文章编号: 1007-4252(2025)04-0302-08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0032 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0032

基于 LED 光源的分子束外延实时光学束流监测技术研究

张庆凌云[1,3], 王啸臻[1,3], 李建梅[1,3], 陈意桥[1,2,*]

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050; 2. 苏州焜原光电有限公司, 苏州 215211; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用谱宽度介于窄谱与宽谱之间的 LED 作为介谱光源, 基于原子吸收实现了对分子束外延生长过程中多元素束流强度的非侵入式实时测量与监控。该方案具有自校正特性, 无须引入额外校准光路即可有效抑制光源及光路中的波动与漂移, 表现出良好的鲁棒性。结合对标定片外延生长速率的精确计算, 利用光吸收度对 Ga 束源炉的束流强度进行了标定。在束源炉温度梯度调控束流强度的实验条件下, 特征光谱的光吸收度信号与离子规电流信号呈现显著的线性相关。对 Ga 束流监测数据的分析表明, 其光吸收度信号的变异系数为 5.85%, 验证了该方案在束流监测中的可靠性。此外, 探讨了 LED 光源在分子束外延束流监测系统中的优势, 详细分析了原子沉积引起的信号误差与漂移, 并提出了实际应用中对仪器结构的优化方法。研究的一个关键创新是采用高效、长寿命、低成本的 LED 光源替代空心阴极灯或低效热光源等传统光源, 结合邻近点参比方法, 简化了监测流程, 实现了对多种元素束流的同时监控, 为束流监测提供了一种经济、高效且实用的新方案, 在分子束外延生长速率监控与稳定性闭环控制方面具有重要的应用前景。

关键词: 原子吸收光谱; 分子束外延; 光学束流监测; 原位表征; 实时束流监控

中图分类号: TN305 **文献标志码:** A

Research on real-time optical flux monitoring technology in molecular beam epitaxy based on LED light source

ZHANG Qinglingyun[1,3], WANG Xiaozhen[1,3], LI Jianmei[1,3], CHEN Yiqiao[1,2,*]

(1. State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Acken Optoelectronics Ltd., Suzhou 215211, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An LED with a spectral width between narrow and wide spectrum light sources was employed

收稿日期: 2025-05-09; **修订日期:** 2025-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U2241227; No. 12393834).

作者简介: 张庆凌云 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分子束外延原位监测系统 (E-mail: zqly@mail.sim.ac.cn).

通信作者: 陈意桥 (1968—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为分子束外延生长与光电器件 (E-mail: yqchen@mail.sim.ac.cn).

as the meso-spectral light source solution. Based on atomic absorption, non-invasive real-time multi-element flux intensity measurement and monitoring were achieved during molecular beam epitaxy growth. This approach features self-calibration capabilities, effectively suppressing fluctuations and drifts in the light source and optical path without requiring an additional calibration path, thereby demonstrating strong robustness. By integrating precise calculations of the epitaxial growth rate of the calibration plate, the light absorption of the proposed method was calibrated to the flux intensity of the cells. Under experimental conditions where flux intensity was adjusted by the temperature gradient of the cell, the characteristic spectral light absorbance signal exhibited a significant linear correlation with the plasma gauge current signal. Through the analysis of the Ga flux monitoring data, the coefficient of variation of its light absorption signal was 5.85%, confirming the reliability of the beam monitoring scheme. This paper also explores the advantages of using an LED light source in molecular beam epitaxy flux monitoring systems, provides a detailed analysis of signal errors and drift caused by atomic deposition, and proposes optimization methods for instrument structure in practical applications. A key innovation of this study is the replacement of traditional hollow cathode lamp or inefficient thermal light sources with a high-efficiency, long-life, and low-cost LED light source. The monitoring process is simplified through the nearby point reference method, enabling simultaneous monitoring of multiple elements. This approach offers a cost-effective and practical solution for flux monitoring, with significant application potential in molecular beam epitaxy growth rate monitoring and stability closed-loop control.

Key words: atomic absorption spectroscopy; molecular beam epitaxy; optical flux monitoring; in-situ characterization; real-time flux monitoring

0　引言

分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)技术是一种原子级的精准薄膜制备工艺, 在Ⅱ类超晶格(type-Ⅱ superlattice, T2SL)和量子阱等精密外延结构的生长控制中, 对其束流强度的实时监测起着决定性作用[1]。然而, 传统的离子规监测方案存在实时性差、侵占生长室空间以及元素兼容性不足等诸多局限性。具体而言, 该方案的静态标定模式无法实现对生长过程的实时监控, 侵入式探头表面可能出现原子沉积进而导致信号漂移, 多元素外延时需要交替测量, 且缺乏定量比对能力[2-3]。

针对上述问题, 贝尔实验室[4-6]提出了一种基于原子吸收光谱(atomic absorption spectrometry, AAS)技术的光学束流监测方法。该方法通过构建非侵入式、多元素兼容的实时监测系统, 实现了束流强度与特征吸收光谱的定量关联。在该技术的演进过程中, 研究者通常采用两类光源方案: (1)使用窄谱光源, 如不同元素的空心阴极灯(hollow cathode lamp, HCL)、无电极放电灯[7]以及可调谐激光器[8]。尽管这些光源能够实现特征吸收光谱的自对准, 但存在光源寿命较短、辐射强度时漂显著以及多元素兼容性较差等问题, 在探测多元素束流时需要组合多个光源[9]; (2)使用宽谱热光源, 如卤素灯和 Xe 灯。这类光源虽然具备覆盖多元素特征谱线的优势, 但也存在光谱利用率低、热噪声干扰严重以及功率稳定性不足等问题[10]。相比之下, 采用介于宽谱与窄谱光源之间的介谱光源(包括但不限于 LED 等光源)进行束流监测成为一种新型解决方案[11]。LED 的谱宽通常为数十至上百纳米, 兼具长寿命(数万小时)、低成本及易用性等优势。

基于以上考虑, 本研究开展基于 LED 光源的 MBE 系统束流检测技术开发和系统构建。在外延生长速率标定时, 本研究引入自校准的邻近点参比法快速处理光谱信号, 从而获得光吸收度这一物理量。随后, 通过 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测量标定片厚度, 间接精确标定外延结构的生长速率, 并将其与光吸收度相关联, 最终将光吸收度作为束流监测的标定物理量。系统结构如图 1 所示。相较于传统监测方案, 本研究基于 LED-AAS 方案开发的束流监测系统, 一方面解决了 HCL-AAS 方案因光源寿命短需频繁更换灯管的问题, 另一方面克服了离子规方案中探头原子沉积导致的稳定性

劣化问题。本系统仅需单个灯头即可覆盖多个元素的特征吸收谱线，在保证束流监测精度的同时，还显著降低了维护成本。此外，本研究所采用的LED-AAS方案为MBE工艺提供了一种新型原位监测路径，其设计思路对其他AAS技术的应用领域也具有重要参考价值。

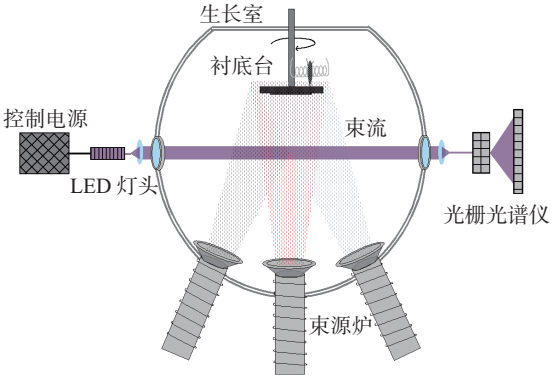

图1 基于LED光源的MBE束流监测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the MBE flux monitoring system based on an LED light source

1 系统实现

1.1 物理构建

本研究的目标是通过特征光谱匹配的LED光源与MBE设备的光路集成，构建非侵入式光学束流监测系统。因此，基于Al(394.4 nm/396.2 nm)、Ga(403.3 nm)及In(410.2 nm)等目标元素的特征吸收谱线分布特性，选用中心波长为405 nm、半高宽为15 nm的紫外LED光源灯头，以覆盖多元素束流监测需求。

针对分子束外延生长室对穿窗口及法兰的几何约束，设计了模块化准直耦合光机组件。采用焦距分别为10 mm和40 mm的透镜组，将LED光束准直为直径为40 mm的平行光，并通过精密调整架实现入射光斑与101.6 mm束流核心区的空间耦合，确保光场与束流空间的重叠。光源输入端如图2所示。在动态校准过程中，利用紫外光功率计探头测量对穿生长室后由反射镜耦合的辐射强度，通过优化俯仰角与横向位移，将系统的整体光通量损耗控制在5%以内。

经离轴抛物面反射镜耦合的调制光信号，由紫外增强型光纤导入高分辨率光谱仪。该设备搭载

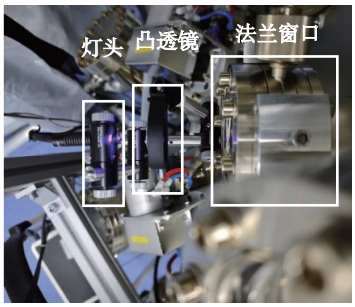

图2 LED光源灯头-准直组合透镜-生长室窗口光路系统

Fig. 2 Light path system with LED light source cap-collimating combination lens-growth chamber window

2048像素电荷耦合器件(CCD)探测器，在194~428 nm波段内可实现0.11 nm的光学分辨率，单光子灵敏度达130光子@400 nm，光信号信噪比可达300∶1。最终，通过上位机采集包含特征谱线光吸收度信息的光谱数据。

1.2 参比结果

1.2.1 背景光谱参比

采用背景光谱参比法对Ga原子束流进行监测，具体流程为：在束源炉挡板关闭状态下，获取原始LED光谱作为背景基准，然后通过光谱比值法提取束流开启后的特征光谱光吸收度。

背景扣除后，在束流开启状态下，LED激发光谱波段的光强均呈现衰减趋势，且衰减幅度与生长室的入射光强呈线性关系。由于光路组件保持恒定，该衰减趋势证实了分子散射强度与入射光强的正相关性。由图3的光谱结果可以看出：在波长为403.3 nm的位置，出现显著的Ga原子吸收信号，光吸收度为1.5%；而在另一特征吸收波长(417.2 nm)，因光强衰减至噪声基底，有效信号被湮没。这一结果揭示了LED光源在弱特征吸收峰检测中的局限性。为拓展探测光谱范围，可通过扩展光源谱宽或采用多波段LED光源，从而实现对多谱线乃至多元素束流的同步监测。

1.2.2 邻近点参比

与HCL-AAS方案只能监测特征吸收单波长辐射强度不同，LED-AAS方案采集的数据为连续光谱，因此可基于邻近点参比法实现动态背景自校准。该方法将目标波长左右两侧的信号作为参考信号，并与目标波长信号进行参比。由于参考信号中已包含与目标信号同步的各种波动和干扰因素

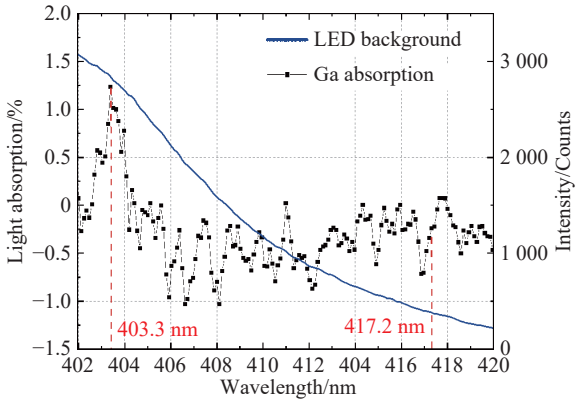

图 3　402~420 nm 范围内 LED 背景光谱与 Ga 的特征吸收光谱图。光谱仪积分时间为 1 ms, 取连续采样 10 次的均值

Fig. 3 Background spectra of LED and characteristic absorption spectra of Ga in the range of 402-420 nm. The integration time of spectrometer is 1 ms. The mean spectra is obtained from 10 consecutive sampling iterations

(如光路和光源本身的波动、驱动电源及检测仪器的波动等), 因此进行参比可有效消除这些影响, 从而实现良好的校准效果。作为一种自校准的单光路参比方法, 该方法无须预设背景光谱基准, 仅需一次光谱采集即可完成对特征峰的动态解析, 满足多元素束流监测的实时性需求, 同时具有较强的抗光路波动能力, 表现出优异的鲁棒性。

如图 4 所示, 具体方法如下: 以目标元素特征吸收峰的中心波长 λ_0 为基准, 在其两侧对称选取参比点($\lambda_0\pm\Delta\lambda$)。其中, 参比带宽 $\Delta\lambda$ 设置为吸收峰半高宽的两倍以上, 以确保参比点位于特征吸收区之外。测量参比点的光强并取其均值作为背景基准信号, 可有效表征非特征吸收及仪器噪声的影响。

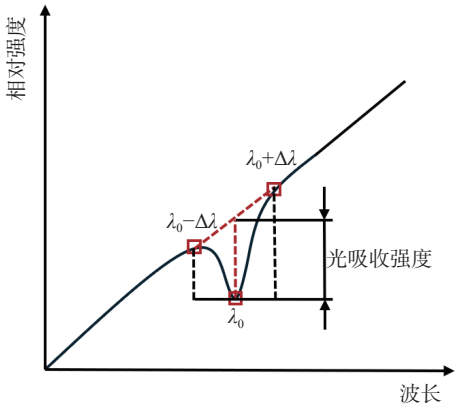

图 4　介谱光源特征吸收谱的邻近点参比法

Fig. 4 Reference method for adjacent points in the characteristic absorption spectra of mid-spectral light sources

将特征波长 λ_0 处的实测光强与背景基准信号相减, 即可获得与束流强度成正比的净特征吸收信号, 从而有效抑制背景干扰和瞬态波动。

1.3　功能验证

1.3.1　挡板开关束流瞬态

在束流监测系统中, 通过 1.2.2 节所述邻近点参比法拓展的上位机软件, 实现对光吸收度信号的抓取和对束源炉开关瞬态束流强度的分析。

实验以 Ga 束源炉为研究对象, 挡板开闭间隔设定为 100 s, 同步采集特征波长 403.3 nm 处的光吸收度与离子规电流信号, 对应的采样率分别为 10 Hz 与 1 Hz。光吸收度采集数据与离子规电流信号一一对应, 取每 10 个数据点的均值。挡板开启时, Ga 束流强度对应的光吸收度变异系数为 5.85%。图 5 的结果显示: 挡板开启瞬间, 光吸收度在 1 个均值点内迅速从 0.19% 上升至稳态值 0.60%, 这一快速响应特性符合束源炉注入自由原子模型; 挡板关闭后, 光吸收度呈现较慢的指数衰减趋势, 对应于 3 个均值点的下降过程。该弛豫过程反映了在冷泵吸附速率限制下生长室内自由原子的清除动力学行为[12]。

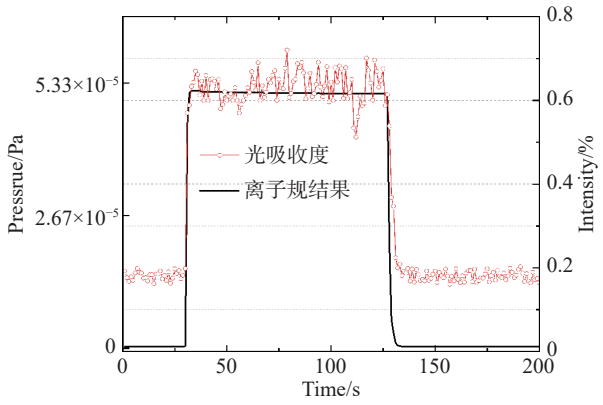

图 5　传统离子规系统(压强)与 LED-AAS 系统(光吸收度)对 Ga 束源挡板开关瞬态束流强度的监测对比

Fig. 5 Comparison of transient beam intensity monitoring during Ga beam source shutter switching between conventional ion gauge (via pressure) and LED-AAS (via light absorbance)

1.3.2　多元素束流监测

实验采用中心波长为 405 nm、半波宽为 15 nm 的 LED 光源灯头, 其光谱范围可覆盖 Al、Ga、In 等 3 种元素的部分特征吸收光谱。因此, 在测试过程中无须改变光路或切换光源, 避免了额外变量的

引入。光谱仪的积分时间设定为 10 ms，并采用连续背景校正模式以扣除暗底噪声。实验中，按顺序依次开启 Al、Ga、In 等 3 种束源炉的挡板。3 种元素的特征光谱峰间距均显著大于仪器分辨率，因此光谱干扰可忽略不计。经与原始 LED 光谱背景进行参比校正后，得到 3 种元素依次叠加的特征吸收光谱如图 6 所示。

实验结果表明，光吸收度测量方法能够有效表征束流的独立性与叠加特性，从而验证了基于 LED 光源构建的束流监测系统相较于离子规束流监测的优势。

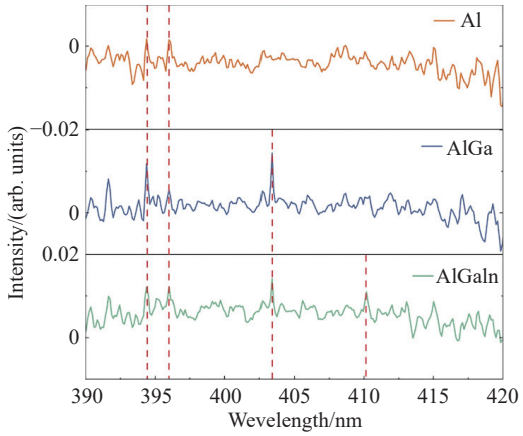

图 6 Al、Ga、In 束源炉依次开启后在 390~420 nm 范围内的光吸收度对比

Fig. 6 Comparison of light absorbance in the range of 390-420 nm under the sequential opening of Al, Ga, and In cells

1.4 生长速率标定

为标定生长速率与光吸收度之间的对应关系，首先利用反射高能电子衍射（RHEED）振荡初步估算标定片的外延生长速率，并在适当条件下外延生长 T2SL 结构，同步记录光吸收度数据[13]；随后，利用 XRD 测量获得标定片超晶格周期的精确厚度，再根据 T2SL 的周期反推生长时的精确生长速率；最终，将多组束源炉条件与对应的超晶格厚度进行关联标定，从而确定生长速率与光吸收度的关系。下面对这一过程进行详细阐述。

1.4.1 利用 RHEED 估计生长速率

在 GaAs 衬底上进行 RHEED 振荡实验，保持衬底台静止，选取图像上的监测点（图 7(a)），实时采集衍射强度的时序信号。采用矩形窗滑动截取 7 个振荡周期的时域信号段（图 7(b)），经快速傅里叶变换将其转换至频域（图 7(c)），频谱的主峰位置（0.64 Hz）对应于生长过程的振荡基频。结合 GaAs 的晶格常数（0.5653 nm），根据该基频可初步计算出 Ga 的生长速率 R_{Ga} 为 0.181 nm·s^{-1}。根据经验，将 Ga 束源炉温度降低约 20 ℃ 可使生长速率减半，在此基础上进一步降温约 60 ℃，最终确定使 R_{Ga} 达到 0.02 nm·s^{-1} 的温度点。采用相同流程，可确定出使 In 生长速率 R_{In} 为 0.08 nm·s^{-1} 的 In 束源炉温度点[14]。

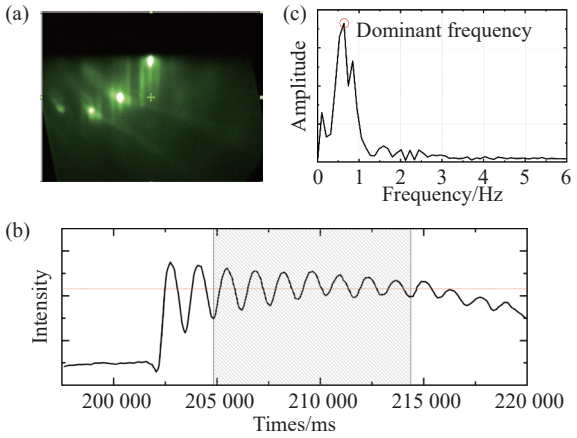

图 7 (a) GaAs 衬底上 RHEED 振荡实验的取点位置；(b)衍射强度的时域变化，窗口显示截取的 7 个振荡周期；(c)经快速傅里叶变换后的频谱

Fig. 7 (a) The position of take-up points for the RHEED oscillation experiment on a GaAs substrate. (b) The variation of diffraction intensity in the time domain. The window shows the isolated 7 oscillation periods. (c) The spectrum obtained by the fast Fourier transform

1.4.2 利用 XRD 测定生长速率

超晶格结构的外延生长按照以下顺序进行：50 nm 厚的 GaSb 同质外延缓冲层、一套 200 nm 厚的 7 MLs InAs/13 MLs GaSb 的超晶格 SL1、另一套 200 nm 厚的 7 MLs InAs/6.5 MLs GaSb 的超晶格 SL2 以及 20 nm 厚的 GaSb 盖层。此处 ML 代表单层膜。实验中，采用研制的束流监测系统记录挡板开启时 In 和 Ga 束流所对应的光吸收度数据。

根据式(1)所示的超晶格厚度 Λ 计算公式，对图 8 中 InAs/GaSb 超晶格的 XRD 测试结果进行标定分析。

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\cdot\Delta(2\theta)\cos\theta_B} \tag{1}$$

式中，λ 为 X 射线的波长，$\Delta(2\theta)$ 为相邻卫星峰的间距，θ_B 为主峰的布拉格角。基于以上数据，可计算

得到标定片 InAs/GaSb 中 SL1 的实际周期厚度为 6.31 nm, SL2 的实际周期厚度为 4.24 nm。结合该标定片的超晶格生长循环参数: SL1 中 InAs 和 GaSb 的外延时间分别为 25.7 s 和 198.2 s, SL2 中 InAs 和 GaSb 的外延时间分别为 25.7 s 和 99.1 s, 求解可得 InAs 和 GaSb 的实际生长速率分别为 R_{In}=0.0844 nm·s^{-1} 和 R_{Ga}=0.0209 nm·s^{-1}。此外可以得出, 该生长速率标定片对应的 In 和 Ga 特征波长光吸收强度分别为 0.626% 和 0.545%。

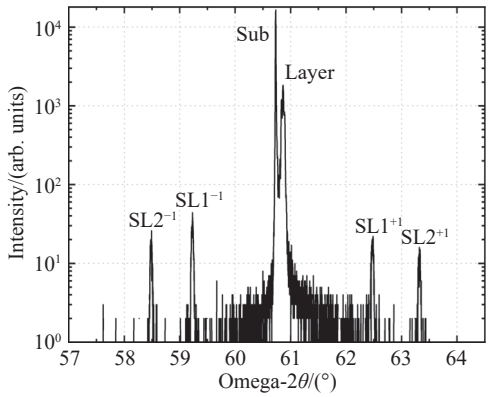

图 8　两种周期 InAs/GaSb 超晶格在生长速率标定片上的 XRD 测量结果

Fig. 8 Result of XRD measurements of InAs/GaSb SL for two cycles on the growth rate calibration sample

2　讨论

对比分析在不同束源炉温度下离子规电流和光吸收度对束流的标定结果, 验证两种仪器在束流监测中的协同响应关系及变化趋势一致性。同时, 进一步探讨原子沉积导致的信号漂移影响、仪器封装使用中可能遇到的问题及其改进方向。

2.1　束源炉温度点标定

为标定生长速率与特征光谱光吸收度之间的协同响应关系, 以一个 Ga 束源炉为研究对象展开验证。在基准温度 926.5 ℃ 下, 采用 1.4 节所述方法标定 Ga 的生长速率, 结果为 0.0747 nm·s^{-1}。实验中, 挡板开启瞬间采集前 20 个数据点的均值, 测得离子规的电离电流为 0.397 pA; 同时, 对称选取距 Ga 特征波长中心(403.3 nm)3 个数据点步长的位置作为参比点, 对两参比点作算术平均得到光吸收度为 0.646 %。

实验设置了 5 个温度点(886.5 ℃、906.5 ℃、926.5 ℃、946.5 ℃、966.5 ℃), 覆盖 80 ℃ 的变化范围。通过调节束源炉温度实现束流强度的梯度变化, 并同步记录各温度点的离子规电离电流与光吸收度数据。其中, 离子规所测束流可通过式(2)实现与压强的换算[15]。

$$K = \frac{i_+}{i_e P} \tag{2}$$

式中, K 为离子规灵敏度常数, P 为腔体压强, i_e 为灯丝发射电流, 据此可计算出栅极离子电流 i_+。通过改变束源炉温度来调控束流, 结果表明光吸收度与离子规电流信号之间表现出高度协同的响应特性, 如图 9 所示。其斯皮尔曼(Spearman)相关系数为 1.0, 统计显著性高达 0.0087。然而, 这 2 套数据对束源炉温度的响应存在显著差异: 当温度升高时, 离子规电流从低本底的 0.174 pA 增长至 0.887 pA (增幅约 410%), 而光吸收度从较高本底(0.568 %)基础上提升至 0.850 %(增幅约 50 %)。这种差异源于二者的物理机制不同: 光吸收反映束流中原子的相对浓度变化, 而离子规测量的是绝对粒子通量。测试结果为 MBE 系统中不同束流监测技术的相互校准提供了实验依据。

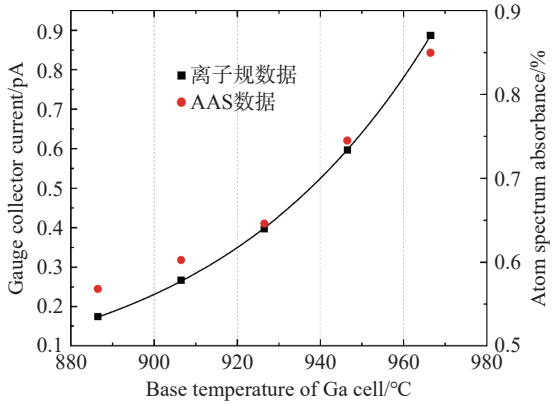

图 9　在 5 个 Ga 束源炉温度点下离子规电离电流监测(黑色方点)和 LED-AAS 光吸收度监测(红色圆点)数据的对比。黑色曲线为对离子规数据的拟合结果

Fig. 9 Comparison between ionization gauge ionization current monitoring (black square points) and LED-AAS light absorbance monitoring (red dots) for Ga cell at 5 temperature points. The black curve shows the fitting results for ionization gauge data

2.2　原子沉积的影响

早期小型生长室的光学窗口沉积效应会显著降低光学监测的稳定性, 导致明显的短期和长期测量漂移[16]。尽管现在的 MBE 设备生长室的容积已扩大, 但原子沉积仍可能通过干扰光路引起光吸

收度信号的漂移。实验中，采用积分时间为 2 ms 的百次均值光谱数据来消除背景噪声，并选取基底光强大于 40 counts 的谱线来计算透射率。采用 Hg-Ar 标准光源和 Sb HCL 进行透射率测试，以沉积 Sb 薄膜前后的石英片透射光强比值（$T = I/I_0$）来定量表征沉积效应，其中 I 和 I_0 分别为沉积 Sb 后和原始石英片的透射光强。

图 10(a)展示了在石英片上进行 Sb 束流喷涂 30 s 与 90 s 形成的 Sb 金属薄膜的图片。对比未沉积和沉积 45 s 的结果（图 10(b)）可以看到，宽谱范围内分子散射引起的光吸收度显著衰减，表明石英窗口的沉积厚度对光吸收具有显著影响。观察汞氩灯的辐射峰强度可以看出，在约 2 min 的沉积后，石英片在 200~400 nm 非特征波段的平均透射率出现了近一个数量级的衰减，表明短时间沉积即可引发严重的光衰减。通过对 Hg-Ar 光源与 Sb HCL 在邻近波段的特征辐射峰值进行计算，可得到不同沉积时间下的光吸收度抛物线的拟合曲线，如图 10(c)所示。两条拟合曲线之间的区域反映了特征谱线吸收在光吸收度中的贡献，该特征吸收度在 Sb 沉积达到一定厚度后趋于稳定，因此长期漂移主要受宽谱分子散射的影响。

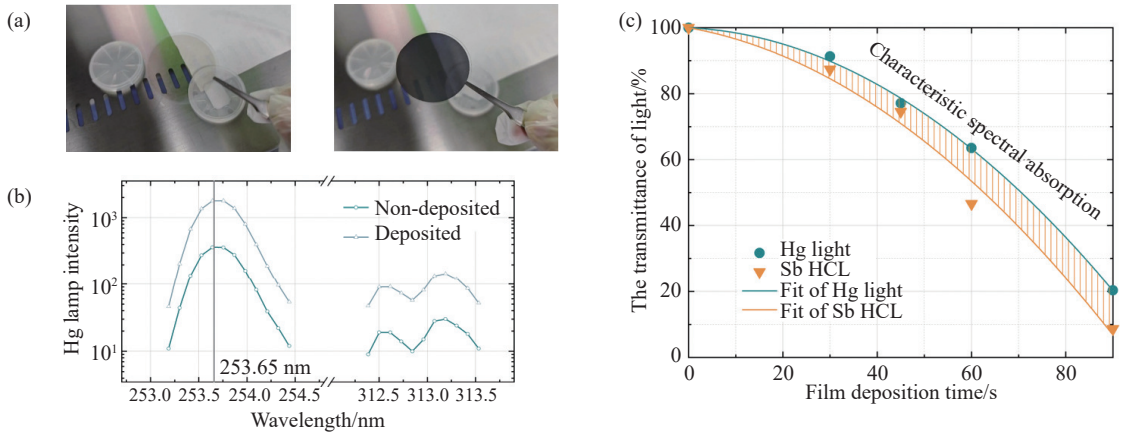

图 10 (a)石英片喷涂 Sb 束流 30 s 和 90 s 后的 Sb 金属薄膜；(b) Hg-Ar 光源在紫外(UV)波段的激发谱线穿过沉积 Sb 45 s 的石英片的辐射衰减；(c) Hg-Ar 光源和 Sb HCL 在穿过经不同 Sb 沉积时间的石英片的光吸收度对比

Fig. 10 (a) Sb metal film by coating with an Sb flux of 30 s and 90 s on the quartz plate. (b) The radiation attenuation of the excitation spectral lines of Hg-Ar light source in the ultraviolet (UV) band passing through a quartz plate deposited with Sb for 45 s. (c) A comparison of light absorption between the Hg-Ar light source and the Sb HCL passing throung the quartz plate subjected to various Sb deposition intervals

在 LED-AAS 方案中，窗口挡板开启时生长室内的少量束流会不可避免地沉积于石英窗口。尽管石英窗口并非束源炉的直接喷射靶向区域，且真空系统可抽除大部分自由原子，但残留的微量沉积仍会导致石英窗口透射率的长期漂移。因此，本系统要求定期对 AAS 束流监测系统进行光学校准，并在设备维护周期内对窗口进行清洁或更换。

2.3 优化方向

为推动束流监测技术向仪器化方向发展，提升光谱解析能力是关键的优化路径。目前使用的 0.11 nm 分辨率光栅光谱仪难以有效解析本征半高宽约为 0.001 nm 的原子特征吸收峰。当光谱仪的分辨率接近吸收峰的本征线宽时，可显著改善信号质量，特征峰更加锐化，信噪比随之提高，且经参比校正后的信号稳定性同步增强。这方面的优化能够有效提高束流强度的监测精度，满足原子层外延工艺的严格需求。

3 总结与展望

本研究构建了一套基于 LED 介谱光源的原子吸收光谱束流监测系统，实现了对 MBE 过程中多元素束流的实时光学监测。该系统采用具有瞬态自校准功能的邻近点参比方法，通过实时采集与束流作用后的特征吸收光谱，并结合专用软件进行信号处理，可快速计算出与实际束流强度相关的光吸收度，作为 MBE 生长过程中的在线实时束流控制信号。实验中通过 RHEED 估算和 XRD 精确测量超晶格厚度，将生长速率与光吸收度相关联，并验证了传统离子规与本文所提出的 AAS 束流监测系

统的协同响应关系。

本研究所搭建的系统在束流监测分辨率和灵敏度方面虽仍低于现有的离子规方法, 但其在实时性、使用寿命、系统信号鲁棒性、多元素束流监测等方面具有优势。后续对仪器的改进与开发将聚焦于: (1)优化光学窗口的抗污染设计; (2)采用高分辨率光谱仪以提升束流监测灵敏度; (3)开发自适应校准算法以及斩波锁相技术, 以补偿原子窗口沉积带来的影响。

参考文献:

[1] ZHOU H, CHEN Y, LIU C. High-quality InAs homoepitaxial layers grown by molecular beam epitaxy[J]. Journal of Crystal Growth, 2025, 650: 127989.

[2] WUNDER R, STALL R, MALIK R, et al. Automated growth of $Al_xGa_{1-x}As$ and $In_xGa_{1-x}As$ by molecular beam epitaxy using an ion gauge flux monitor[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena, 1985, 3(4): 964-967.

[3] SHEN C, ZHAN W, LI M, et al. Development of in situ characterization techniques in molecular beam epitaxy[J]. Journal of Semiconductors, 2024, 45(3): 031301.

[4] KOMETANI T Y, WIEGMANN W. Measurement of Ga and Al in a molecular-beam epitaxy chamber by atomic absorption spectrometry (AAS)[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1975, 12(4): 933-936.

[5] DU Y, DROUBAY T C, LIYU A V, et al. Self-corrected sensors based on atomic absorption spectroscopy for atom flux measurements in molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(16): 163110.

[6] LAGALANTE A F. Atomic absorption spectroscopy: a tutorial review[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2004, 34(3): 173-189.

[7] JENSEN J, ROTH J, BREWER P, et al. Integrated multi-sensor control of II–VI MBE for growth of complex IR detector structures[J]. Journal of Electronic Materials, 1998, 27: 494-499.

[8] VIGNAUD D, MOLLOT F. Real-time in-situ flux monitoring by wavelength-modulated atomic absorption spectroscopy in molecular beam epitaxy: Application to Ga flux measurement[J]. Journal of Crystal Growth, 2007, 301/302: 79-83.

[9] KASAI Y, SUZUKI A, TANOUE H, et al. MBE growth of BiSrCaCuO films using flux monitoring by atomic absorption spectroscopy[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Superconductivity (ISS'94). Berlin: Springer, 1995: 897-900.

[10] 张庆凌云, 陈意桥. 原子吸收光谱在线束流监控技术在分子束外延中的应用及研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(1): 11-21.

[11] 张永刚, 陈意桥, 颜全. 一种基于介谱光源的实时束流测量系统及其自校准方法: CN119556324A[P]. 2025-03-04.

[12] HEYN C, CUNIS S. Shutter transients during solid-source epitaxy[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2005, 23(5): 2014-2020.

[13] FOXON C T. Dynamic aspects of growth by MBE[C]// Proceedings of the Winter School Les Houches. Berlin: Springer, 1986: 216-225.

[14] PARKER E H C. The technology and physics of molecular beam epitaxy[M]. Boston: Springer US, 1985.

[15] AUTOMATION B. The instruction manual of Granville-Phillips series 350 UHV gauge controller[EB/OL]. [2025-02-03]. https://bl831.als.lbl.gov/~gmeigs/PDF/Granville_Phillips_350_IG_Controller.pdf.

[16] JACKSON A W, PINSUKANJANA P R, GOSSARD A C, et al. Noise, drift, and calibration in optical flux monitoring for MBE[J]. Journal of crystal growth, 1999, 201/202: 17-21.