

# 蓝宝石-氮化镓异质膜系统界面应力的模拟研究

李增林, 左然\*

江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 对蓝宝石-氮化镓异质膜系统的界面应力进行有限元模拟分析,研究了从生长温度(1373 K)降到室温(300 K)的过程中系统界面应力的分布情况及其影响因素,并通过理论计算验证了所建模型的合理性。模拟结果显示:系统界面应力沿径向分布均匀,只有在边缘处界面应力急剧增大。当不考虑边缘效应,分别改变氮化镓膜或蓝宝石衬底厚度,保持另一厚度不变时,薄膜系统界面应力极大值出现在蓝宝石衬底与氮化镓膜厚度之比  $d_s/d_f \approx 1.5$  处,极小值出现在  $d_s/d_f \approx 4.3$  处,说明薄膜系统界面应力大小不仅仅取决于热膨胀系数的差异或温差,受膜厚比的影响也很大。模拟还发现,由于晶格失配产生的应力远远大于因热失配产生的应力。

**关键词** 薄膜; 氮化镓; 热失配; 界面应力; 膜厚比

中图分类号 TB43 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.193102

## Simulation of Interfacial Stress in Sapphire-GaN Heterogeneous Film System

Li Zenglin, Zuo Ran\*

School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** The interfacial stress in sapphire-GaN heterogeneous film system is simulated using the finite element method herein. The distribution of the interfacial stress and its influencing factors in the process of the growth temperature (1373 K) falling to the room temperature (300 K) are studied. The rationality of the proposed model was verified through theoretical calculations. Results show that the interfacial stress in the system is uniformly distributed along the radial direction, and only the interfacial stress at the edge changes suddenly and drastically. When the thickness of GaN film or sapphire substrate is changed without considering the edge effect while the thickness of another is unchanged, the maximum value of interfacial stress appears when the thickness ratio  $d_s/d_f$  of sapphire substrate to GaN film is approximately 1.5, and the minimum value appears when the thickness ratio is approximately 4.3. It shows that the interfacial stress of the film system is not determined by the difference of coefficient of thermal expansion or the difference of temperature, but it is greatly influenced by the thickness ratio. Furthermore, it is found that the stress due to lattice mismatch is much greater than that owing to thermal mismatch.

**Key words** thin films; GaN; thermal mismatch; interfacial stress; thickness ratio of sapphire substrate to GaN film

**OCIS codes** 310.6870; 160.3380; 230.3990

## 1 引言

氮化镓(GaN)是一种具有重要应用价值的第三代半导体材料,由于具有宽直接带隙、耐高温、耐辐射等特性,已被广泛用于制备蓝光 LED、半导体激光器、高电子迁移率晶体管(HEMT)等<sup>[1-3]</sup>。GaN 同质衬底是生长 GaN 薄膜的理想衬底,但 GaN 体

单晶极难在熔体中生长,利用氢化物气相外延(HVPE)生长 GaN 厚膜是获得单晶衬底的主要方法。GaN 厚膜主要生长在蓝宝石( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )衬底上,而 GaN 厚膜和蓝宝石衬底之间的晶格失配度较大,且二者的热膨胀系数相差较大,在生长过程特别是冷却过程会产生较大的应力,导致 GaN 厚膜出现翘曲和开裂。了解这些应力的发生过程对于控制

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-02-13; 录用日期: 2020-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61474058)

\* E-mail: rzuo@ujs.edu.cn

GaN 厚膜的生长质量和生长效率的意义很大。

已有学者对半导体薄膜应力及分布进行了大量研究。Moridi 等<sup>[4]</sup>使用有限元分析方法研究了从沉积温度到室温冷却过程中,热失配对 300 nm 厚硅膜应力变化的影响,还模拟了不同薄膜厚度下晶格失配引起的内应力和位错分布。Pramanik 等<sup>[5]</sup>利用有限元法分析了在蓝宝石-硅薄膜系统冷却过程中残余应力的产生和演化,发现在一定条件下,薄膜系统会发生明显的应力集中和不连续,从而引发裂纹或分层。Moridi 等<sup>[6]</sup>探讨了在薄膜体系中晶格失配产生残余应力的机理,研究了材料层间差异引起的热失配、晶格失配和界面失配位错,发现热失配、晶格失配及其耦合效应不能解释实验中残余应力对厚度的依赖性,而界面失配位错起着关键作用,导致 100~500 nm 薄膜厚度范围内的残余应力发生变化。上述理论分析与实验研究结果基本吻合,表明使用有限元法求解的位错弹性分析可准确预测残余应力分布。李长安等<sup>[7]</sup>提出一种针对薄膜应力的模拟计算方法,使用该方法可以方便地计算出多层薄膜在各个阶段的本征应力及热应力。董位等<sup>[8]</sup>利用有限元分析方法对蓝宝石基 GaN 薄膜的应力进行模拟,发现沉积温度升高、薄膜厚度减小、温差增大、衬底厚度增大都会使得热应力变大。

前人的研究主要针对半导体薄膜,对于衬底厚度产生的影响以及冷却过程产生的界面应力及分布仍不清楚。本文分别从理论分析和有限元模拟两方面研究了蓝宝石-氮化镓异质膜系统,着重分析了从生长温度冷却到室温过程中,温度以及氮化镓、蓝宝石衬底厚度的变化对蓝宝石-氮化镓异质膜系统界面应力的影响。

## 2 理论分析

薄膜应力可分为本征应力和热应力<sup>[9]</sup>。本征应力是指薄膜在衬底或相邻层上生长后由于晶格失

配、杂质介入、晶格重构、相变等引起的应力;热应力则是指生长之后由于衬底与薄膜之间热膨胀系数的差异引起的应力。本节将通过理论分析求解得到薄膜热应力的计算公式。

如图 1 所示,对于蓝宝石-氮化镓异质膜系统,由于二者热膨胀系数差别很大,因此薄膜与衬底在加热和冷却的过程中变形程度不同,导致系统内部生成热应力。对于受单一约束的薄膜热应力,其计算公式<sup>[10]</sup>为  $\sigma = E\alpha(T_0 - T)$ ,其中  $E$  为杨氏模量, $\alpha$  为热膨胀系数, $T_0$  和  $T$  分别为薄膜的初始温度和最终温度。

设 GaN 薄膜和蓝宝石衬底厚度分别为  $d_f$  和  $d_s$ ,宽度均为  $b$ ,假设横截面  $d_f b$  和  $d_s b$  上都均匀受力,受力大小为  $F_f$  和  $F_s$ ,进而产生均匀的截面内应力  $\sigma_f$  和  $\sigma_s$ 。GaN 薄膜和衬底应变分别为<sup>[10]</sup>

$$\epsilon_f = \alpha_f \Delta T + \frac{F_f(1 - \nu_f)}{E_f d_f b}, \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \alpha_s \Delta T + \frac{F_s(1 - \nu_s)}{E_s d_s b}, \quad (2)$$

式中: $\Delta T$  为温差; $\nu_f$  和  $\nu_s$  分别为 GaN 薄膜和蓝宝石衬底的泊松比; $\alpha_f$  和  $\alpha_s$  分别为 GaN 薄膜和蓝宝石衬底的热膨胀系数; $E_f$  和  $E_s$  分别为 GaN 薄膜和蓝宝石衬底的杨氏模量。根据界面应变匹配要求  $\epsilon_f = \epsilon_s$ ,又  $F_f = -F_s$ ,可得薄膜系统的热应力:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_f b} = \frac{(\alpha_s - \alpha_f)\Delta T}{\frac{1 - \nu_f}{E_f} + \frac{1 - \nu_s}{E_s} \left(\frac{d_f}{d_s}\right)}. \quad (3)$$

(3)式给出了在薄膜和衬底横截面内应力都为均匀分布的情况下,薄膜热应力与 GaN 薄膜和蓝宝石衬底的温差、泊松比、热膨胀系数、杨氏模量、厚度比的函数关系。由(3)式可知,当蓝宝石衬底与 GaN 薄膜的厚度比  $d_f/d_s$  和温差  $\Delta T$  不变时,衬底与薄膜的热膨胀系数之差  $(\alpha_s - \alpha_f)$  越大,则热应力  $\sigma_f$  也越大。而当衬底与薄膜的热膨胀系数之差  $(\alpha_s - \alpha_f)$  和温差  $\Delta T$  不变时, $d_f/d_s$  越大,则热应力  $\sigma_f$  越小。

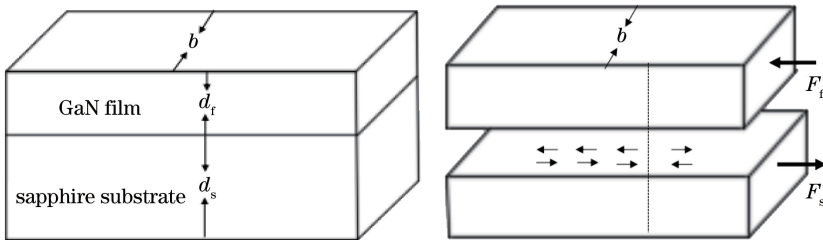


图 1 薄膜系统示意图。(a) 蓝宝石-氮化镓异质膜系统;(b) 指定界面上的力自由体

Fig. 1 Schematic of thin film system. (a) Sapphire-GaN heterogeneous film system; (b) force free body in specified interface

前人使用的薄膜热应力计算公式大多基于 Stony 模型<sup>[11]</sup>,即假设外延膜厚度远远小于衬底厚度,但这个假设不适用于本研究的厚膜。而(3)式可用于估算不同外延膜与衬底厚度比时蓝宝石-氮化镓系统的热应力,并与有限元模拟结果进行对比。

由于(3)式采用了薄膜和衬底横截面内应力均匀的假设,因此只能给出大致的变化趋势。而实际过程中由于薄膜和衬底的横截面各点的应变不同,热应力也不同。下面将利用有限元分析方法模拟从生长温度降到室温过程中温度以及 GaN 膜和蓝宝石衬底的厚度对蓝宝石-氮化镓系统界面应力的影响。

表 1 材料的物性参数<sup>[12]</sup>Table 1 Physical properties of materials<sup>[12]</sup>

Material	Density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Thermal conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Thermal expansion coefficient / ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	Young's modulus /GPa	Poisson ratio
Sapphire	3980	765	10.5	7.5	372	0.25
GaN	6100	355	175	5.6	210	0.17

蓝宝石-氮化镓异质膜系统有限元模型如图 2 所示。其中采用了精细的单元网格以获得较高的计算精度。本研究所使用的有限元单元类型为 Plane 13,它有 4 个节点,每个节点最多有 4 个自由度。这种类型的单元具有本研究所需的热场、结构场和耦合能力。计算过程考虑周围环境的热对流及热辐射,选取

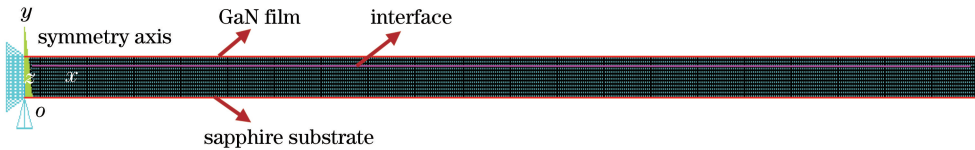


图 2 蓝宝石-氮化镓异质膜系统有限元模型

Fig. 2 Finite element model of sapphire-GaN heterogeneous film system

## 4 结果与讨论

### 4.1 薄膜系统冷却 1 min 后的温度、翘曲变形、冯·米塞斯应力分布

为了验证有限元模拟的准确性,首先考虑典型的薄膜系统。取蓝宝石衬底和 GaN 膜厚分别为  $400 \mu\text{m}$  和  $200 \mu\text{m}$ ,模拟从生长温度  $1373 \text{K}$  开始在自然环境下冷却 1 min 后薄膜系统的温度、变形、冯·米塞斯应力的变化及分布情况。由于薄膜系统在环境中冷却时存在热对流及热辐射,中心的冷却速度较边缘慢,中心与边缘的最大温差为  $1.24 \text{K}$ ,如图 3 所示,其中 MN 和 MX 分别表示最小值和最大值。

在降温冷却的过程中,薄膜系统界面处 GaN 和

## 3 有限元建模

使用有限元分析软件 ANSYS APDL 对蓝宝石-氮化镓异质膜系统从生长温度 ( $1373 \text{K}$ ) 降至室温 ( $300 \text{K}$ ) 的冷却过程进行数值模拟。考虑到薄膜系统为圆柱轴对称系统,并假设系统材料为各向同性,所以选择二维轴对称模型,研究利用 HVPE 方法生长的  $2 \text{inch}$  ( $1 \text{inch} = 2.54 \text{cm}$ ) 及  $4 \text{inch}$  GaN 厚膜降温时的界面应力分布。只改变 GaN 膜厚(保持蓝宝石衬底厚度不变)和只改变蓝宝石衬底厚度(保持 GaN 膜厚不变),分别研究界面应力的变化情况。模拟采用的材料物性参数见表 1<sup>[12]</sup>。

典型的自然对流换热系数  $10.45 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[5]</sup>。在薄膜系统中心处施加对称边界条件以及唯一约束,即将原点的  $x, y$  位移设为 0,由此薄膜系统的变形完全由热载荷引起。模拟从薄膜生长温度  $1373 \text{K}$  冷却至  $1073 \text{K}$  以及室温  $300 \text{K}$  时蓝宝石-氮化镓异质膜系统界面应力的分布情况及影响因素。

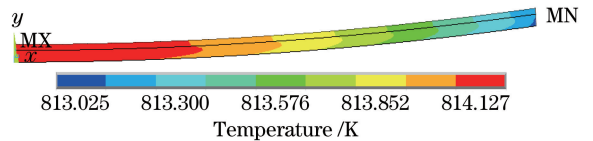


图 3 蓝宝石-氮化镓异质膜系统冷却 1 min 后的温度分布  
Fig. 3 Temperature distribution of sapphire-GaN heterogeneous film system after cooling for 1 min

蓝宝石的热膨胀系数存在差异,使得薄膜系统发生凹翘曲,冷却 1 min 后薄膜系统的最大翘曲变形为  $926 \mu\text{m}$ ,如图 4 所示。

冯·米塞斯屈服准则通常用来定义脆性材料的断裂。因此,对冯·米塞斯应力的分析过程中将出现多层薄膜系统断裂的迹象。

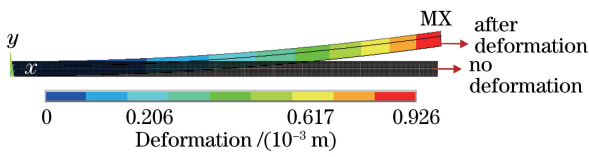


图4 蓝宝石-氮化镓异质膜系统冷却 1 min 后的翘曲变形

Fig. 4 Warpage deformation of sapphire-GaN heterogeneous film system after cooling for 1 min

如图 5 所示,薄膜系统边缘的几何形状发生突变,故其附近是一个应力集中区<sup>[9]</sup>,冯·米塞斯应力最大值出现在薄膜系统的边缘。另外,薄膜系统界面处热膨胀系数存在差异,使得在整个厚度方向上界面处的应力最大。由(3)式计算得到热应力平均值为 194.13 MPa,而使用 ANSYSDPAL 软件

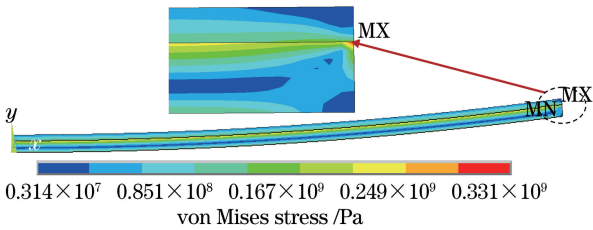


图5 蓝宝石-氮化镓异质膜系统冷却 1 min 后的冯·米塞斯应力分布

Fig. 5 von Mises stress distribution of sapphire-GaN heterogeneous film system after cooling for 1 min

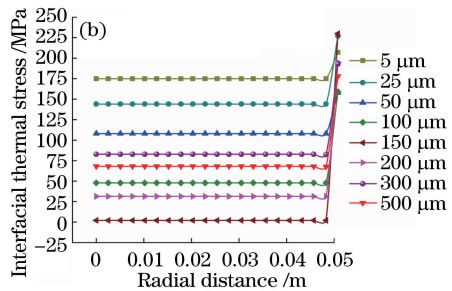
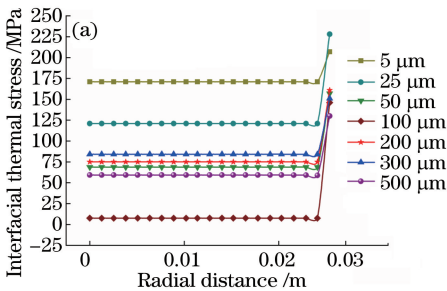


图6 降温至 1073 K 时不同 GaN 膜厚的系统界面应力分布。(a) 2 inch 衬底;(b) 4 inch 衬底

Fig. 6 Interfacial stress distribution of different thicknesses of GaN films for cooling to 1073 K. (a) 2 inch substrate; (b) 4 inch substrate

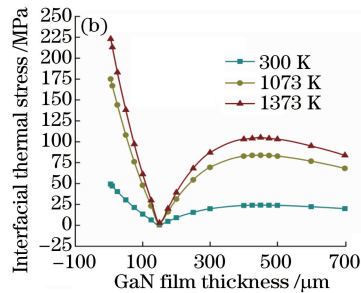
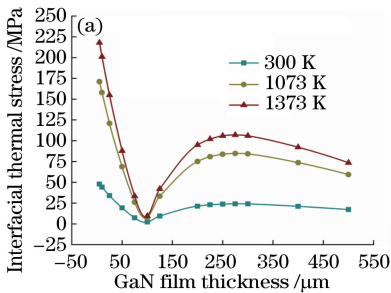


图7 界面应力随 GaN 膜厚的变化情况(忽略边缘)。(a) 2 inch 衬底;(b) 4 inch 衬底

Fig. 7 Variation of interfacial stress with the thickness of GaN film (ignore edges). (a) 2 inch substrate; (b) 4 inch substrate

模拟得到的热应力平均值为 203.59 MPa,误差小于 5%,说明所建立的有限元模型是合理的。

#### 4.2 GaN 膜和蓝宝石衬底厚度变化对异质膜系统界面应力的影响

分别对直径为 2 inch 和 4 inch 的蓝宝石-氮化镓异质膜系统从生长温度(1373 K)冷却至不同温度(1073 K、300 K)的热应力进行非稳态数值模拟计算。首先,取 2 inch 蓝宝石衬底厚度为 400  $\mu\text{m}$ , GaN 膜厚依次取 5, 25, 50, 100, 200, 300, 500  $\mu\text{m}$  进行计算;然后,取 4 inch 蓝宝石衬底厚度为 650  $\mu\text{m}$ , GaN 膜厚依次取 5, 25, 50, 100, 150, 200, 500, 700  $\mu\text{m}$  进行计算。

图 6 所示为 2 inch 和 4 inch 蓝宝石衬底从初始温度 1373 K 降温至 1073 K,保持蓝宝石衬底厚度不变而改变 GaN 膜厚时,薄膜系统的界面应力沿径向的分布。结果显示,界面应力随 GaN 膜厚度而变化。对于不同的 GaN 膜厚,除了系统边缘外,薄膜系统内部界面应力沿径向均保持不变,而边缘的界面应力都迅速增加到最大值。当 GaN 膜厚增加时,薄膜系统界面应力并不是单调增加,而是先减少后增加,存在一个最小应力的 GaN 膜厚度。

图 7 所示为在不同温度下蓝宝石-氮化镓异质膜系统界面应力随 GaN 膜厚度的变化情况。可以

看到,无论是 2 inch 还是 4 inch 系统,当衬底厚度保持不变时,随着 GaN 膜厚增加,界面应力先急剧下降并到达一个极小值,然后缓慢增加至一个极大值,接着又缓慢减小。

当薄膜系统温度为 1373 K、1073 K、300 K 时,2 inch 薄膜系统界面应力极小值分别为 9.39 MPa、7.62 MPa、2.22 MPa,均出现在 GaN 膜厚约 100  $\mu\text{m}$  处;而 4 inch 薄膜系统界面应力极小值分别为 3.01 MPa、1.99 MPa、0.443 MPa,均出现在 GaN 膜厚约 150  $\mu\text{m}$  处。与 2 inch 薄膜系统(衬底厚 400  $\mu\text{m}$ )相比,4 inch 薄膜系统(衬底厚 650  $\mu\text{m}$ )的界面应力极小值点向右平移(从 GaN 膜厚约 100  $\mu\text{m}$  处移动到约 150  $\mu\text{m}$  处),这说明界面应力

大小很可能与蓝宝石衬底和 GaN 膜的相对厚度存在一定的关联。因此,进一步模拟固定 GaN 膜厚而改变蓝宝石衬底厚度时界面应力的变化情况。取 2 inch GaN 薄膜厚度为 100  $\mu\text{m}$ ,4 inch GaN 薄膜厚度为 150  $\mu\text{m}$ ,分别改变蓝宝石衬底厚度,模拟计算薄膜系统界面应力的径向分布。

图 8 所示为 2 inch 和 4 inch 蓝宝石衬底从初始温度 1373 K 降至 1073 K,保持 GaN 膜厚不变而改变蓝宝石衬底厚度时,薄膜系统界面应力沿径向的分布。图 8 所示的应力分布规律与图 6 相似:当蓝宝石衬底厚度增加时,薄膜系统界面应力并不是单调增加,而是先减少后增加,存在一个最小应力的蓝宝石衬底厚度。

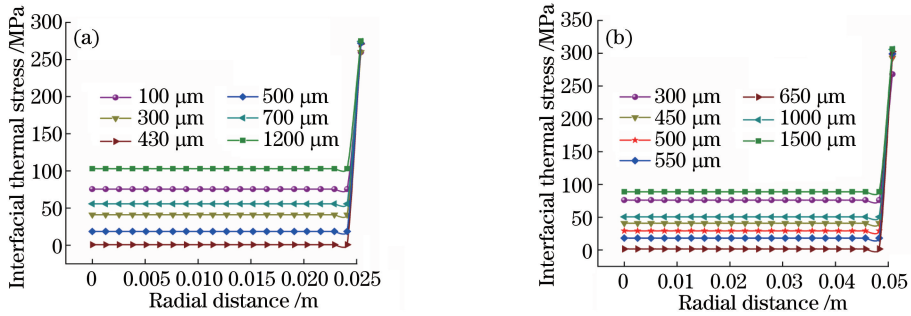


图 8 降温至 1073 K 时不同蓝宝石衬底厚度的界面应力分布。(a) 2 inch 衬底;(b) 4 inch 衬底

Fig. 8 Interfacial stress distribution of different sapphire substrate thickness for cooling to 1073 K.

(a) 2 inch substrate; (b) 4 inch substrate

### 4.3 蓝宝石衬底与 GaN 膜厚比对薄膜系统界面应力的影响

根据 4.2 节的模拟结果,以蓝宝石衬底厚度与 GaN 膜厚度之比  $d_s/d_f$  为变量来研究膜厚比对界面应力的影响。如图 9 所示,随着  $d_s/d_f$  的增大,界面应力先快速增加至一个极大值,随后又减小到一个极小值,接着又重新增大。无论是 2 inch

还是 4 inch 蓝宝石-氮化镓异质膜系统,界面应力的极小值都发生在  $d_s/d_f \approx 4.3$  处,由于图 9 中只有一个极小值,因此它也是界面应力的最小值;极大值都出现在  $d_s/d_f \approx 1.45$  处。该结果说明蓝宝石-氮化镓异质膜系统的界面应力大小不依赖于薄膜或衬底的具体厚度,而依赖于衬底与薄膜的相对厚度。

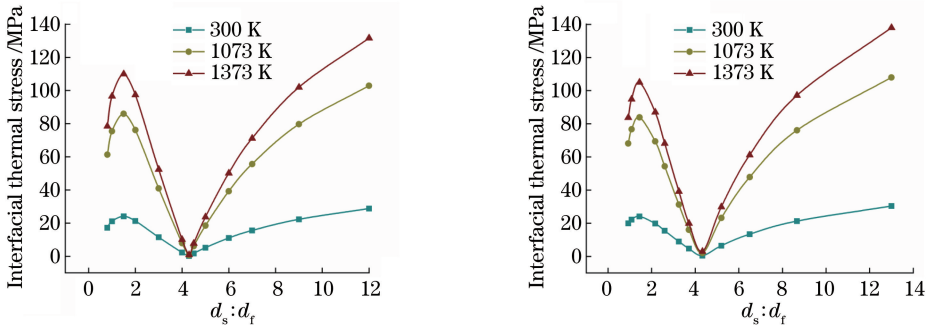


图 9 界面应力随  $d_s/d_f$  的变化情况。(a) 2 inch 衬底;(b) 4 inch 衬底

Fig. 9 Variation of interfacial stress with  $d_s/d_f$ . (a) 2 inch substrate; (b) 4 inch substrate

### 4.4 GaN 膜厚变化对薄膜系统最大翘曲度的影响

在降温过程中,薄膜系统界面处 GaN 膜与蓝宝

石衬底间热膨胀系数存在差异,使得薄膜系统发生凹陷翘曲。如图 10 所示,GaN 膜厚增加时,薄膜系

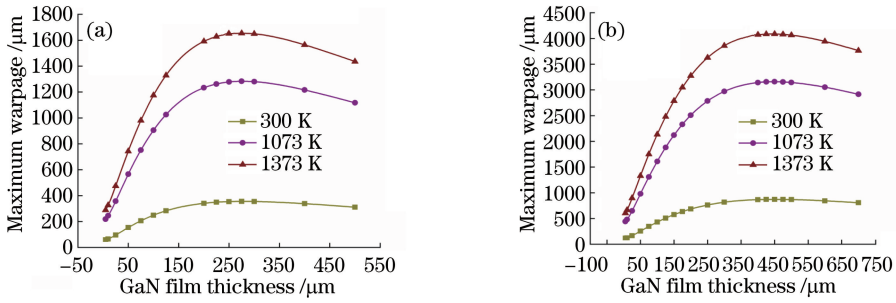


图 10 薄膜系统最大翘曲度随 GaN 膜厚的变化情况。(a) 2 inch 衬底;(b) 4 inch 衬底

Fig. 10 Variation of the maximum warpage of film system with the thickness of GaN film. (a) 2 inch substrate; (b) 4 inch substrate

统最大翘曲度先增加到一个极大值,后缓慢减小。温度越高,翘曲变形就越大。薄膜系统从生长温度 1373 K 降至室温 300 K 时,2 inch 薄膜系统的最大翘曲度为 356 μm,发生在 GaN 膜厚度约 275 μm 处;4 inch 薄膜系统的最大翘曲度为 872 μm,发生在 GaN 膜厚度约 450 μm 处。值得注意的是,薄膜系统界面应力极大值点与薄膜系统最大翘曲度对应的 GaN 膜厚相同。在此附近区间内,界面应力越大,翘曲度就越大。

#### 4.5 晶格失配与热失配的影响

为了计算因晶格失配引起的应力,在室温下沿着蓝宝石 *c* 向([0001])引入一个虚拟冷却过程来产生晶格失配应变  $\Delta\epsilon_c = 16.1\%$ <sup>[6]</sup>。在这种情况下,薄膜的热膨胀系数为  $\alpha_{fc} = \Delta\epsilon_c / \Delta T$ ,  $\Delta T$  为虚拟温差。如图 11 所示,在降温冷却的过程中,由于晶格失配产生的应力要远远大于因热失配产生的应力。

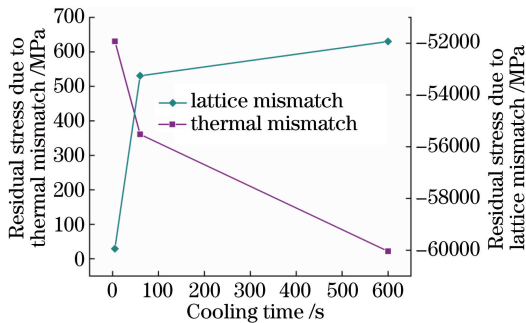


图 11 晶格失配、热失配产生的应力随冷却时间的变化

Fig. 11 Change of stress caused by lattice mismatch and thermal mismatch with cooling time

在这个过程中,热应力逐渐减小,表现为拉应力,晶格失配应力也逐渐变小,表现为压应力。

## 5 结 论

对蓝宝石-氮化镓异质膜系统的界面应力进行

有限元模拟分析,研究了从生长温度(1373 K)降到室温(300 K)过程中系统界面应力的分布情况及其影响因素,并通过理论计算验证了所建模型的合理性。有限元计算结果显示:当不考虑边缘效应,分别只改变 GaN 膜厚或蓝宝石衬底厚度时,薄膜系统界面应力随之变化且均存在极大值和极小值。计算结果进一步表明,薄膜系统界面应力极大值发生在蓝宝石衬底厚度与 GaN 膜厚度之比  $d_s/d_f \approx 1.5$  处,极小值发生在  $d_s/d_f \approx 4.3$  处,说明薄膜系统界面应力大小不仅仅取决于热膨胀系数的差异或温差,受膜厚比的影响也很大。因此,蓝宝石衬底与 GaN 膜厚度不同时,因各自材料性质不同,薄膜系统膜层内部应力的演化和层与层间的应力传递可能存在着一定的变化规律。模拟还发现,由于晶格失配产生的应力远远大于因热失配产生的应力。

## 参 考 文 献

- [1] Chung K, Lee C H, Yi G C. Transferable GaN layers grown on ZnO-coated graphene layers for optoelectronic devices [J]. Science, 2010, 330 (6004): 655-657.
- [2] Zhang S, Shi J J, Zhang M, et al. First-principles investigation on optical properties of GaN and InGaN alloys[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(49): 495304.
- [3] Taniyasu Y, Kasu M, Makimoto T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres[J]. Nature, 2006, 441(7091): 325-328.
- [4] Moridi A, Ruan H H, Zhang L C, et al. A finite element simulation of residual stresses induced by thermal and lattice mismatch in thin films [C] // Seventh International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and Their Applications, July 4, 2011, Milan. [S.l.]: [s. n.],

- 2011: 57.
- [5] Pramanik A, Zhang L C. Residual stresses in silicon-on-sapphire thin film systems [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(9): 1290-1300.
- [6] Moridi A, Ruan H H, Zhang L C, et al. Residual stresses in thin film systems: effects of lattice mismatch, thermal mismatch and interface dislocations[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(22/23): 3562-3569.
- [7] Li C A, Yang M D, Quan B Q, et al. Stress simulation analysis of multilayer film deposition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 043101.  
李长安, 杨明冬, 全本庆, 等. 多层薄膜沉积的应力仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 043101.
- [8] Dong W, Zuo R, Lai X H, et al. Simulation of stresses in GaN thin film on sapphire[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 073101.  
董位, 左然, 赖晓慧, 等. 蓝宝石基 GaN 薄膜的热应力模拟分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 073101.
- [9] Freund L B, Suresh S. Thin film material: stress, formation of defect and evolution of surface[M]. Lu L, Tao N R, Zhang G P, et al. Beijing: Science Press, 2007: 49.  
Freund L B, Suresh S. 薄膜材料——应力、缺陷的形
- 成和表面演化[M]. 卢磊, 陶乃镛, 张广平, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2007: 49.
- [10] Zhang R. Thermal stress distribution for GaAs directly grown on patterned silicon [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2018.  
张然. 图形衬底 Si 基 GaAs 材料热应力分布[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [11] The tension of metallic films deposited by electrolysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1909, 82(553): 172-175.
- [12] Zhang L, Shao Y L, Hao X P, et al. Comparison of the strain of GaN films grown on MOCVD-GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  and MOCVD-GaN/SiC samples by HVPE growth[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 334(1): 62-66.
- [13] Zhang L, Mahdi M. The plastic behaviour of silicon subjected to micro-indentation [J]. *Journal of Materials Science*, 1996, 31(21): 5671-5676.
- [14] Labbane M, Saha N K, Ting E C. Yield criterion and loading function for concrete plasticity [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1993, 30(9): 1269-1288.
- [15] Hull R. Properties of crystalline silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 89(8): 4349-4353.
- [16] Flinn P A. A new X-ray diffractometer design for thin-film texture, strain, and phase characterization [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1988, 6(6): 1749-1755.