通量均匀。

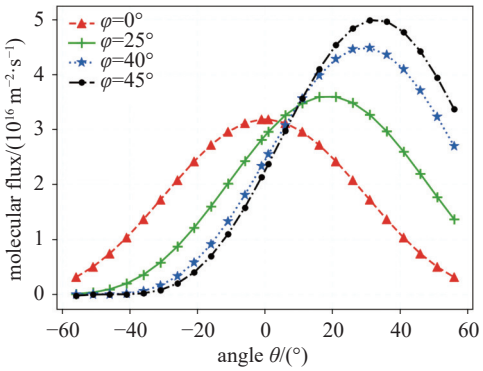

图5 不同角度 φ 下衬底平面的分子通量分布

Fig. 5 The molecular flux distribution on the substrate plane at different angles φ

然而，Knudsen 模型简化了束源炉口径等参数，实际上束源炉在腔体内为倾斜状态，坩埚内的源材料量不一样，坩埚壁吸附或反弹分子等情况，因此，Knudsen 理论模型与真实情况存在一定偏差。一些研究者对 Knudsen 理论模型进行了修正，如对源材料蒸发的平衡蒸汽压[11]、锥形坩埚蒸发发射[12]、坩埚反射[13]、坩埚壁厚讨论[14]、倾斜液面[15]、不同液面高度[16]、不同布局[17] 等进行约束和公式修正。这些公式为简化计算而忽略部分边界条件，导致计算存在一定局限性。为此，通过 COMSOL 开展仿真计算，更接近真实地模拟束流分布。COMSOL 是一种多物理耦合的仿真软件，其提供分子流模块，可模拟分子在超高真空中的物理运动过程[18]。

2 仿真结构与讨论

束源炉的坩埚可设计为各种形状及不同开口方式，坩埚形状和开口方式决定了束流的分布，考虑到实际生长应用，需要对逸出束流开展仿真分析，计算其到达衬底的束流分布情况，并优化束源炉的设计与布局。针对束源炉束流分布问题，采用 COMSOL 仿真软件进行模拟分析，其提供的分子流模块通过构建稀薄气体流动模型来模拟超高真空环境下的分子流动情况。采用此模块可以计算边界上的分子通量，模拟薄膜材料生长过程中到达衬底表面的束流分布。

针对垂直型分子束外延设备，为讨论束源炉相对衬底平面的布局对外延薄膜材料生长束流均匀性的影响，本文以适用于 8 英寸材料生长的设备为基础仿真模型，开展束流分布计算分析，仿真模型如图 6 所示。在仿真中，设定分子质量、蒸发压和蒸发温度等边界参数，与公式(1)对应，以此计算分子蒸发过程。同时，束流的分布计算，受物理模型结构控制，在模型中分子的出射路径包括直接逸出坩埚、坩埚壁吸附和反弹等，在仿真模型中对坩埚壁设定漫反射边界条件。

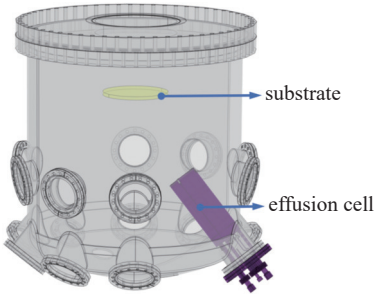

图6 分子束外延系统生长仿真模型

Fig. 6 Growth simulation model of MBE system

以源材料 CdTe 为例，设定束源炉坩埚为圆柱形尺寸参数如图 7(a)所示、装料深度为 140 mm、束源炉与衬底平面夹角为 35°、衬底尺寸为 8 英寸、表 1 中参数为基础条件，在 COMSOL 中采用分子流模块开展瞬态仿真，可以得到瞬间到达衬底平面的分子通量分布如图 8 所示。

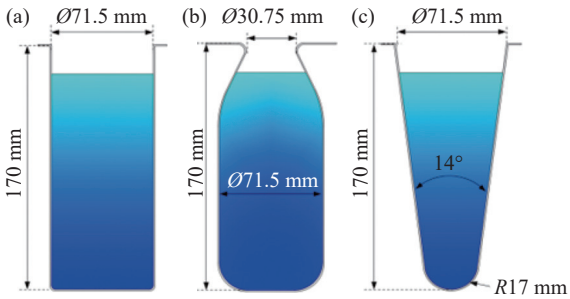

图7 坩埚结构。(a)圆柱形，(b)缩颈形，(c)锥形

Fig. 7 Crucible structure. (a) Cylindrical, (b) constricted-neck, (c) conical

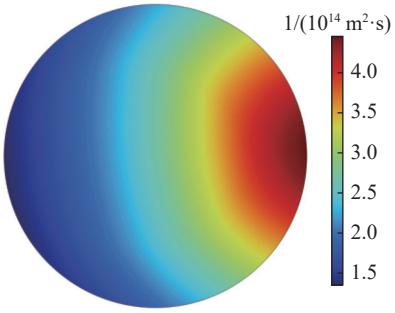

图8 衬底表面瞬时分子通量分布

Fig. 8 Instantaneous molecular flux distribution on substrate surface

图 8 结果显示, 分子通量在衬底平面分布不均, 右侧区域的分子通量相对更大, 对应物理模型中, 与束源炉的距离更小。实际分子束外延系统的整个生长过程中衬底匀速旋转, 通过旋转抵消静态分布的不均性。本文将衬底平面旋转一周计算在衬底平面的分子通量分布如图 9 所示。

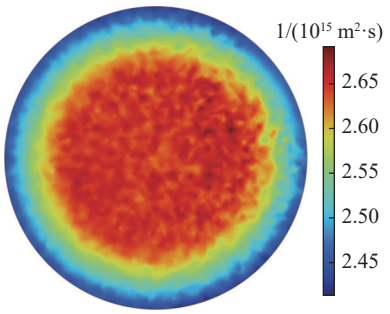

图9　旋转后 8 英寸衬底上分子通量分布情况

Fig. 9　Molecular flux distribution after rotation in 8 inches substrate

图 9 中 8 英寸范围内衬底平面的分子通量以同心圆的方式分布, 模拟了生长过程中实际到达衬底平面的束流分布, 以衬底平面直径为坐标范围, 其分子通量分布如图 10 所示。图 10 显示其平面分子通量以圆心对称分布, 非均匀性为 8.2%, 其不满足材料生长的束流均匀性分布要求, 为此需分析束源炉布局对均匀性的影响, 进而优化设计。

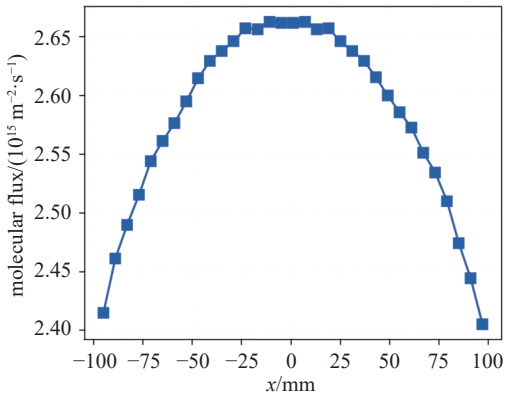

图10　8 英寸范围内分子通量均匀性分布

Fig. 10　The molecular flux uniform of in 8 inches substrate

3　仿真结果与分析

3.1　束源炉布局对到达衬底平面束流分布影响

在分子束外延系统中, 束源炉与衬底平面的距离和角度布局关系影响着束流的分布。本文以束源炉与衬底平面的距离和角度分别作为单一变量进行仿真计算, 以达到最优均匀性为目的, 实现最优布局设计。

以圆柱形坩埚的束源炉为仿真模型, 坩埚内径为 71.5 mm, 深度为 174 mm, 装料深度为 140 mm, 表 1 为边界条件, 在以束源炉与衬底夹角为单一变量下, 计算不同角度所产生的束流在旋转衬底平面的分布。以 8 英寸衬底为边界, 不同角度下的束流分布范围如图 11 所示。

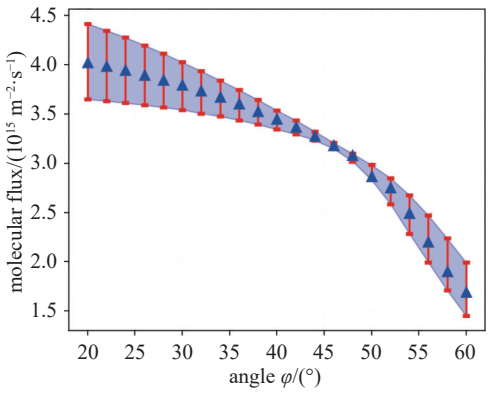

图11　不同角度φ下衬底平面分子通量比较

Fig. 11　Molecular flux comparison on the substrate plane at different angles φ

在图 11 中, 分别表示在不同角度下到达衬底平面的束流最大值、最小值和平均值, 束源炉与衬底在不同角度下, 对应其衬底平面束流的极值不同。在夹角为 46°时, 最大值与最小值最接近, 意味着该角度下衬底平面束流的分布变化最小。

同理, 以圆柱形束源炉结构为仿真模型, 表 1 为边界条件, 束源炉到衬底平面夹角为 46°下, 以束源炉到衬底平面距离作为单一变量, 在 8 英寸范围内, 对旋转衬底平面的束流分布做仿真, 有如图 12

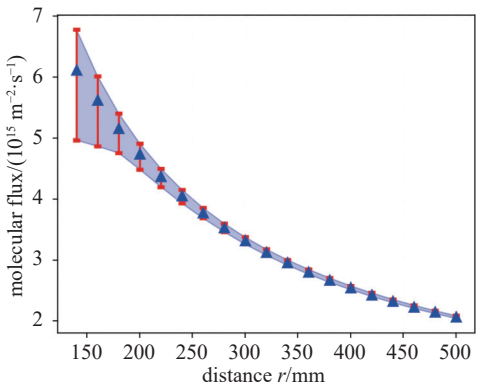

图12　不同距离下衬底平面分子通量比较

Fig. 12　Molecular flux comparison on the substrate plane at different distances

所示结果。

由图 12 可知，随着距离变大，到达衬底平面的平均束流变小，同时最大值与最小值之间的差距也缩小。结果表明，随着束源炉远离衬底，衬底平面束流的极值差变化有一个极速下降的过程，在远离一定距离后极值差下降速度减缓，图 12 中在距离大于 300 mm 时，束流极差比小于 1.4%。虽然距离越远衬底平面的束流均匀性越好，但到达衬底平面的平均束流会减小，如图 13 所示，源材料的利用率会降低造成源材料的浪费。

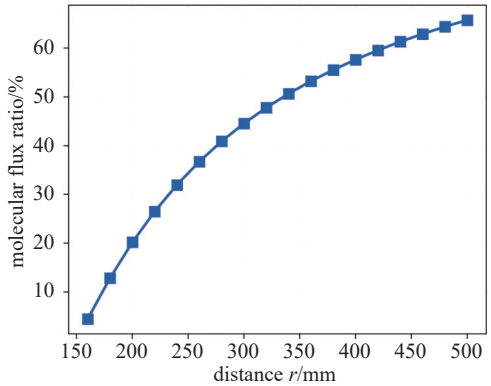

图13 不同距离下衬底平面分子通量均值下降情况

Fig. 13 The decrease of the average molecular flux on the substrate plane at different distances

综合上述角度和距离因素对衬底平面束流的影响，以本文模型为例，在 46°夹角和 300 mm 的距离是一个较优的选择，其到达衬底的束流极差比小于 1.5%，意味着非均匀性小于 1.5%，同时减小源材料浪费率。

3.2 束源炉形状对到达衬底平面束流分布影响

在束源炉设计时，束源炉坩埚的形状直接决定了源材料的容量和出射束流的分布。在分子束外延系统，坩埚形状的设计也直接影响了分子束外延系统中到达衬底平面的束流均匀性。

本文以不同形状的坩埚作为变量，设定束源炉到衬底平面中心距离为 350 mm、角度为 40°、蒸汽压为 2.0×10^{-6} Torr、分子量为 0.20401 kg/mol、蒸发温度为 883.15 K 等参数开展仿真实验，比较在衬底平面的分子通量分布。坩埚形状以典型的圆柱形、锥形和缩颈形坩埚为仿真模型，三种坩埚形状及尺寸如图 7 所示，仿真实验中源材料装料深度为 140 mm。在旋转衬底平面的分子通量分布结果如图 14 所示。

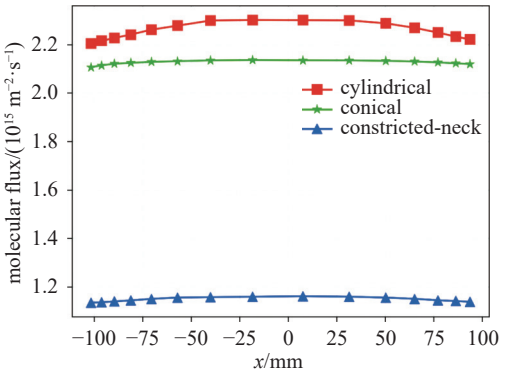

图14 不同形状坩埚在衬底上分子通量分布情况

Fig. 14 Distribution of molecular flux on substrate with crucibles of different shapes

由图 14 可知，在其他条件相同下，圆柱形、锥形和缩颈形坩埚的束源炉在衬底平面的分子通量分布不同，在旋转后得到的分子通量分布非均匀性分别为：4.36%、1.4% 和 2.35%。在上述模型中，锥形坩埚其到达衬底平面的分子通量分布均匀性相比其他两种更好。

3.3 束源炉内源材料使用量对束流的影响

束源炉坩埚的容量影响分子束外延系统的使用和换源频率，部分使用者为了能够延长换源周期，在系统中配置多个同样源材料的束源炉，提升外延工艺次数。在大尺寸分子束外延系统中，坩埚的容量更大。坩埚内源材料的使用量与出射束流的变化相关，在相同温度下束流的大小会随源材料的使用下降，直接影响薄膜材料生长的组分，因此，需要根据源材料的使用量来调整蒸发温度，保证束流的强度。通过束源炉内不同源材料量对束流的影响仿真，分析束流大小与材料使用量的相关性，在材料生长中更精准控制束流的大小。本文将束源炉内源材料装料量设置在 10 个不同的高度，仿真中蒸发面为圆柱形坩埚的水平等截面，相邻等截面之间距离相等，示意图如图 15 所示。

仿真实验中，束源炉坩埚内径为 71.5 mm，深度

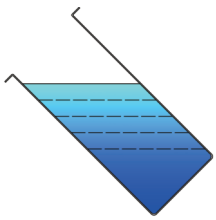

图15 坩埚内不同高度的等截面示意图

Fig. 15 Equal sections at different heights in the crucible

为 174 mm, 最大装料深度 140 mm, 相邻等截面之间距离为 7.5 mm, 束源炉到衬底平面中心距离为 400 mm, 角度为 46°, 蒸汽压强为 2.0×10^{-6} Torr, 分子量为 0.20401 kg/mol, 蒸发温度为 883.15 K, 以源材料液面高度作为变量进行仿真实验, 计算在衬底平面上的分子通量分布, 以 8 英寸衬底平面中心和两端点的束流作比较, 其束流变化如图 16 所示。结果显示, 随源材料的使用, 束流随之下降, 衬底平面上靠近束源炉的一侧束流最大, 束流下降速度也最快。在衬底中心位置, 束流下降斜率约为−2/3。

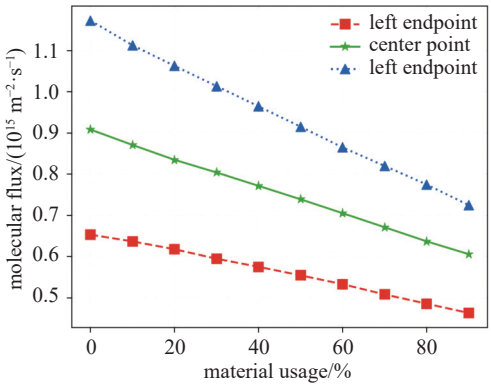

图16　不同位置分子通量变化情况

Fig. 16　Changes in molecular flux at different locations

4　结论

本文通过对分子束外延系统中束源炉束流产生原理和出射分布做了理论分析, 阐述了束流产生的计算公式和出射到空间中的束流分布计算方法。束源炉中的源材料蒸发到超高真空腔体内是一个复杂的过程, 其涉及到分子在坩埚内的吸附和反射等过程, 为更真实的反映到达衬底平面束流的分布, 本文以实际模型为例, 在 COMSOL 中使用分子流模块开展仿真, 并对束源炉的不同布局、不同形状和不同源材料使用量进行仿真分析。在本文模型的不同布局中, 束源炉与衬底夹角为 46°时, 其在衬底平面的束流极差值最小, 束流均匀性最好; 随束源炉远离衬底平面, 束流极差值的减小, 束流均匀性变好, 在 300 mm 之后束流极差值变小趋势变缓, 到达衬底平面的平均束流也减小, 材料利用率降低。在相同条件下坩埚的形状影响着衬底平面的束流均匀性, 本文模型中锥形坩埚束流均匀性优于缩颈形和圆柱形。综上可知, 束源炉在腔体内与衬底平面通过合理的布局设计可以实现较好的束流均匀性和源材料利用率, 本文模型中 46°和 300 mm 是一个较合适的布局。此外, 随着源材料的使用, 到达衬底平面的束流逐渐减小近似线性下降, 斜率约为−2/3。实际中分子束外延系统的设计需要考虑多种材料的束源炉和不同物理属性等问题, 通过理论计算和仿真模拟选择一个合适的布局可实现更优的解。本文的研究为分子束外延系统相关设计者和使用者提供理论基础和更直观的设计及使用思路, 特别是 8 英寸及以上的大尺寸分子束外延和特殊材料分子外延系统。

参　考　文　献

[1] Arthur J R. Molecular beam epitaxy[J]. Surface science, 2002, 500(1-3): 189−217

[2] O'Steen M, Readinger E, Farrell S, et al. systems and technology for production-scale molecular beam epitaxy[M]. Molecular Beam Epitaxy. Elsevier, 2018: 649−675

[3] Aberl J, Navarrete E P, Karaman M, et al. All epitaxial self-assembly of vertically-confined silicon color centers using ultra-low temperature epitaxy[J]. arXiv preprint arXiv: 2402.19227, 2024. https://arxiv.org/abs/2402.19227

[4] Chen F W, Lyu W L, Gong X, et al. Progress and prospect of molecular beam epitaxy equipment at home and abroad[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2024, 53(9): 1494−1503 (陈峰武, 吕文利, 龚欣, 等. 分子束外延设备国内外进展及展望 [J]. 人工晶体学报, 2024, 53(9): 1494−1503 (in Chinese))

[5] Herman M A, Sitter H. Molecular beam epitaxy: fundamentals and current status[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012

[6] Rinaldi F. Basics of molecular beam epitaxy (MBE)[J]. NIVERSITÄT ULM, 2002, 31−38

[7] Tsao J Y. Materials fundamentals of molecular beam epitaxy[M]. San Diego: Academic Press, 2012

[8] Henini, M, ed. Molecular beam epitaxy: from research to mass production[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2012

[9] Shukla A K, Banik S, Dhaka R S, et al. Versatile UHV compatible Knudsen type effusion cell[J]. Review of scientific instruments, 2004, 75(11): 4467−4470

[10] Knudsen M. Die gesetze der molekularstromung und der inneren reibungsstromung der gase durch rohren[J]. Annalen Der Physik, 1909, 333(1): 75−130

[11] Zhao J, Yang Y L, Li Y H, et al. The study of MBE molecule beam based on the ensemble theory[J]. Infrared Technology, 2006, 28(8): 466−469 (赵俊, 杨玉林, 李艳

辉, 等. 分子束外延系统束流系综理论分析 [J]. 红外技术, 2006, 28(8): 466−469 (in Chinese))

[12] Curless J A. Molecular beam epitaxy beam flux modeling[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena, 1985, 3(2): 531−534

[13] Yamashita T, Tomita T, Sakurai T. Calculations of molecular beam flux from liquid source[J]. Japanese journal of applied physics, 1987, 26(7R): 1192

[14] Nanbu K. Angular distributions of molecular flux from orifices of various thickness[J]. Vacuum, 1985, 35(12): 573−576

[15] Gericke W, Höricke M, Von Kalben J, et al. A detailed study of the molecular beam flux distribution of MBE effusion sources[J]. Vacuum, 1991, 42(18): 1209−1212

[16] Herman M A. Physical problems concerning effusion processes of semiconductors in molecular beam epitaxy[J]. Vacuum, 1982, 32(9): 555−565

[17] Vassent J L, Marty A, Gilles B, et al. Angular distribution of molecular beams and homogeneous layer growth: optimization of geometrical parameters in molecular beam epitaxy[J]. Vacuum, 2001, 64(1): 65−85

[18] Pryor R W. Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach[M]. Stockholm: Jones & Bartlett Publishers, 2009