

# 蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 多层结构表面热应力仿真分析

陈靖<sup>1</sup>, 程宏昌<sup>2</sup>, 吴玲玲<sup>1</sup>, 冯刘<sup>2</sup>, 苗壮<sup>2</sup>

(1.西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了研究蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 光阴极组件外延片热应力分布及影响因素, 以直径  $d$  为  $\phi 40$  mm 的 GaN 外延片为研究对象, 利用有限元分析法对其表面热应力分布进行了理论计算和仿真, 验证了仿真模型的合理性。分析了外延片径向和厚度方向的应力分布, 结果显示: 在 1200℃ 的生长温度下, 径向区域内的热应力分布比较均匀, 热应力变化范围为  $\pm 1.38\%$ ; 生长温度在 400℃ 到 1200℃ 范围内, 外延层表面应力与生长温度呈近似正比关系。分析了外延片生长温度、蓝宝石衬底和 SiO<sub>2</sub>、AlN 过渡层厚度对表面热应力的影响。研究成果可为该类外延片生产工艺研究和低应力外延片的筛选标准制定提供借鉴。

**关键词:** 薄膜技术; 热应力; 氮化镓; 有限元; 仿真

中图分类号: TB43; O434.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)05-0463-06

## Thermal Stress Analysis of Surface of Sapphire/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN Epilayers

CHEN Jing<sup>1</sup>, CEHNG Hongchang<sup>2</sup>, WU Lingling<sup>1</sup>, FENG Liu<sup>2</sup>, MIAO Zhuang<sup>2</sup>

(1. Institute of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to research the surface thermal stress in Sapphire/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN epilayer and the stress influence factors, the surface stress in materials with diameter of 40mm were respectively calculated and studied by the finite element modeling method, and the rationality of the model was proved. The epilayer stresses in the radial and axial direction were analyzed. The results indicated that the epilayer stress was uniform in the radial direction. The epilayer surface thermal stress was in direct proportion to growth temperature during the temperature from 400℃ to 1200℃. The dependence between the epilayer surface thermal stress and different parameters were respectively analyzed including growth temperature, SiO<sub>2</sub> and AlN transition layers thickness and Sapphire substrate thickness. The results are helpful for study on new technology of epilayers growth and establishing the quality choice standard of low stress epilayer.

**Key words:** film technology, thermal stress, GaN, finite element analysis, simulation

## 0 引言

紫外探测技术是继红外和激光探测技术之后的重要的军民两用光电探测技术。美国斯坦福大学、美国西北大学、日本滨松公司的研究结果均证明基于 NEA 的 GaN 光阴极作为紫外探测器件具有明显的应用优势和潜力<sup>[1-4]</sup>。蓝宝石高温下稳定, 价格适中, 制备工艺成熟, 可以大尺寸稳定生产, 是现在比较成熟的使用最为广泛衬底材料。但蓝宝石解理困难, 且其晶格常数与 GaN 有较大的失配 (高达 16%), 与 GaN 热

膨胀系数差异也较大。

SiO<sub>2</sub> 薄膜具有优良的热学稳定性、化学稳定性、电绝缘特性等, 而且在光学透射带内具有极优异的光学特性, 是紫外到近红外波段精密光学薄膜、低折射率薄膜等的最佳薄膜材料。SiO<sub>2</sub> 薄膜因其对紫外光的散射吸收小等性能, 是一种适合蓝宝石的增透涂层<sup>[5]</sup>。AlN 与 GaN 均属于 III 族氮化物材料, 它们具有较小的晶格失配 (2.4%) 和热膨胀系数 (5.2%) 失配。2002 年, Sakai 等人尝试了采用 MOVPE 在 AlN/蓝宝石衬底上直接生长 GaN, 发现其晶体质量比在蓝宝石衬底

收稿日期: 2016-09-23; 修订日期: 2016-12-22。

作者简介: 陈靖 (1976-), 男, 江西南康人, 讲师, 主要从事测试仿真方面的研究工作。

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金项目 (BJ2014004)。

上采用低温缓冲层生长的 GaN 更好<sup>[4]</sup>。综上所述,为了改善 GaN 光阴极的光学性能及解决蓝宝石衬底与 GaN 之间晶格失配和热膨胀系数差异引起的应力集中问题,可在蓝宝石衬底上先镀制 SiO<sub>2</sub> 薄膜,再用 AlN 作为过渡层,然后在其上外延生长高质量 GaN 层。

由于衬底和膜层材料的热膨胀系数失配,在高温下镀制外延层,当温度降低到室温时,衬底和膜层会产生不同大小的形变,从而产生热应力。多层膜中的热应力的存在不仅影响外延层-衬底系统的牢固性,还会严重影响器件的稳定性和寿命。

蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 多层结构外延材料生长温度高,热应力是影响其材料质量的重要因素。通过热应力仿真研究蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 外延片表面热应力分布及影响因素,可为该类外延片生长工艺研究和低应力外延片的筛选标准制定提供借鉴,对提高 GaN 光阴极的性能有重要意义。尽管关于多层薄膜微结构的理论计算已有相关研究,且多层光学薄膜(如 ZnS/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)表面热应力的计算也用不同方法进行了研究<sup>[6-10]</sup>,但蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 光电发射多层外延材料的热应力仿真研究未见公开报道。

有关多层外延材料表面热应力的计算,研究方法主要分为解析法和有限元法<sup>[6-10]</sup>。本文针对蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 外延材料多层结构及生长工艺的特点,分别用解析法和有限元分析法对表面热应力进行了计算和仿真研究,为材料生长及材料筛选提供技术支撑。

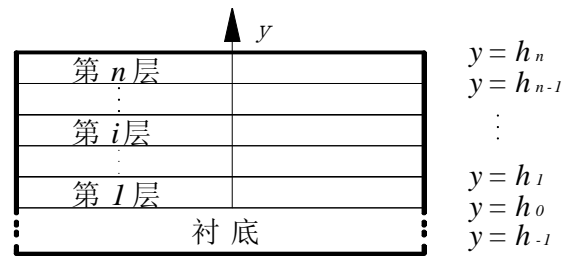
## 1 热应力计算模型

图 1 给出了多层薄膜微结构计算模型的示意图<sup>[11]</sup>。其中图 1(a)为多层薄膜结构在未受到热应力时的结构状态,建立如图坐标系,以衬底与薄膜的接触面为坐标轴  $y=0$ ,向上各层薄膜的厚度分别为  $h_i(i=1, 2, \dots, n)$ ,衬底自由表面坐标为  $y=-t_s$ ,  $t_s$  为衬底厚度,下标  $s$  表示衬底。图 1(b)为在温差  $\Delta T$  作用下,各层结构产生一定弯曲的示意图。

根据图 1 给出的示意图,多层膜结构中由于热应力产生的应变  $\varepsilon$  可以分解为材料受温差影响产生的均匀应变以及由于各种材料膨胀率不同从而导致的弯曲应变两部分。其表达式为:

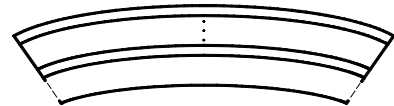
$$\varepsilon = c + \frac{y - t_b}{r}, \quad -t_s \leq y \leq h_n \quad (1)$$

式中:  $c$  是均匀应变;  $t_b$  为中性面(弯曲应变为 0 的平面)位置;  $r$  为室温下最终  $n$  层结构的弯曲曲率半径;  $y$  为厚度方向的坐标;  $h$  为厚度坐标。根据胡克(Hooke)定律,衬底以及薄膜材料受到的应力与应变存在以下



(a) 多层薄膜结构在未受到热应力时的结构

(a) The multilayer microstructure free of thermal stress



(b) 多层薄膜结构在受到热应力时的结构

(b) The multilayer microstructure under thermal stress

图 1 多层薄膜微结构计算模型示意图

Fig.1 The scheme of multilayer microstructure calculation model 关系:

$$\sigma_s = E_s(\varepsilon - \alpha_s \Delta T) \quad -t_s \leq y \leq 0 \quad (2)$$

$$\sigma_i = E_i(\varepsilon - \alpha_i \Delta T) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中:  $E$  是弹性模量;下标  $s$  和  $i$  分别表示衬底与第  $i$  层薄膜,对于非条状的尺寸结构而言,应该用双轴弹性模量来替换,即  $E_i/(1-\nu_i)$ ,  $\nu_i$  是第  $i$  层材料的泊松比<sup>[5]</sup>;  $\alpha$  为线性膨胀系数;  $\varepsilon$  为应变;  $\Delta T$  为温差。

$$\sigma_s = \frac{2}{t_s^2} \left( 3y + 2t_s - \frac{2}{E_s} \sum_{j=1}^n E_j t_j \right) \cdot \sum_{i=1}^n E_i t_i (\alpha_i - \alpha_s) \Delta T, \quad -t_s \leq y \leq 0 \quad (4)$$

$$\sigma_i = E_i \left[ \alpha_s - \alpha_i + 4 \sum_{j=1}^n \frac{E_j t_j (\alpha_j - \alpha_s)}{E_s t_s} \right] \Delta T, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

这就是为多层膜系统中应力应变计算的精确解<sup>[9]</sup>。当薄膜的厚度远小于衬底的厚度时,对这些解可进行相应的简化,得到:

$$\sigma_s = \frac{2(3y + 2t_s)}{t_s^2} \cdot \sum_{i=1}^n E_i t_i (\alpha_i - \alpha_s) \Delta T, \quad -t_s \leq y \leq 0 \quad (6)$$

$$\sigma_i = E_i(\alpha_s - \alpha_i) \Delta T \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

该解相当于 Townsend 等提出的近似解<sup>[12]</sup>。

## 2 有限元模型建立

采用了有限元分析软件 ANSYS 对蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 外延材料的热应力进行仿真研究,并通过理论值验证。材料参数见表 1<sup>[13-14]</sup>。

表 1 材料特性参数  
Table 1 Physical property parameters of materials

名称	杨氏模量 $E/\text{GPa}$	热膨胀系数 $\alpha/(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	泊松比 $\nu$	热传导系数 $W\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
Material	Young's modulus/(GPa)	Thermal expansion coefficient/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	Possion's ratio	Thermal conductivity/ $W\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
Sapphire	345	a 7.5 c 8.5	0.28	24
SiO <sub>2</sub>	767	0.55	0.17	1.3
AlN	340	4.5	0.25	200
GaN	290	a 5.59 c 3.17	0.20	220

进行热应力仿真之前，首先根据结构参数，在直径为 40 mm、厚度为 2 mm 的圆形蓝宝石衬底上沉积厚度不同的 SiO<sub>2</sub> 及 AlN 过渡层，再外延生长 GaN，用 ANSYS Workbench 中的 DM 模块生成衬底和多层膜的微结构，如图 2 所示。

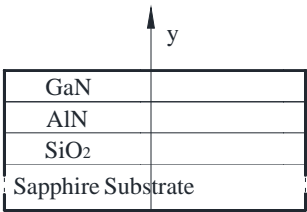


图 2 外延层微结构模型示意图

Fig.2 The scheme of epilayer microstructure

模拟计算中，将生长温度作为参考温度，将环境温度作为热耦合过程中外延层和衬底的温度载荷。为了便于分析，本文的建模过程不考虑瞬态效应，并假设外延层生长过程中材料性能不发生变化，将外延层和衬底视为各向同性的弹性材料，认为热应力产生主要由冷却到室温的过程中衬底与外延层的热膨胀系数不同所引起。在边界条件中不考虑系统的导热、对流和辐射等影响，同时忽略环境对材料性质的影响<sup>[15]</sup>。

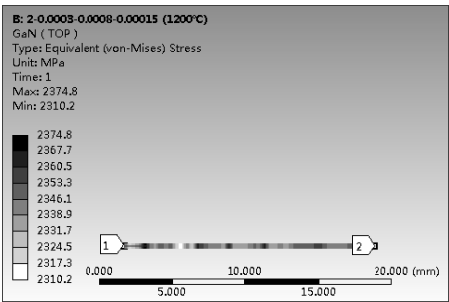
3 模型验证

3.1 GaN 外延层应力的分布情况

从生长温度为 1200℃ 下降为环境温度 25℃ 时，蓝宝石衬底厚度 2 mm，SiO<sub>2</sub> 为 300 nm、AlN 过渡层 800 nm 和 GaN 激发层 150 nm 情况下，利用有限元模型计算外延层热应力结构径向应力分布如图 3 所示。

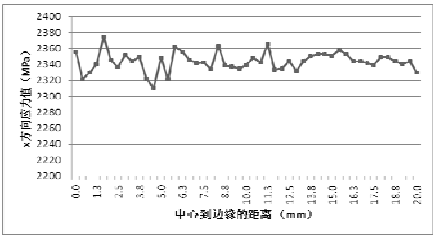
图 3(a)中，x 轴方向为径向，y 轴为轴向，即厚度方向。图中 1 点为 GaN 外延材料的中心位置，即  $\phi 40$  mm 外延材料径向方向的几何中心，2 点为边缘。图中所示的灰度柱状图表示为 GaN 外延层径向(x 方向)的应力变化情况。膜层内热应力最大值为 2374.8 MPa，最小值为 2310.2 MPa，数值均为正，表明外延层所受

应力主要为拉应力。用式(7)计算得到的理论值为 2270.25 MPa，与最大值和最小值的误差分别为 4.61% 和 1.76%。当镀膜温度为 1000℃ 时，模型计算值最大值为 1989.0 MPa，最小值为 1935.0 MPa，理论值为 1883.82 MPa，与最大值和最小值的误差分别为 5.58% 和 2.72%。可见，本文所建立的仿真模型的最小值与理论计算值在不同条件下的都是吻合的，说明该模型是合理的。图 3(b)是 GaN 外延材料上表面由中心到边缘的 x 方向应力变化趋势图，从图中可以看出：外延层所受的拉应力沿径向震荡分布，且分布较为均匀，最大为 2374.8 MPa，最小为 2310.2 MPa，围绕 2342.5 MPa 震荡分布，热应力变化范围为  $\pm 1.38\%$ 。



(a)x 方向应力的分布情况

(a) The distribution of stress at x-direction

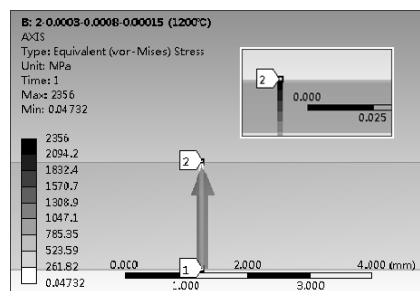


(b) x 方向应力变化趋势图

(b) The stress variation in the film at x-direction

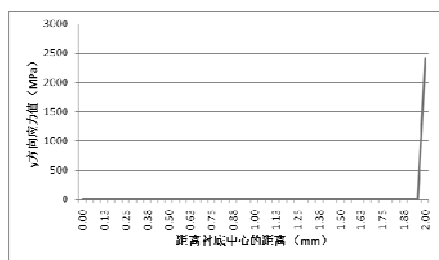
图 3 GaN 外延层表面中心到边缘 x 方向应力的分布情况  
Fig.3 The distribution of stress at x-direction in the GaN epilayer from the center to edge

圆盘中心处,衬底下表面到外延层上表面的 $y$ 方向应力变化趋势如图4所示。



(a)  $y$  方向应力的分布情况

(a) The distribution of stress at  $y$ -direction



(b)  $y$  方向应力变化趋势图

(b) The stress variation in the film at  $y$ -direction

图4  $y$  方向中心处衬底下表面到 GaN 外延层上表面应力的分布情况

Fig.4 The distribution of stress at  $y$ -direction in the centre from the downside of substrate to upside surface of GaN epilayer

图4(a)展示了外延层内 $y$ 方向的应力随厚度变化情况( $\phi 40$  mm材料几何中心处)。图4(a)中左侧的所示的灰度柱状图表示为GaN外延层 $y$ 方向的应力变化情况。图4(a)下方图形中,点1为蓝宝石衬底下表面的几何中心,点2为GaN外延材料上表面的中心位置。可以看出: $y$ 方向衬底中的应力较小,趋于零。为了表现衬底和外延层的界面上的应力情况,将2点处的应力分布情况进行放大,显示在图4(a)的右上方。从该局部放大图可以看出:GaN外延材料上表面的中心处应力的极值为2356 MPa,表现为拉应力。图4(b)是GaN外延材料 $y$ 方向中心处衬底下表面到GaN外延层上表面应力的变化趋势图。可以看出:2 mm厚的衬底内应力都趋于零,这是因为降温过程中衬底基本上处于自由收缩状态,所以内部应力很小。衬底和外延层的界面上的应力出现了突变,迅速由趋于零变化为2356 MPa,表现为拉应力。

比较图3和图4中展示的 $x$ 和 $y$ 两方向的应力分布情况,可以看出: $x$ 方向和 $y$ 方向均为拉应力; $y$ 方向仅在衬底和外延层的界面上应力出现了突变应力主要集中在GaN外延层的表面,因此后面的模拟仿真主

要研究GaN外延层的表面应力。

### 3.2 GaN 外延层应力与生长温度的关系

为了研究GaN外延层表面热应力与生长温度的关系,在模拟过程中,蓝宝石衬底厚度2 mm,  $\text{SiO}_2$ 为300 nm、AlN过渡层800 nm和GaN激发层150 nm情况下,改变外延层的生长温度,利用有限元模型计算,记录相应的最大热应力与最小热应力,并与式(7)计算的相应热应力进行对比。高低温生长通常是较低温度在400~600℃范围,高温在1000℃以上<sup>[16-17]</sup>,因此选取400℃到1200℃的范围内进行仿真。由模拟仿真和数值计算分别获得的GaN外延层表面热应力值与温度的对应关系如图5所示。

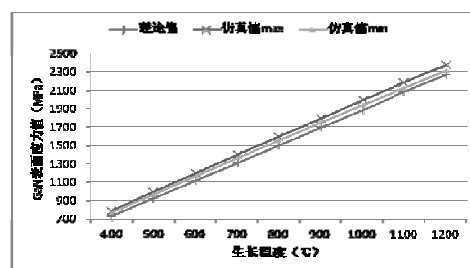


图5 GaN 表面应力与生长温度之间的关系

Fig.5 The dependence between surface stress in GaN and temperature

图5中横坐标为生长温度,即由该温度降温到达室温25℃计算GaN上表面的应力值,以GaN上表面的应力值作为纵坐标。由图可以看出:400℃到1200℃的范围内,随着GaN外延层生长温度的增大,模型计算获得的外延层表面热应力的最大值与最小值均与温度呈近似正比关系,模拟值与理论值的变化趋势一致。因此,降低外延层的生长温度,可以减小热应力。此外,最小热应力值与数值计算获得的理论值更为接近,因此后面的模拟仿真都选取外延层表面热应力的最小值。

### 3.3 GaN 外延层应力与 AlN 过渡层厚度的关系

为了研究热应力与AlN过渡层厚度的关系,保持衬底厚度2 mm、 $\text{SiO}_2$ 厚度300 nm不变,在1200℃的生长温度下,均选取GaN厚度为150 nm,由于厚度太薄不利于形成高质量的膜层,所以选择AlN过渡层厚度在300 nm至700 nm范围内,厚度间隔50 nm,在其他材料参数、边界条件及施加的载荷都相同的情况下,进行模拟仿真,结果如图6所示。

图6的横坐标为AlN过渡层的厚度,纵坐标为GaN上表面的应力值。由图可以看出:在不同生长温度下,在AlN过渡层厚度300 nm到700 nm范围内,随着AlN厚度的增加,GaN上表面的热应力逐渐增大。所以选取合适的AlN过渡层厚度对GaN的应力有改

善作用。

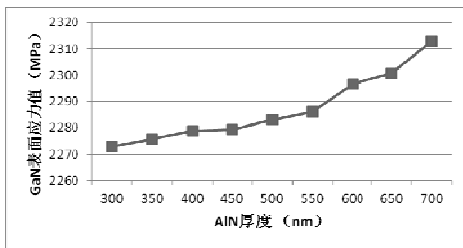


图6 GaN 表面应力与 AlN 过渡层厚度之间的关系

Fig.6 The dependence between surface stress in GaN film and AlN transition layer thickness

### 3.4 GaN 外延层应力与 SiO<sub>2</sub> 厚度的关系

为了研究热应力与 SiO<sub>2</sub> 厚度的关系, 在生长温度为 1200℃, 保持衬底厚度 2 mm、GaN 外延层厚度为 150 nm, AlN 过渡层的厚度 800 nm 不变, SiO<sub>2</sub> 厚度在 150 nm 至 800 nm 范围内, 厚度间隔 50 nm, 在其他材料参数、边界条件及施加的载荷都相同的情况下, 分别进行模拟仿真。结果如图 7 所示。

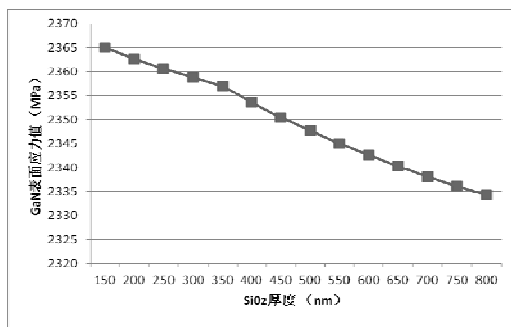


图7 GaN 表面应力与 SiO<sub>2</sub> 厚度之间的关系

Fig.7 The dependence between surface stress in GaN and SiO<sub>2</sub> thickness

图 7 中横坐标为 SiO<sub>2</sub> 的厚度, 纵坐标为 GaN 上表面的应力值。由图 7 可以看出: 在 SiO<sub>2</sub> 厚度为 150 nm 到 800 nm 的变化范围内, 随着 SiO<sub>2</sub> 厚度的增加, 外延层的热应力逐渐减小。图 7 表明 SiO<sub>2</sub> 厚度对 GaN 上表面的应力值影响显著。由于 SiO<sub>2</sub> 的热膨胀系数和热传导系数都很小, 逐渐升温, 耐热冲击性能优良, 因此当 SiO<sub>2</sub> 很薄时, 外延层升温较快, 热应力较大, 而随着 SiO<sub>2</sub> 厚度的增加, 外延层表面升温过程缓慢, 其表面热应力不断减小。因此, 在实际生长过程中选择适当的 SiO<sub>2</sub> 厚度可以降低外延层热应力。

### 3.5 GaN 外延层应力与蓝宝石衬底厚度的关系

为了研究热应力与衬底厚度的关系, 在生长温度为 1200℃、SiO<sub>2</sub> 为 300 nm、AlN 过渡层 800 nm 和 GaN 激发层 150 nm 情况下, 常用的衬底厚度在 1 mm 至 3.5 mm, 分别选择衬底厚度为 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm 和 3.5 mm, 在其他材料参数、边界条件及施加的载荷都相同的情况下, 分别进行模拟仿真。结

果如图 8 所示。

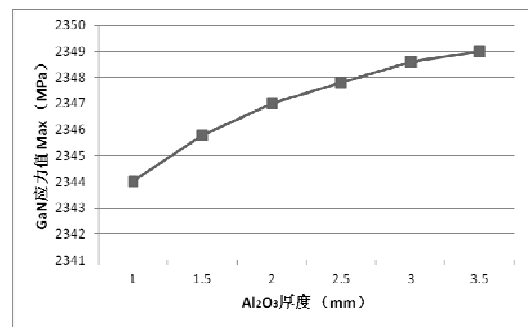


图8 GaN 表面应力与衬底厚度之间的关系

Fig.8 The dependence between surface stress in GaN and substrate thickness

图 8 中横坐标为蓝宝石衬底的厚度, 纵坐标为 GaN 上表面的应力值。由图 7 可以看出: 在衬底厚度为 1 mm 到 3.5 mm 的变化范围内, 随着衬底厚度的增加, 外延层的热应力缓慢增加。图 7 表明蓝宝石衬底厚度对 GaN 上表面的应力值影响显著。当衬底很薄时, 外延层与衬底温度差异小, 热应力也较小, 随着衬底厚度的增加, 外延层表面与衬底温度差异逐渐变大, 其表面热应力缓慢增加。因此, 在实际过程中选择合适的衬底厚度可以降低外延层热应力。

## 4 结论

本文以 $\phi 40$  mm 蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 外延片为研究对象, 利用有限元分析软件 ANSYS 对蓝宝石/SiO<sub>2</sub>/AlN/GaN 多层结构的外延片的表面热应力的分布分别进行了模拟分析和理论计算, 并且验证了该仿真模型的合理性。同时分析了外延片生长温度、蓝宝石衬底、AlN 过渡层和 SiO<sub>2</sub> 厚度对表面热应力大小的影响。

结果表明: 在 1200℃ 的生长温度下, 在径向区域内的热应力分布比较均匀, 热应力变化范围为 $\pm 1.38\%$ ; 生长温度在 400℃ 到 1200℃ 范围内, 外延层表面应力与生长温度呈近似正比关系; 在 AlN 过渡层厚度 300 nm 到 700 nm 范围内, 随着 AlN 厚度的增加, GaN 上表面的热应力逐渐增大; 在 SiO<sub>2</sub> 厚度为 150 nm 到 800 nm 的变化范围内, 随着 SiO<sub>2</sub> 厚度的增加, 外延层的热应力逐渐减小; 在衬底厚度为 1 mm 到 3.5 mm 的变化范围内, 随着衬底厚度的增加, 外延层的热应力缓慢增加。研究成果可为该类外延片生长工艺研究和低应力外延片的筛选标准制定提供借鉴。

## 参考文献

- [1] Shahedipour F S, Ulmer M P. Efficient GaN photocathodes for low-level ultraviolet signal detection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(4): 333-335.

- [2] 郭向阳, 常本康, 乔建良, 等. GaN 与 GaAs NEA 光电阴极稳定性的比较[J]. 红外技术, 2010, **32**(2): 117-120.
- GUO Xiang-yang, CHANG Ben-kang, QIAO Jian-liang, et al. Comparison of Stability of GaN and GaAs Photocathode[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(2): 117-120.
- [3] Du Yujie, Chang Benkang, Fu Xiaoqian, et al. Effects of NEA GaN photocathode performance parameters on quantum efficiency[J]. *Optik*, 2012, **123**(9): 800-803.
- [4] 李向阳, 许金通, 汤英文, 等. GaN 基紫外探测器及其研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(3): 276-280.
- LI Xiang-yang, XU Jing-tong, TANG Ying-wen, et al. GaN based ultraviolet detectors and its recent development[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 276-280.
- [5] 冯丽萍, 刘正堂. 蓝宝石衬底表面 SiO<sub>2</sub> 薄膜的应力分析[J]. 硅酸盐学报, 2008, **36**(2): 206-209.
- FENG Liping, LIU Zhengtang Investigation of the stress of SiO<sub>2</sub> films deposited on sapphire substrate[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **36**(2): 206-209.
- [6] Hsueh CH. Thermal stresses in elastic multilayer systems[J]. *Thin Solid Films*, 2002, **418**(2): 182-188.
- [7] Cao T, Zhang L, Xiao Z, et al. Enhancement and tenability of fano resonance in symmetric multilayer metamaterials at optical regime[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, **46**(39): 395103.
- [8] 邵淑英, 范正修, 范瑞瑛, 等. 薄膜应力研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(1): 22-27.
- SHAO Shu-Ying, FAN Zheng-Xiu, FAN Rui-Ying, et al. A review of study of stress in thin films[J]. *Laser & Optronics Progress*, 2005, **42**(1): 22-27.
- [9] 陈为兰. 光学薄膜应力的研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2008.
- CHEN Wei-Lan. Research on stresses in optical films[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [10] Kinoshita K, Maki K, Nakamizo K, et al. Stress in vacuum deposited films of silver[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1967, **6**(1): 42-50.
- [11] 刘星, 朱嘉琦, 韩杰才. 多层膜结构热应力计算[J]. 力学与实践, 2014, **36**(4): 453-456.
- LIU Xing, ZHU Jia-Qi, HAN Jie-Cai. Thermal stresses in elastic multilayer systems[J]. *Mechanics in Engineering*, 2014, **36**(4): 453-456.
- [12] Townsend PH, Barnett DM, Brunner TA. Elastic relationships in layered composite media with approximation for the case of thin films on a thick substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(11): 4438-4444.
- [13] 李英爱. 氮化铝薄膜的制备及场发射性质[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- LI Ying-Ai, Preparation and field Emission Characteristics of AlN thin films[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [14] 邢志刚. 图形蓝宝石衬底生长 GaN 外延薄膜的微结构研究[D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2007.
- XING Zhigang. Study on micro-structure of GaN films epitaxially grown on patterned sapphire substrate[D]. Beijing: Institute of Physics CAS, 2007.
- [15] 吴靛臻, 唐吉玉, 马远新, 等. SiO<sub>2</sub> 薄膜热应力模拟计算[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2009, **1**(1): 52-55.
- WU Liang-Zhen, TANGJie-Yu, MAYuan-Xin, et al. Simulation of thermal stress in SiO<sub>2</sub> thin film[J]. *Journal of South China Normal University: Natural Science edition*, 2009, **1**(1): 52-55.
- [16] 段焕涛. 基于高温 AlN 成核层的 GaN 基异质结构材料生长研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- Duan Huantao. Growth of GaN-based heterostructure materialson High Temperature AlN Nucleation Layer[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [17] 景微娜. 衬底处理对 MOCVD 外延生长 GaN 薄膜性能的影响[D]. 天津: 河北工业大学, 2008.
- Jing Weina Effect of sapphire substrate etching on the quality of gallium nitride epilayers[D]. Tianjin: Hebei University of technology, 2008.