

doi: 10.3788/gzxb20174606.0622002

# MOCVD 多功能在线监测探头的设计与实现

杨超普<sup>1,2</sup>, 方文卿<sup>3</sup>, 刘明宝<sup>1,2</sup>, 李春<sup>1,2</sup>, 周春生<sup>1,2</sup>

(1 商洛学院 化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000)

(2 商洛学院 陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000)

(3 南昌大学 国家硅基 LED 工程技术研究中心, 南昌 330047)

**摘 要:**根据 MOCVD 在线监测设备的发展需要,设计了一种多功能在线监测探头,能够同时实现带反射率修正的三种红外辐射测温以及两个波长的反射率曲线监测,即:940 nm/1 550 nm 双波长比色测温、940 nm 单色辐射测温、1 550 nm 单色辐射测温、940 nm 反射率曲线以及 1 550 nm 反射率曲线监测。对探头的比色测温性能进行测试分析,并利用该探头对 Si(111)衬底在我国自主研发的 MOCVD 系统中生长 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片进行在线监测。结果分析表明:比色测温 900℃~1 100℃ 范围内精度高于 1℃;在 700℃~1 100℃ 范围内重复性误差均在 0.7℃ 内;距离容差为 2 mm;三种红外测温最低量程均为 435℃;并能有效避免探测孔有效面积变化的影响;由 940 nm 反射率曲线得:n-GaN 层的膜厚监测相对误差为 3.6%。该设计能够同时实现 MOCVD 在线测温及膜厚测量,可为 MOCVD 在线监测设备开发提供参考。

**关键词:**光学设计;在线监测;红外测温;外延;MOCVD;膜厚测量

中图分类号:TN305;TB96

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)06-0622002-7

## Design and Implementation of Multi-functional in situ Monitoring Probe Based on MOCVD

YANG Chao-pu<sup>1,2</sup>, FANG Wen-qing<sup>3</sup>, LIU Ming-bao<sup>1,2</sup>, Li Chun<sup>1,2</sup>, ZHOU Chun-sheng<sup>1,2</sup>

(1 College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China)

(2 Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China)

(3 National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China)

**Abstract:** According to the development needs of in situ monitoring equipment of MOCVD, a multi-functional in situ monitoring probe was designed, which can measure three infrared thermometry with reflectivity correction and reflectivity curve of two different wavelengths, namely: 940 nm/1 550 nm double-wavelength colorimetric thermometry, 940 nm monochromatic radiation thermometry, 1 550 nm monochromatic radiation thermometry, 940 nm reflectivity curve and 1 550 nm reflectivity curve. The test measuring analysis was done for the properties of in-situ monitoring probe, the silicon (111) substrate growing blue light LED epitaxial wafer with InGaN/GaN MQW structure in homemade MOCVD system by using the probe, was monitored on-line. Result shows that the lowest range of three infrared thermometry is equally 435℃; the accuracy within 1℃ colorimetric temperature range from 900℃ to 1 100℃; the repeatability within 0.7℃ from 700℃ to 1 100℃; insensitive to changes in height

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(No. 2011AA03A101)、陕西省尾矿资源综合利用重点实验室开放基金(No. 2014SKY-WK012)、陕西省教育厅专项科研计划(No. 16JK1241)和商洛市科技计划(No. SK2015-29)资助

**第一作者:**杨超普(1987-),男,讲师,硕士,主要研究方向为 MOCVD 在线监测设备研发. Email: 1754510624@qq.com

**通讯作者:**方文卿(1964-),男,教授,硕士,主要研究方向为外延生长的在线光电检测仪器. Email: fwq@ncu.edu.cn

**收稿日期:**2016-12-12; **录用日期:**2017-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

within 2 mm; and the method can avoid the affection of the effective area change of detector aperture. The relative error of n-GaN layer thickness measurement was 3.6% by analyzing 940 nm reflectivity curve. So it can be seen that MOCVD in situ thermometry and film thickness measurement can be achieved by the probe at the same time. The design can provide reference for the developing of MOCVD in situ monitoring device.

**Key words:** Optical design; In situ monitoring; Infrared thermometry; Epitaxial; MOCVD; Film thickness measurement

**OCIS Codes:** 220.0220, 120.4570; 230.5160; 310.6845

## 0 引言

金属有机物化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)是生产 LED 外延片的核心设备<sup>[1]</sup>. 在利用 MOCVD 系统进行高质量晶体薄膜的外延生长过程中, 反应室内石墨盘温度及均匀性、衬底及外延片上表面温度、外延层的生长速率、各层薄膜厚度、表面粗糙度等参数都会直接影响外延层的晶体质量以及器件的最终性能. 例如: 在 Si(111) 衬底上生长 GaN 基 MQW 结构 LED 外延片的掺 In 过程中, 温度每偏差 1℃, 将最终引起器件的中心波长漂移约 1.2 nm<sup>[2-4]</sup>; MOCVD 在线监测技术一般是通过光学方式, 对外延片生长过程中一些特性参数进行实时、在线、全过程无损监测, 及时了解各监测参数变化, 研究各参数对外延层生长的影响, 优化工艺、提高产品良率与重现性<sup>[5]</sup>. 常见的应用于生产型 MOCVD 系统在线监测设备主要有激光膜厚仪、红外辐射测温仪、光束挠度计等.

目前国际商用在线监测设备多由 MOCVD 制造商推出, 或为相关公司与 MOCVD 制造商合作研发, 其产品针对性较强. 如美国 Veeco、日本 Nippon Sanso、日本日亚等 MOCVD 制造商均开发有针对本公司 MOCVD 系统的在线监测设备. 德国 LayTec 公司和全球最大的 MOCVD 制造商 AIXTRON 合作, 为其 MOCVD 系统开发了配套的 Epi 系列在线监测设备<sup>[6]</sup>. 设备价格昂贵, LayTec 公司的 EpiTT 3W 和其配套的修正校准设备, 国内售价高达 85 万元. MOCVD 多功能在线监测探头能同时监测多个参数, 增加了在线监测设备的集成度, 节约了空间, 使 MOCVD 同时安装多种在线监测设备成为可能. LayTec 公司 2005 年推出可同时测量温度、膜厚和翘曲的 EpiCurve<sup>®</sup> TT, Veeco 公司推出集测温 and 测膜厚于一体的 RealTemp<sup>®</sup> 200<sup>[7]</sup>.

近年来, MOCVD 系统国产化已取得重大突破, 为我国 MOCVD 系统开发配套的多功能在线监测设备势在必行. 本文给出了一种多功能在线监测探头(可同时实现 940 nm、1 550 nm 两个单色辐射测温, 940 nm/1 550 nm 双波长比色测温, 以及 940 nm、1 550 nm 两个波长的反射率曲线)的设计方案, 对其双波长比色测温的精度、重复性及距离敏感性进行测试分析, 并将该探头安装于南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD 系统, 对 Si(111) 衬底上生长 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片过程进行了在线监测, 测量结果表明, 该探头满足 MOCVD 外延生长在线测温及反射率曲线测量的相关要求.

## 1 在线监测原理

应用于 MOCVD 的在线监测设备安装于 MOCVD 反应器上顶板预留的无应力石英光学视窗上方, 在外延生长的过程中通过光学方式, 透过光学视窗与喷淋孔, 利用监测探头探测置于石墨盘上表面凹坑内外延片的光学信号, 进而得到所监测的特性参数. MOCVD 在线监测设备包括光学系统、探测系统、信号处理系统与显示系统. 其原理见图 1 所示.

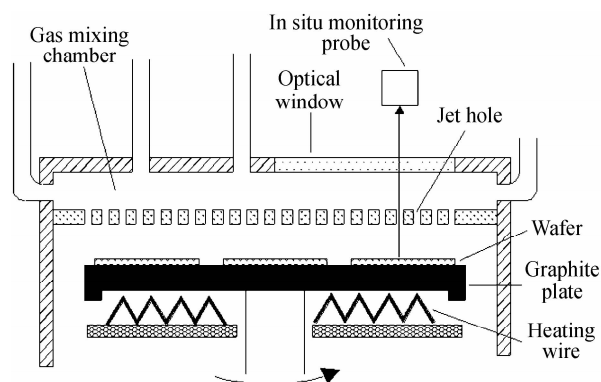


图 1 MOCVD 在线监测示意图

Fig. 1 Schematic of MOCVD in situ monitoring

### 1.1 红外测温原理

MOCVD 红外测温是在外延生长过程中通过安装于光学视窗上方的监测探头探测高温石墨盘与外延片的红外辐射强度, 进而实现温度测量. 其理论基础为 Planck 黑体辐射公式, 为提高精度, 还需利用 Kirchoff

定律与能量守恒定律进行光谱发射率修正<sup>[8-9]</sup>.应用于MOCVD的红外测温方法主要有:单色辐射测温法与双波长比色测温法<sup>[10]</sup>.单色辐射测温法是通过高OD值的窄带滤光片选择性透过特定波长的红外辐射,利用探测器测量辐射强度,根据Planck黑体辐射公式及光谱发射率修正来测量温度.双波长比色测温法是通过分光片、窄带滤光片,选择性地透过两个红外波长的单色辐射能,分别测量辐射能的大小,利用二者的比值确定被测物的温度<sup>[11]</sup>.其实现方式均是:通过光学系统选择特定波长的红外辐射;利用光电探测器将光子信号转化为电流信号;微弱电流信号经过带高阻值反馈电阻的运算放大器处理得到电压信号;根据Planck公式以及信号处理原理得到电压与温度关系,进而得到被测温度.应用于MOCVD反应室的单色辐射测温法与双波长比色测温法的温度公式分别为

$$T = \frac{hc}{\lambda k \ln \left[ \frac{2\pi c e R S \eta \lambda^{-4} \epsilon(\lambda)}{\alpha V(\lambda, T)} \right]} \quad (1)$$

$$T = \frac{hc \left[ (1/\lambda_2) - (1/\lambda_1) \right]}{k \left\{ \ln \left[ \frac{\alpha_1 \eta_2 R_2 \lambda_2 V(\lambda_1, T)}{\alpha_2 \eta_1 R_1 \lambda_1 V(\lambda_2, T)} \right] - 5 \ln(\lambda_2/\lambda_1) - \ln[\epsilon(\lambda_1)/\epsilon(\lambda_2)] \right\}} \quad (2)$$

式中 $h$ 为普朗克常数, $c$ 为真空中的光速, $k$ 为玻尔兹曼常数, $e$ 为元电荷电量, $R$ 为反馈电阻阻值, $\lambda$ 为红外辐射波长,且均已知. $S$ 为MOCVD探测孔的有效面积,在外延生长过程中生成物会在探测孔上沉积,需要定期利用专用设备对探测孔进行校准. $\eta$ 为光电探测器的量子效率, $\alpha$ 为红外辐射传播过程中衰减引入的系数(与光学视窗、分光片等的透射率,以及传播距离有关),这两个参数的比值可利用标准恒温黑体炉测定. $V(\lambda, T)$ 为放大电路处理后的电压信号,由上位机AD采集卡测量. $\epsilon(\lambda)$ 为光谱发射率,由Kirchhoff定律与能量守恒定律知 $\epsilon(\lambda) = 1 - R(\lambda)$ ,可通过反射率测量得到.双波长比色测温法温度公式中的两组参数分别用下标区分.

## 1.2 膜厚监测原理

在外延生长过程中,用一束激光照射至外延片表面,光线在外延层上下两界面反射,产生Fabry-Perot干涉,在外延层的生长过程中,随着薄膜厚度和表面粗糙度变化反射率发生振荡.MOCVD在线膜厚监测就是通过探测反射率振荡曲线来实现.原理见图2, $n_a$ 、 $n_f$ 、 $n_s$ 分别表示生长气氛、外延层和衬底的折射率.在气氛/外延层界面为平整表面,激光正入射且 $n_a=1$ 的条件下,反射率 $R(\lambda)$ 表达式为

$$R(\lambda) = \frac{r_1^2 + r_2^2 e^{-\alpha d} + 2r_1 r_2 \cos \Delta e^{-\alpha d}}{1 + r_1^2 r_2^2 e^{-\alpha d} + 2r_1 r_2 \cos \Delta e^{-\alpha d}} \quad (3)$$

式中 $r_1 = (n_f - 1)/(n_f + 1)$ 、 $r_2 = (n_s - n_f)/(n_s + n_f)$

分别为空气/外延层、外延层/衬底界面的菲涅尔反射系数, $\Delta = 4\pi d n_f / \lambda$ 为两相邻反射光的相位差, $d$ 为外延层的厚度, $\alpha = 4\pi k / \lambda$ 为外延层的吸收系数( $k$ 为消光系数).设 $d = m\lambda / 2n_f$ 时,反射率为 $R_1$ , $d = (2m+1)\lambda / 4n_f$ 时,反射率为 $R_2$ . $R_1$ 、 $R_2$ 分别为两相邻的极值(极大值与极小值的判断与 $n_f$ 、 $n_s$ 相对大小有关).由此可知,反射率随外延层厚度 $d$ 的增加呈周期性振荡,一个振荡周期对应厚度为 $\lambda / 2n_f$ .通过分析反射率曲线的振荡周期个数即可得到外延层厚度( $d = \text{周期个数} \times \lambda / 2n_f$ ),根据外延生长时间可分析薄膜的生长速率(生长速率 = 薄膜厚度/生长时间)<sup>[12]</sup>.

当外延层上表面具有一定宏观粗糙度,但粗糙度 $\text{RMS} \ll \lambda$ 时,反射率振幅可由散射理论得到,表达式为: $R(t)' = R(t) \exp[-(4\pi\sigma(t)/\lambda)^2]$ .式中 $\sigma(t)$ 为粗糙度随时间变化的函数,此时反射率振幅随粗糙度的增大呈指数衰减;当外延层上表面具有较大厚度涨落时,总反射率可由相差模型得到,此时反射率振幅呈对称衰减.对于所有粗糙外延层表面,反射率振幅衰减均呈现粗糙度变化越大衰减越快,因此,分析反射率曲线振幅的衰减情况可监测外延层表面的粗糙度<sup>[13]</sup>.

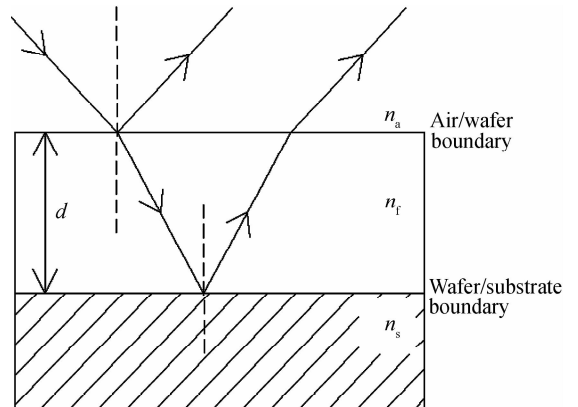


图2 外延片薄膜干涉示意图

Fig. 2 Schematic of epitaxial wafer film interference

## 2 设计与分析

多功能在线监测探头设计图及实物照片见图 3,该探头可同时实现带反射率修正的 940 nm 单色辐射测温、带反射率修正的 1 550 nm 单色辐射测温、带反射率修正的 940 nm 与 1 550 nm 双波长比色测温、940 nm 反射率曲线以及 1 550 nm 反射率曲线的在线测量.即:该探头可同时在线测量出三个带反射率修正的温度和两个波长的反射率曲线.

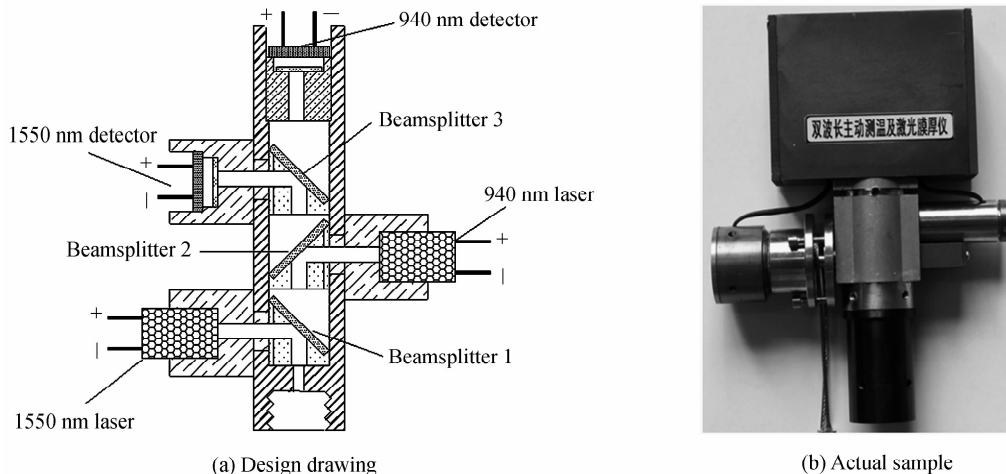


图 3 多功能在线监测探头  
Fig. 3 Multi-functional in situ monitoring probe

多功能在线监测探头盒体呈“树枝状”,内设有圆柱状分光片腔.在下进光孔和左进光孔相交处、中进光孔和右进光孔相交处分别放置 135°、45°蓝宝石分光片(>840 nm,反射率7%,透射率93%).上进光孔和左出光孔相交处放置135°二向色滤光片(截止波长为1 200 nm,反射波段为1 260~1 560 nm,透射波段为624~1 152 nm,反射率>95%,透射率>80%).在左进光孔左侧安装 1 550 nm 激光器(400 mW),右进光孔右侧安装 940 nm 激光器(阈值电流 20 mA,工作电流 40 mA,400 mW).左出光孔左侧有 1 550 nm 窄带滤光片(中心波长为 1 550 nm、半峰宽为 10 nm、OD 值为 6),在 1 550 nm 窄带滤光片左侧有 InGaSn 光感探测器.上出光孔上方有 940 nm 窄带滤光片(中心波长为 940 nm、半峰宽为 10 nm、OD 值为 6),在 940 nm 窄带滤光片上方有日本滨松 S8746-01 硅光伏测量电池(响应峰值波长为 940 nm,对应响应度为 0.52 V/nW,感光面积为 5.8×5.8 mm,内置 1 G 跨阻与前置放大器).

探头选用 MAX3738 芯片作为激光器的驱动芯片,芯片含有 PD 背光监测和 APC 闭环控制,可实现激光器的恒功率控制.利用光学仿真软件 TracePro 对该探头安装于南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD 系统进行光路仿真,设计能容忍高温下外延片<0.45°翘曲.

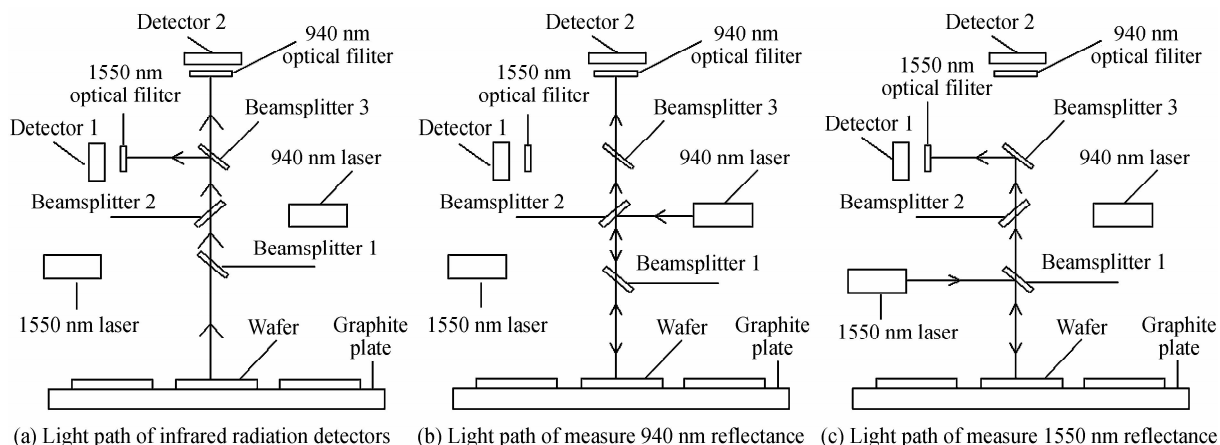


图 4 多功能在线监测探头工作过程光路  
Fig. 4 Optical pathway diagram of monitoring probe

两个激光器和两个光感探测器与对应的 PCB 板相连,实现对其控制、信号放大等功能.放大后的信号转至上位机,由上位机进行采样、AD 转化、数据处理,同时在线显示 940 nm 单色辐射温度值、1 550 nm 单色辐射温度值、940 nm 与 1 550 nm 双波长比色温度值,以及反射率曲线.

探头在工作过程中是红外辐射探测和反射率测量高频交替循环进行,其光路见图 4. 首先由探测器 1、2 探测 MOCVD 反应室内 940 nm、1 550 nm 红外辐射强度,见图 4(a);然后分别打开 940 nm、1 550 nm 激光器,测量对应波长在外延片表面的反射率,见图 4(b)、(c). 940 nm、1 550 nm 反射率可为红外测温提供实时光谱发射率修正数据,另外,可得到对应波长的反射率曲线.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 性能测试分析

将探头在标准黑体炉上进行标定,黑体炉设置温度与对应的 940 nm、1 550 nm 探测器电压比值  $R$  见表 1. 利用  $T=a/[\ln R(T)+b]$  函数,通过 OriginPro 8.0 软件的 Nonlinear Curve Fit 对其拟合,得  $a=2\ 467.215\ 7$ 、 $b=1.2417$ 、 $R^2=0.9987$ . 根据拟合函数计算值和黑体炉设置温度偏差分析该探头精度,由表 1 知,900℃~1 100℃精度在 1℃内,700℃~850℃精度在 4.8℃内. 重复测量黑体炉的温度点,根据两次测量结果的偏差分析该探头的重复性,由表 1 知,在 700℃~1 100℃范围内,重复性误差均在 0.7℃内. 分别调整探头入光孔至黑体炉出光孔距离为 2 mm、6 mm 和 10 mm,根据测量结果与黑体炉设置温度的偏差分析该探头双波长比色测温的距离敏感性,由表 1 知,在 700℃~1 100℃范围内随着距离的增加,测量温度上升,在距离为 2 mm 时,误差在 0.8℃内,可认为 2 mm 内的距离变化对比色测温无影响,即该探头的距离安装容差为 2 mm.

表 1 双波长比色测温性能测试分析

Table 1 The performance test analysis of double-wavelength colorimetric thermometry

Temperature/℃	Ratio	Analysis of accuracy/℃	Analysis of repeatability/℃	Analysis of distance sensitivity/℃		
				2 mm	6 mm	10 mm
1 100	2.024 7	-0.1	-0.2	+0.3	+1.3	+3.2
1 050	2.139 2	+0.2	+0.4	+0.5	+1.5	+3.2
1 000	2.260 2	+0.4	-0.1	+0.5	+1.1	+3.0
950	2.504 8	+0.7	+0.1	+0.3	+1.3	+3.4
900	2.722 7	-0.9	+0.3	-0.1	+1.0	+3.1
850	2.883 9	-1.4	-0.4	+0.7	+1.6	+3.5
800	3.307 2	+2.7	-0.6	+0.5	+1.4	+3.6
750	3.612 0	+3.9	+0.7	+0.6	+1.5	+3.7
700	4.178 2	+4.8	-0.6	+0.8	+1.5	+3.9

#### 3.2 在线监测结果与讨论

将多功能探头安装于南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD,对 2 英寸 Si(111)衬底上生长 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片全过程进行在线监测.测温结果见图 5. 从图 5 可见,940 nm 单色辐射测温、1 550 nm 单色辐射测温以及 940 nm/1 550 nm 双波长比色测温均能稳定工作,且三种测温结果重合度较高.

为了精确得到该探头测温的最低量程,对 0~1 500 s 段测温结果进行局部放大,见图 5 中左插图,可得最低测温量程为 435℃. 蓝光 LED 外延片生长过程中,InGaN 阱层的生长温度为最低温度点,约为 720℃. 因此,该探头在量程上满足蓝光 LED 外延片测温要求. 为了对结果进行测量噪声分析,对 n-GaN 生长过程中  $14 \times 10^3 \sim 20 \times 10^3$  s 段内的测温结果进行局部放大,使纵轴温度坐标精确至 1℃,见图 5 中右插图所示.

由图 5 可见,三种测温结果分裂为两条线,其差值为 2.3℃,波动振幅分别为 0.5℃和 1.5℃,上线与时间轴几乎平行,下线随着时间略有下降,在该时间段内下降约 1℃. 通过上位机程序界面控制显示不同测温结果知,上线为 940 nm/1 550 nm 双波长比色测温结果,下线为 940 nm 单色辐射测温与 1 550 nm 单色辐射测温结果的叠加. 940 nm、1 550 nm 单色辐射测温低于 940 nm/1 550 nm 双波长比色测温结果,且随着时间略有下降,均为有效面积  $S$  减小所致. 可见,该探头应用于南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD 生长 Si 衬底 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片过程中,其 940 nm/1 550 nm 双波长比色测

温最低量程为 435℃, 测量噪声为 0.5℃, 不受探测孔的有效面积  $S$  变化的影响, 具有较高稳定性, 940 nm、1 550 nm 单色辐射测温测量噪声为 1.5℃, 可作为备份与参考, 进一步提高测温质量。

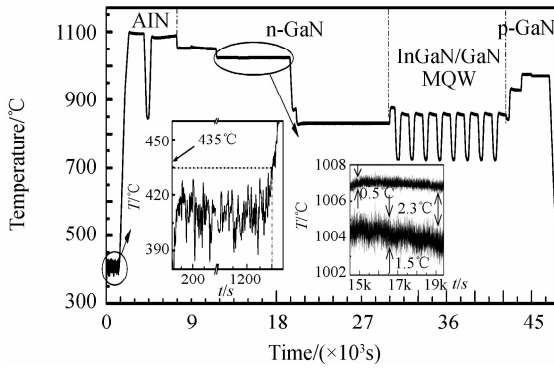


图 5 温度在线监测结果(插图为局部放大图)

Fig. 5 In situ infrared thermometry result (The inset shows the partial enlargement)

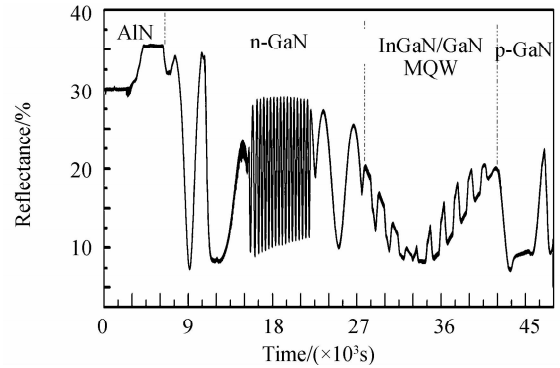


图 6 940 nm 反射率在线监测结果

Fig. 6 In situ monitoring result of 940 nm reflectance

该多功能探头不仅可同时采用三种方法在线测温, 而且能够同时在线给出 940 nm 及 1 550 nm 反射率。因此, 该探头能实现对应波长反射率曲线监测。另外, 由其反射率可得对应光谱发射率, 为红外测温提供相应实时数据。因色散、热光效应、等离子色散效应的存在, 折射率会随波长、温度、载流子浓度的变化而改变。欲精确测量膜厚难度较大, 此处仅考虑色散。本征 GaN 薄膜对于 940 nm、1 550 nm 红外波, 其折射率分别为 2.337、2.301<sup>[14-15]</sup>。在 GaN 外延生长过程中在线测量的 940 nm、1 550 nm 干涉曲线一个振荡周期对应的膜厚分别为 201.11 nm、336.81 nm。可见 940 nm 反射率曲线的膜厚监测精度更高。因此, 本文仅给出南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD 生长 Si 衬底 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片过程中的 940 nm 干涉曲线, 结果见图 6。

由图 6 计算 n-GaN 层厚度为 4.8 μm, TEM 测试分析得样品 n 型层厚度为 4.98 μm, 相对误差 3.6%。图 6 中在生长 n-GaN 的 15.5 × 10<sup>3</sup> ~ 22.5 × 10<sup>3</sup> s 内振荡频率较高, 表明生长速率较快, 计算得该时间段平均生长速率为 0.517 nm/s。该时段内反射率振幅变化不大, 表明外延片可近似为无吸收平整表面, 即  $\sigma(t) \approx 0$ , 其振幅的微弱减小是由外延表面的厚度涨落引起。可见该探头能够精确在线监测膜厚、生长速率, 分析外延层表面粗糙度。

## 4 结论

本文给出的应用于 MOCVD 反应室的多功能在线监测探头设计方案, 能够同时实现带反射率修正的 940 nm 单色辐射测温、带反射率修正的 1 550 nm 单色辐射测温、带反射率修正的 940 nm 与 1 550 nm 双波长比色测温、940 nm 反射率曲线以及 1 550 nm 反射率曲线的在线测量。将该探头应用于南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD 系统, 对 2 英寸 Si(111) 衬底上生长 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片全过程进行在线监测。结果表明:

- 1) 该探头的三种红外测温最低量程均为 435℃, 在量程上均满足 MOCVD 外延生长测温要求;
- 2) 该探头的 940 nm 与 1 550 nm 双波长比色测温 900℃ ~ 1 110℃ 范围内精度高于 1℃, 700℃ ~ 1 100℃ 范围内重复性误差在 0.7℃ 内, 距离容差性为 2 mm, 在 n-GaN 层生长的局部过程, 测量噪声为 0.5℃, 并能有效避免外延生长过程生成物在探测孔上沉积以及热变形对测温的影响;
- 3) 940 nm 以及 1 550 nm 单色辐射测温结果可作为备份与参考, 进一步提高 MOCVD 在线测温设备的可靠性;
- 4) 由 940 nm 反射率曲线得, n-GaN 层的膜厚监测相对误差为 3.6%, 同时能对外延片表面粗糙度进行一定分析, 到达监测目的及要求。

综上所述, 该多功能在线监测探头设计方案具有一定可行性, 可为我国 MOCVD 系统多功能在线监测设备开发提供参考。

## 参考文献

- [1] LU Da-cheng, DUAN Shu-kun. Metal organic vapor phase epitaxy base and application[M]. Beijing: Science Press, 2009.  
陆大成, 段树坤. 金属有机化合物气相外延基础及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] YANG Chao-pu, FANG Wen-qing. Influence of atmosphere and pressures on infrared temperature measurement of MOCVD reactor[J]. *Journal of Shangluo University*, 2015, **29**(4):43-46.  
杨超普, 方文卿. 气氛及压强对 MOCVD 红外测温的影响[J]. 商洛学院学报, 2015, **29**(4):43-46.
- [3] KROST A, DADGAR A. GaN-based optoelectronics on silicon substrates[J]. *Materials science and engineering B*, 2002, **93**(1-3):77-84.
- [4] BRUNNER F, KNAUER A, SCHENK T, *et al.* Quantitative analysis of in situ wafer bowing measurements for III-nitride growth on sapphire [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, **310**(10):2432-2438.
- [5] YANG Chao-pu. Research on MOCVD in situ photoluminescence and on-line infrared thermometry[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.  
杨超普. MOCVD 在线光致发光与红外测温研究[D]. 南昌大学, 2014.
- [6] WANG Chao, ZHANG Ze-zhan, CHEN Lei, *et al.* In-situ monitoring technology for growth of III nitrides by metal organic chemical vapor deposition[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, **45**(4):650-658.  
王超, 张泽展, 陈磊, 等. 氮化物外延生长在线监测技术[J]. 电子科技大学学报, 2016, **45**(4):650-658.
- [7] LI Wei. Design and implementation of realtime film thickness monitoring system based on MOCVD[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.  
李伟. MOCVD 的在线膜厚监测系统的设计与实现[D]. 武汉理工大学, 2012.
- [8] SHI Dong-ping, WU Chao, LI Zi-jun, *et al.* Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incidence temperature compensation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(8):2321-2326.  
石东平, 吴超, 李孜军, 等. 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(8):2321-2326.
- [9] SHI Dong-ping, WU Chao, LI Zi-jun, *et al.* Optimized tri-wavelength infrared temperature measurement introducing dimensionless model and bending coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(2):1-6.  
石东平, 吴超, 李孜军, 等. 引入无量纲模型及弯曲系数的三波长红外测温优化研究[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(2):1-6.
- [10] SHI De-heng, SUN Jin-feng, ZHU Zun-lue, *et al.* Optimization of a passive single-wavelength real-time temperature measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):61-66.  
施德恒, 孙金锋, 朱遵略, 等. 一种被动式单波长实时测温系统的优化设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(1):61-66.
- [11] TAO Wei, WU Guo-jun, GUAN Yun-tian. Chromatic thermometry used in ceramic sintering process[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **5**(33):940-943.  
陶伟, 吴国俊, 关云天. 比色测温在陶瓷生产中的应用研究[J]. 应用光学, 2012, **5**(33):940-943.
- [12] LI Xiao-feng, LU Qiang, LI Li, *et al.* Thickness Measurement of Multi-alkali Photocathode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11):1377-1382.  
李晓峰, 陆强, 李莉, 等. 超二代微光像增强器多碱光电阴极膜厚测量研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(11):1377-1382.
- [13] LI Cui-yun, ZHU Hua. Curve analysis of real-time interference in GaN film growth by MOCVD[J]. *Jouranal of Wuhan University of Technology*, 2013, **27**(11):18-20.  
李翠云, 朱华. MOCVD 生长 GaN 薄膜的实时干涉曲线分析[J]. 武汉理工大学学报, 2013, **27**(11):18-20.
- [14] Hanbook of Optical Constants of Solids[M], EDWARD D. PALIK. Academic Press, Boston, 1985.
- [15] YU G, WANG G, ISHIKAWA H, *et al.* Optical properties of wurzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge(0.78-4.77eV) by spectroscopic ellipsometry and the optical transmission method[J]. *Applied Letter*, 2007, **70**(24):3209-3211.

**Foundation item:** National High Technology Research and Development Program of China (No. 2011AA03A101), Research Fund of Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources (Shangluo University) (No. 2014SKY-WK012), Specialized Scientific Research Plan Projects of Shaanxi Education Department (No. 16JK1241), Shangluo Science and Technology Plan Projects (No. SK2015-29).