

MOCVD 制备不同衬底 GaN 外延的在线 红外测温比较研究

杨超普^{1,2}, 宋亚峰³, 方文卿^{4*}, 刘明宝^{1,2}, 李 春^{1,2}, 张美丽^{1,2}

¹商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000;

²陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;

³商洛学院电子信息与电气工程学院, 陕西 商洛 726000;

⁴南昌大学国家硅基 LED 工程技术研究中心, 江西 南昌 330047

摘要 根据红外测温原理、薄膜等厚干涉模型及相关光学参数,在 Al₂O₃、SiC、Si 三种衬底上用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术制备 10 μm GaN 外延层的过程中,对 940 nm 单色测温、1550 nm 单色测温、940 nm/1550 nm 比色测温的发射率引起表观温度误差、真实温度与表观温度偏差进行理论比较。利用 Si(111)衬底上制备 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)蓝光发光二极管(LED)外延片过程的 940 nm 单色测温及 940 nm/1550 nm 比色测温结果,验证该建模及计算的正确性。研究结果表明:在 500~1300 °C,相同测温法在不同衬底间表观温度误差系数区别不大。相同衬底下,误差系数由小到大依次为:比色测温、940 nm 单色测温、1550 nm 单色测温。相同测温法在不同衬底间真实温度与表观温度偏差较大。相同衬底下,偏差结果由小到大依次为:比色测温、1550 nm 单色测温、940 nm 单色测温。该计算方法与结论可为红外测温设备的研发、不同衬底 GaN 基外延测温方法的选择提供借鉴与参考。

关键词 测量; 红外测温; 金属有机物化学气相沉积; GaN; 外延; 比较研究

中图分类号 O439;TB942 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111201

Comparative Study on *In-Situ* Infrared Thermometry of GaN Epitaxy on Different Substrates Prepared by MOCVD

Yang Chaopu^{1,2}, Song Yafeng³, Fang Wenqing⁴, Liu Mingbao^{1,2},
Li Chun^{1,2}, Zhang Meili^{1,2}

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, Shaanxi 726000, China;

³ College of Electronic Information and Electrical Engineering, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

⁴ National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China

Abstract The apparent temperature errors caused by emissivity indexes of 940 nm monochromatic thermometry, 1550 nm monochromatic thermometry and 940 nm/1550 nm colorimetric thermometry and deviation between the actual temperatures and apparent temperatures are theoretically compared based on infrared thermometry principle,

收稿日期: 2017-05-09; **收到修改稿日期:** 2017-05-26

基金项目: 国家 863 计划(2011AA03A101)、陕西省尾矿资源综合利用重点实验室开放基金(2014SKY-WK012)、陕西省教育厅专项科研计划(16JK1241)、商洛市科技计划(SK2015-29)、商洛学院科研基金(13SKY-FWDF005)

作者简介: 杨超普(1987—),男,硕士,讲师,主要从事 MOCVD 在线监测设备方面的研究。

E-mail: 1754510624@qq.com

* 通信联系人。E-mail: fwq@ncu.edu.cn

film equal thickness interference model and relative optical properties. These are conducted during preparation of 10 μm GaN epitaxy wafer on Al_2O_3 , SiC and Si by using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique. Moreover, the results of 940 nm monochromatic thermometry and 940 nm/1550 nm colorimetric thermometry of the blue light emitting diode (LED) epitaxial wafer with InGaN/GaN multiple quantum wells (MQW) structure growing on silicon (111) substrate verify the correctness of the modeling and the computation. The study result shows that the distinction of apparent temperature error coefficients with the same thermometry on different substrates is small in the range from 500 $^\circ\text{C}$ to 1300 $^\circ\text{C}$. The error coefficient with the same substrates from small to large are colorimetric thermometry, 940 nm monochromatic thermometry and 1550 nm monochromatic thermometry. Deviation between the actual temperatures and apparent temperatures on the different substrates with the same thermometry is large. The deviation with the same substrates from small to large are colorimetric thermometry, 1550 nm monochromatic thermometry and 940 nm monochromatic thermometry. This computational method and conclusion can be used for reference to develop the infrared thermometry device and choose the thermometry of the GaN epitaxy on different substrates.

Key words measurement; infrared thermometry; metal-organic chemical vapor deposition; GaN; epitaxy; comparative study

OCIS codes 120.6780; 310.6845; 160.6000

1 引言

金属有机物化学气相沉积(MOCVD)是生产发光二极管(LED)外延片的核心设备^[1]。MOCVD外延生长过程中对反应室内温度的精确测量及控制至关重要。例如,在Si(111)衬底上生长GaN基多量子阱(MQW)结构LED外延片的掺In过程中,温度每偏差1 $^\circ\text{C}$,将最终引起器件的中心波长漂移约1.2 nm^[2]。在线红外测温可在MOCVD外延生长过程中,对外延片温度进行实时的无损检测,其方法主要为单色辐射测温以及双波长比色测温^[3]。目前商用MOCVD在线红外测温设备市场多被外国公司垄断,主要有国际著名MOCVD厂商德国AIXTRON公司、美国Veeco公司,以及与AIXTRON深度合作 LayTec公司^[4],其相关产品多对LED外延生长技术及MOCVD设备具有一定的针对性。当前GaN基蓝光LED外延主要有三条技术路线,分别为以日本Nichia为代表的蓝宝石(Al_2O_3)衬底技术、以美国Cree为代表的SiC衬底技术,以及以晶能光电为代表的南昌大学国家硅基LED工程技术中心的Si衬底技术^[5-6]。近年来,随着我国Si衬底技术的日益成熟和MOCVD国产化进程的加快,有必要对不同衬底LED外延生长的在线红外测温方法进行比较研究,为国产MOCVD制备Si衬底LED外延的在线红外测温方法选择提供参考。

当前国内外应用较为广泛的产品多采用较为简单的单色测温加反射率修正方式,为了克服探测窗口易受沉积物污染以及热变形的影响,近年来出现了双波长比色测温。对多款Epi系列、Argus、RealTemp_R200,以及多家国内公司研发的MOCVD在线红外测温设备(如北京智朗芯光科技有限公司研发的Viper系列、南昌黄绿照明有限公司等研发的系列)分析后,确定对940 nm单色辐射测温、1550 nm单色辐射测温以及940 nm/1550 nm双波长比色测温等三种MOCVD在线红外测温法进行理论比较研究。当前高性能LED外延片多为超晶格、MQW结构,均为几十层的复杂结构。为了建模简单、便于计算,本文仅研究在 Al_2O_3 、SiC、Si等三种衬底上外延生长10 μm GaN层的在线红外测温。根据红外测温原理、薄膜等厚干涉及相关光学参数,对MOCVD制备不同衬底GaN外延三种在线红外测温法的发射率引起表观温度误差系数、真实温度与表观温度偏差进行理论计算,并且进行比较分析与研究。将自主开发的MOCVD多功能在线红外测温仪安装于南昌黄绿照明有限公司单层双室MOCVD系统中,采用940 nm单色辐射测温与940 nm/1550 nm双波长比色测温对Si(111)衬底上生长InGaN/GaN MQW结构蓝光LED外延片进行在线监测,通过分析实际测温结果对建模及理论计算的正确性进行佐证。

2 MOCVD 红外测温的方法及其比较

应用于MOCVD的在线红外测温设备的核心部件为红外辐射探测仪,安装在MOCVD反应室上顶板石英光学视窗上方,透过光学视窗与喷淋孔探测高温下外延片的红外辐射,根据特定波段辐射强度进行测温,如图1所示。根据探测波长数目的不同,MOCVD的在线红外测温法主要分为单色辐射测温与双波长比色测温,已有大量文献对其原理进行分析报道^[7-10],其主要原理为普朗克公式与基尔霍夫定律。

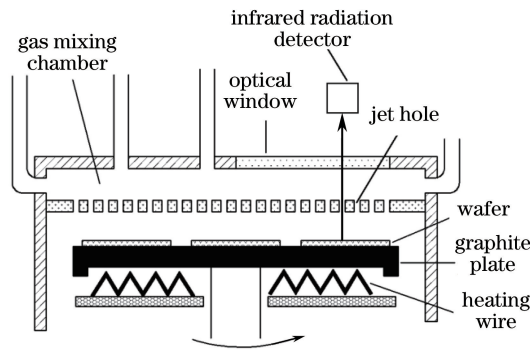


图1 MOCVD在线红外测温示意图

Fig. 1 Schematic of MOCVD in-situ infrared thermometry

在红外测温中,被测物多为灰体,欲测得真实温度必须对其进行发射率修正。直接将被测物简化为黑体,所得温度称为表观温度。外延生长过程中外延片表面粗糙度、材料组分、掺杂浓度、外延片结构,以及反应室气氛、压强、流场等的实时变化,均会影响发射率的测量^[11-12]。发射率的精确测量是红外测温的难点,直接决定 MOCVD 的在线红外测温精度。因此,有必要从测温原理出发,建立物理模型,通过理论计算,比较研究不同红外测温方法发射率对测温结果的影响。表 1 给出了单色辐射测温与双波长比色测温原理、发射率引起的表观温度误差系数、真实温度与表观温度偏差公式。表中 ϵ_λ 、 T 、 C_2 分别代表 λ 波长对应的被测物发射率、真实温度、第二辐射常数; M_b 为单色辐出度; T_{lum} 、 T_{col} 分别代表单色辐射测温与双波长比色测温对应的表观温度,即亮度温度与比色温度。

表 1 单色辐射测温法与双波长比色测温法的比较

Table 1 Comparison of monochromatic radiation thermometry and double wavelength colorimetric thermometry

Thermometry method	Monochromatic radiation thermometry	Double wavelength colorimetric thermometry
Theory of temperature measurement	$\epsilon_\lambda M_b(\lambda, T) = M_b(\lambda, T_{lum})$	$\frac{\epsilon_{\lambda_1} M_b(\lambda_1, T)}{\epsilon_{\lambda_2} M_b(\lambda_2, T)} = \frac{M_b(\lambda_1, T_{col})}{M_b(\lambda_2, T_{col})}$
Error coefficient of apparent temperatures caused by emissivity	$\left(\frac{dT_{lum}}{T_{lum}}\right) / \left(\frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda}\right) = \left(\frac{C_2}{\lambda T} - \ln \epsilon_\lambda\right)^{-1}$	$\left(\frac{dT_{col}}{T_{col}}\right) / \left[\frac{d(\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2})}{\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2}}\right] = \frac{-T}{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1) + T \ln(\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2})}$
Deviation between actual temperatures and apparent temperatures	$\frac{\Delta T_{lum}}{T} = \left \frac{T - T_{lum}}{T} \right = \left \frac{\lambda T \ln \epsilon_\lambda}{\lambda T \ln \epsilon_\lambda - C_2} \right $	$\frac{\Delta T_{col}}{T} = \left \frac{T - T_{col}}{T} \right = \left \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{T \ln(\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2})} + 1 \right ^{-1}$

3 模型及计算方法

由表 1 可知,若比较 Al_2O_3 、SiC、Si 等三种衬底上制备 GaN 外延片过程中,940 nm 单色辐射测温、1550 nm 单色辐射测温以及 940 nm/1550 nm 双波长比色测温对应的发射率引起的表观温度误差系数、真实温度与表观温度偏差,需知三种 GaN 外延片 940 nm、1550 nm 对应的发射率。建立薄膜等厚干涉模型,近似取 MOCVD 反应室内气氛折射率为 1,在正入射下,根据法布里-珀罗干涉可得外延片反射率为

$$R(\lambda) = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(4\pi d n_f / \lambda) \exp[-(4\pi k d / \lambda)]}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(4\pi d n_f / \lambda) \exp[-(4\pi k d / \lambda)]}, \quad (1)$$

式中 r_1 、 r_2 分别为 MOCVD 反应室内气氛/外延层界面、外延层/衬底界面的菲涅耳反射系数, $r_1 = (n_f - 1)/(n_f + 1)$ 、 $r_2 = (n_s - n_f)/(n_s + n_f)$, n_f 、 n_s 分别为外延层(即 GaN 层)、衬底(分别为 Al_2O_3 、SiC、Si)的折射率; d 为 GaN 外延层厚度; k 为消光系数。 Al_2O_3 、SiC、Si 三种衬底及外延层 GaN 在 940 nm 及 1550 nm 的折射率 n 与消光系数 k 如表 2 所示^[13-14]。根据(1)式以及基尔霍夫定律可以得到外延片发射率 $\epsilon_\lambda = 1 - R(\lambda)$ 。

表 2 4 种材料在 940 nm、1550 nm 下的折射率与消光系数

Table 2 Refractive index and extinction coefficient of four materials at 940 nm and 1550 nm

Material	n_{940}	n_{1550}	k_{940}	k_{1550}
Si	3.600	3.476	0.00187	0
SiC	2.586	2.571	0	0
Al ₂ O ₃	1.758	1.751	0	0
GaN	2.337	2.301	0	0

分别计算在 Al₂O₃、SiC、Si 等三种衬底上外延生长 10 μm GaN 层,940 nm 与 1550 nm 对应的发射率,结果如表 3 所示。

表 3 三种衬底 GaN 外延片的发射率

Table 3 Emissivity of GaN epitaxial wafer on three different substrates

Substrate	ϵ_{940}	ϵ_{1550}
Si	0.8234	0.8617
SiC	0.8436	0.8553
Al ₂ O ₃	0.8049	0.7956

由表 3 及表 1,分别计算在 Al₂O₃、SiC、Si 三种不同衬底外延生长 10 μm GaN 层,在 500~1300 °C 范围内,940 nm 单色辐射测温、1550 nm 单色辐射测温以及 940 nm/1550 nm 双波长比色测温的发射率引起的表观温度误差系数、真实温度与表观温度偏差。

4 计算结果与分析

4.1 940 nm 单色辐射测温比较

采用 940 nm 单色辐射测温法,利用表 1 中的公式分别对 Al₂O₃、SiC、Si 三种衬底外延生长 10 μm GaN 层进行计算分析,在 500~1300 °C 范围内发射率引起的表观温度误差系数如图 2 所示。由图 2 可知:随着温度的升高,三种衬底外延片表观温度的误差系数均增大,但不同衬底的区别不明显。为了进一步研究,对 1200~1250 °C 范围进行局部放大,如图 2 插图所示。由插图可知,误差系数由大到小依次为 SiC、Si、Al₂O₃,三条线近似相互平行且相邻间隔几乎相等,约为 0.00025。结果表明:发射率修正误差对三种不同衬底外延片表观温度测量的影响均随温度的升高而增大,对 SiC 衬底影响最大,对 Al₂O₃ 影响最小。

对三种衬底 GaN 外延片真实温度与表观温度偏差进行计算,结果如图 3 所示。由图 3 可知:在 500~1300 °C 范围内,随着温度升高,三种外延片偏差均增大,增大速率由小到大为依次 SiC、Si、Al₂O₃。偏差由小到大依次也为 SiC、Si、Al₂O₃。以 SiC 衬底制备 InGaN/GaN MQW LED 外延片的 750 °C 掺 In 为例,

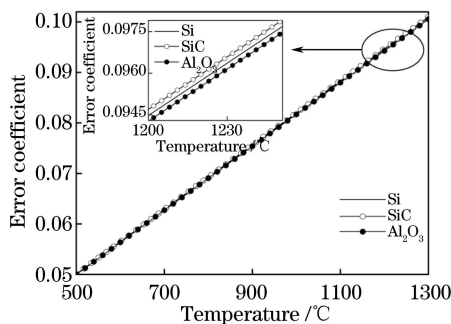


图 2 三种衬底 GaN 外延片 940 nm 单色辐射测温发射率引起的表观温度误差系数,内插图为局部放大图

Fig. 2 Error coefficients of apparent temperatures due to emissivity of GaN epitaxial wafer on three different substrates by 940 nm monochromatic radiation thermometry, inset shows the partial enlargement

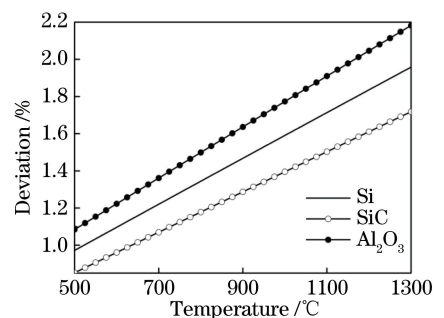


图 3 三种衬底 GaN 外延片 940 nm 单色辐射测温所得真实温度与表观温度偏差

Fig. 3 Deviations between actual temperatures and apparent temperatures of GaN epitaxial wafer on three different substrates by 940 nm monochromatic radiation thermometry

由图 3 得到真实温度与表观温度相对偏差为 1.1241%，计算得到绝对误差为 8.43℃。由此可见，即使偏差最小的 SiC 衬底，表观温度也远不能满足 MOCVD 在线红外测温的精度要求，必须进行发射率修正。

4.2 1550 nm 单色辐射测温比较

采用 1550 nm 单色辐射测温法，利用表 1 中的公式对三种衬底 GaN 外延进行测温计算，得到发射率引起的表观温度误差系数结果如图 4 所示。由图 4 可知：随着温度的升高，发射率对三种外延片表观温度的影响与采用 940 nm 单色辐射测温法的结果相同。对 1200~1250℃ 范围进行局部放大，如图 4 插图所示。由插图可知，误差系数由大到小依次为 Si、SiC、Al₂O₃，Si 与 SiC 几乎重合，SiC 与 Al₂O₃ 相差约为 0.002。与图 2 相比，1550 nm 单色辐射测温三种外延片的发射率引起表观温度误差系数均大于 940 nm 单色辐射测温，且随温度的升高增速加快。

对 1550 nm 单色辐射测温三种外延片真实温度与表观温度偏差进行计算，结果如图 5 所示。由图 5 可知：在 500~1300℃ 范围内，随着温度升高，三种外延片的偏差均增大，Al₂O₃ 增大速率最大，SiC 与 Si 几乎平行。偏差由小到大依次为 Si、SiC、Al₂O₃，且均大于 940 nm 单色辐射测温法所得结果。

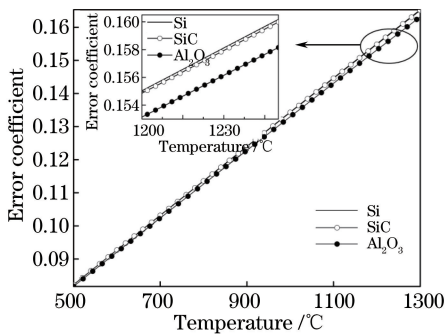


图 4 三种衬底 GaN 外延片 1550 nm 单色辐射测温发射率引起的表观温度误差系数，内插图为局部放大图

Fig. 4 Error coefficients of apparent temperatures due to emissivity of GaN epitaxial wafer on three different substrates by 1550 nm monochromatic radiation thermometry, inset shows the partial enlargement

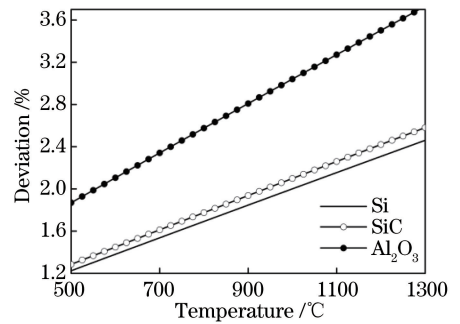


图 5 三种衬底 GaN 外延片 1550 nm 单色辐射测温所得真实温度与表观温度偏差

Fig. 5 Deviations between actual temperatures and apparent temperatures of GaN epitaxial wafer on three different substrates by 1550 nm monochromatic radiation thermometry

以 Si 衬底制备 InGaN/GaN MQW LED 外延片的 780℃ 掺 In 为例，由图 5 可得相对偏差为 1.6607%，对应绝对误差为 12.95℃。而 940 nm 单色辐射测温的绝对误差为 10.29℃。由此可见，对于 Si 衬底外延 940 nm 单色辐射测温法优于 1550 nm 单色辐射测温法。

4.3 940 nm/1550 nm 双波长比色测温比较

采用 940 nm/1550 nm 双波长比色测温法，利用表 1 公式对三种衬底 GaN 外延进行测温计算，得到发射率引起表观温度误差系数如图 6 所示。由图 6 可知三种衬底的误差系数差别不大，均随着温度的升高而增大。对 1295~1300℃ 范围进行局部放大，如图 6 插图所示。由插图可知，误差系数由大到小依次为 Al₂O₃、SiC、Si，与图 2、图 4 相比，其误差系数远小于 940 nm 单色辐射测温及 1550 nm 单色辐射测温。

关于 940 nm/1550 nm 双波长比色测温，对三种外延片真实温度与表观温度偏差进行计算，结果如图 7 所示。由图 7 可知：在 500~1300℃ 范围内，随着温度升高，三种外延片偏差均增大，增大速率由小到大依次为 Al₂O₃、SiC、Si。偏差由小到大依次也为 Al₂O₃、SiC、Si。与图 5、图 3 比较，可得其偏差均小于 940 nm、1550 nm 单色辐射测温。以 Al₂O₃ 衬底制备 InGaN/GaN MQW LED 外延片的 720℃ 掺 In 为例，由图 7 可得相对偏差为 0.19197%，计算绝对误差为 1.38℃。

4.4 Si 衬底生长 InGaN/GaN MQW LED 外延的测温比较

由以上分析可知，从发射率对测温结果影响进行考虑，Si 衬底 GaN 外延片 940 nm 单色辐射测温优于 1550 nm，双波长比色测温优于单色辐射测温。采用南昌黄绿照明有限公司自主研发的单层双室 MOCVD 系统，在 Si(111)衬底上生长 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片。利用自主研发的带发射率修正的 940 nm 单色辐射测温与带发射率修正的 940 nm/1550 nm 双波长比色测温对外延生长过程进行在线测温，结果如图 8 所示。

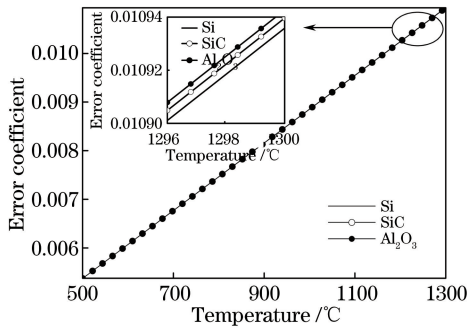


图 6 三种衬底 GaN 外延片比色测温发射率引起的表观温度误差系数,内插图为局部放大图

Fig. 6 Error coefficients of apparent temperatures due to emissivity of GaN epitaxial wafer on three different substrates by colorimetric thermometry, inset shows the partial enlargement

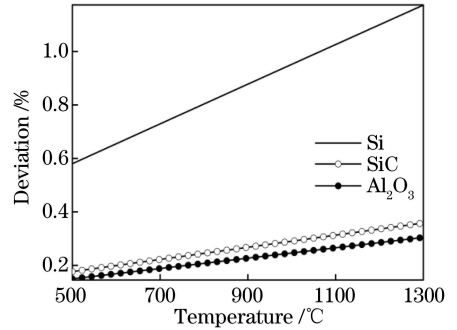


图 7 三种衬底 GaN 外延片比色测温所得真实温度与表观温度偏差

Fig. 7 Deviations between actual temperatures and apparent temperatures of GaN epitaxial wafer on three different substrates by colorimetric thermometry

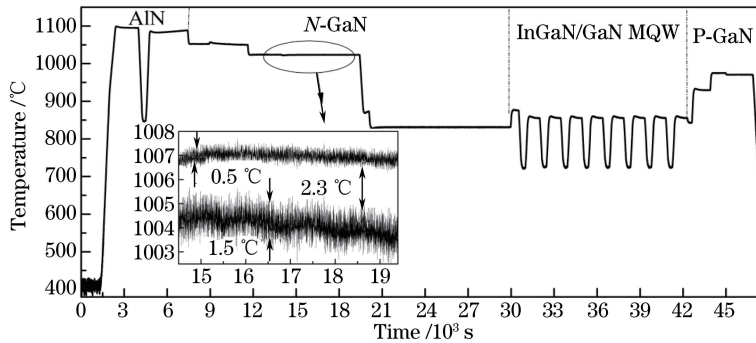


图 8 Si 衬底 LED 外延生长的 940 nm 单色辐射与 940 nm/1550 nm 比色测温结果,内插图为局部放大图

Fig. 8 Results of 940 nm monochromatic radiation thermometry and 940 nm/1550 nm colorimetric thermometry during LED epitaxial growth on silicon substrate, inset shows the partial enlargement

对生长 n -GaN 层过程中 $(1.45 \sim 1.95) \times 10^4$ s 或 $(14.5 \sim 19.5) \times 10^3$ s 时段内测温结果进行放大,如图 8 的内插图所示。由图可得:测温结果分裂为两条线,上下测温结果波动分别约为 0.5、1.5 °C。通过上位机控制界面,分别单独显示两个测温结果,可知上方为双波长比色测温,下方为 940 nm 单色辐射测温。由于 940 nm 单色辐射测温受发射率影响远大于双波长比色测温,因此,双波长比色测温结果几乎为平行于时间轴的直线且较为稳定,而 940 nm 单色辐射测温结果平均值起伏较大。二者温差约为 2.3 °C,该结果与 940 nm 单色辐射测温的真实温度和表观温度偏差大于 940 nm/1550 nm 双波长比色测温有关。

以上结果在一定程度上佐证了本文建模计算分析的正确性。可见该比较研究可为利用 MOCVD 在 Al_2O_3 、SiC、Si 三种衬底上制备 GaN 基 LED 外延片,940 nm 单色辐射测温、1550 nm 单色辐射测温以及 940 nm/1550 nm 双波长比色测温三种在线红外测温法的选择提供一定参考。同时,也可为 MOCVD 在线红外测温研发的理论分析方法提供借鉴。

5 结 论

采用薄膜等厚干涉模型,根据红外辐射测温原理及相关光学参数,对 MOCVD 在 Al_2O_3 、SiC、Si 三种衬底上制备 10 μm GaN 外延层,500 ~ 1300 °C 范围内,940 nm 单色辐射测温、1550 nm 单色辐射测温及 940 nm/1550 nm 双波长比色测温,发射率引起表观温度误差系数、真实温度与表观温度偏差进行理论计算和比较分析。并利用自主开发的 MOCVD 在线红外测温设备,采用 940 nm 单色辐射测温与 940 nm/1550 nm 双波长比色测温,对 Si(111)衬底上生长 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片进行在线红外测温。结果表明:

1) 实际测量结果在一定程度上证明了该模型与计算的正确性,其分析结果具有参考价值。

2) Al_2O_3 、 SiC 、 Si 三种不同衬底 GaN 外延的三种在线红外测温,在 500~1300 °C 范围内,发射率引起表观温度误差系数均随温度升高而增大。相同测温法在不同衬底之间区别不大。相同衬底下,三种测温法误差系数由小到大依次为:940 nm/1550 nm 双波长比色测温、940 nm 单色辐射测温、1550 nm 单色辐射测温。

3) 真实温度与表观温度偏差的理论计算结果表明,不同衬底 GaN 外延的三种在线红外测温,在 500~1300 °C 范围内,真实温度与表观温度偏差均随温度升高而增大。相同测温法在不同衬底之间相差较大。相同衬底下,三种测温法偏差由小到大依次为:940 nm/1550 nm 双波长比色测温、1550 nm 单色辐射测温、940 nm 单色辐射测温。

以上结论可为 MOCVD 制备三种不同衬底 GaN 基 LED 外延的在线红外测温法的选择提供参考,其建模与计算方法可为 MOCVD 在线红外测温设备研发的理论分析提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] Lu Dacheng, Duan Shukun. 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, 2009.
- [2] 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.
- [3] Yang Chaopu, Fang Wenqing, Liu Mingbao, *et al.* Comparative study on in situ infrared thermometry methods of MOCVD[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 297-302.
杨超普, 方文卿, 刘明宝, 等. MOCVD 原位红外测温方法的比较研究[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 297-302.
- [4] Wang Chao, Zhang Zezhan, 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.
- [5] Jiang Fengyi, Liu Junlin, Wang Li, *et al.* High optical efficiency GaN based blue LED on silicon substrate[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2015, 45(6): 067302.
江风益, 刘军林, 王立, 等. 硅衬底高光效 GaN 基蓝色发光二极管[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(6): 067302.
- [6] Wang Xiaozeng. Range analysis of thermal stress and displacement of GaN films on Al_2O_3 substrate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041602.
王小增. Al_2O_3 衬底上 GaN 薄膜热应力和变形极差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041602.
- [7] Wang Wenge. Survey of radiation thermometry technology[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 25(4): 20-24.
王文革. 辐射测温技术综述[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(4): 20-24.
- [8] Lu Mengxi, Cao Jian. Application of infrared measurement technology in MOCVD[J]. Semiconductor Technology, 2007, 32(8): 689-691.
路孟喜, 曹健. 红外测量技术在 MOCVD 中的应用[J]. 半导体技术, 2007, 32(8): 689-691.
- [9] Yang Zheng, Yang Li, Zhang Shicheng, *et al.* Infrared temperature measurement technology on lambertian based on the dual temperature and dual-band method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11): 2132-2135.
杨桢, 杨立, 张士成, 等. 基于双温双波段法的郎伯体红外测温技术[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2132-2135.
- [10] Ma Cuihong, Liu Junmi, Yang Youliang. Infrared thermal image of molten steel temperature measurement based on wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101001.
马翠红, 刘俊秘, 杨友良. 基于小波变换的红外热像钢水测温研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101001.
- [11] Li Yang, Xia Xinlin, Fan Chao, *et al.* Error analysis of infrared temperature measurement for 3D non-isothermal porous layer[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0504001.
李洋, 夏新林, 范超, 等. 三维非等温多孔层的红外测温误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0504001.
- [12] Yang Chaopu, Fang Wenqing. 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.

[13] Palik E D. Handbook of optical constants of solids[M]. Boston: Academic Press, 1985.

[14] Yu G, Wang G, Ishikawa H, *et al.* Optical properties of wurzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge (0.78-4.77 eV) by spectroscopic ellipsometry and the optical transmission method[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(24): 3209-3211.