

Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究

张俊, 张为国

Micro-LED laser lift-off research of GaN on AlN of sapphire substrate

引用本文:

张俊, 张为国. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 25-31.

---

您可能感兴趣的其他文章

1. 266nm纳秒固体激光在CH薄膜上打孔的工艺实验研究

引用本文: 齐立涛, 刘凤聪. 266nm纳秒固体激光在CH薄膜上打孔的工艺实验研究[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 767-772.

2. 纳秒脉冲激光加工高反射率铝膜

引用本文: 吴鹏, 范云茹, 郭嘉伟, 等. 纳秒脉冲激光加工高反射率铝膜[J]. 激光技术, 2019, 43(6): 779-783.

3. 毫秒/纳秒激光致碳纤维环氧树脂损伤形貌研究

引用本文: 姜珊珊, 蔡继兴, 金光勇, 等. 毫秒/纳秒激光致碳纤维环氧树脂损伤形貌研究[J]. 激光技术, 2018, 42(6): 775-779.

4. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试

引用本文: 李勇军, 邹建, 甘泉露, 等. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试[J]. 激光技术, 2017, 41(6): 803-806.

5. 室温下的主动锁模Ho:YAG激光器

引用本文: 王吉, 王涛. 室温下的主动锁模Ho:YAG激光器[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 840-842.

文章编号: 1001-3806(2023)01-0025-07

## Micro-LED 蓝宝石衬底 AlN 上 GaN 激光剥离研究

张 俊, 张为国

(上海微电子装备(集团)股份有限公司, 上海 201203)

**摘要:** 为了比较分析纳秒激光和皮秒激光剥离微型发光二极管(micro-LED)时 AlN 上 GaN 的热传导效果, 采用了改进的实时紫外光吸收和热传导的激光剥离理论模型进行计算分析的方法, 取得了在不同的激光波长、激光脉冲宽度、激光能量密度下的紫外波段光辐照时和停止辐照后 GaN 材料热场分布等数据, 并获得了适合 micro-LED 器件剥离的所用纳秒激光和皮秒激光的阈值条件。结果表明, 激光脉宽、激光波长、激光能量密度是实现激光剥离工艺的关键因素; 较适合的激光波长为 209 nm~365 nm 的紫外波段; 皮秒激光的剥离效果优于纳秒激光, 且激光的脉冲宽度越短, 激光的波长越短, 剥离所需激光脉冲阈值能量也越低, 则对 LED 芯片区域的热影响也越小。该研究可为开发新型激光剥离设备和相关工艺应用提供重要参考。

**关键词:** 激光技术; 激光剥离; 仿真; 微型发光二极管; 皮秒激光

**中图分类号:** TN249; V261.8 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.01.004

## Micro-LED laser lift-off research of GaN on AlN of sapphire substrate

ZHANG Jun, ZHANG Weiguo

(Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract:** In order to compare laser lift-off thermal conductive effects by nanosecond laser and picosecond laser in GaN on AlN of micro light-emitting diode(micro-LED), an improved theoretical model of laser lift-off process for real-time ultraviolet light absorption and heat conduction was established. This model was used to calculate and analysis the thermal field distribution of GaN materials irradiated by various ultraviolet, laser pulses with different laser wavelength, laser pulse width, laser energy density. And the threshold conditions suitable for micro-LED devices of laser lift-off process by nanosecond laser and picosecond laser were obtained. The results show that laser pulse width, laser wavelength, and laser energy density are the key factors of laser lift-off process. The suitable laser wavelength includes 209 nm~365 nm ultraviolet band, and the laser lift-off effect of picosecond laser is better than that of nanosecond laser. Moreover, the shorter the pulse width and the shorter the wavelength of laser, the lower the threshold energy of laser pulse is needed for lift-off, and the smaller the thermal impact on the LED chip area. This research provides an important reference for the development of new laser lift-off equipment and related process applications.

**Key words:** laser technique; laser lift-off; simulation; micro-LED; picosecond laser

### 引 言

宽禁带 III-V 族半导体材料在高温、高功率条件下具有优良特性, 被广泛的应用于微电子和光电子器件之中<sup>[1]</sup>。采用金属有机化学气相沉积技术在蓝宝石衬底( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )上生长 GaN 外延材料并制造蓝光发光二极管(light-emitting diode, LED)器件是目前应用最广泛的技术手段之一。但是, 直接在蓝宝石上制作发光

器件的驱动电路的技术并未成熟或成本高昂, 因此需要将发光器件设法转移到具备驱动电路的衬底之上。激光在材料加工上已有广泛应用, 包括激光刻蚀和激光切割<sup>[2-3]</sup>等, 而利用激光剥离技术可以将 LED 发光器件从蓝宝石衬底转移到其它衬底上。激光剥离的原理为: 具有特定波长的激光透过蓝宝石衬底, 被蓝宝石界面附近表层 GaN 所吸收, 使得界面处的 GaN 缓冲层材料受热分解为  $\text{N}_2$  和 Ga, 从而达到将 GaN 外延层从蓝宝石衬底上分离的目的<sup>[4]</sup>。

近期, 随着迷你 LED(mini-LED)和微型 LED(micro-LED)的兴起, 需要大批量将蓝光 LED 器件从蓝宝石上剥离并转移到显示屏背板, 激光剥离技术正成为最佳的剥离技术之一<sup>[5-7]</sup>。对于不少 micro-LED 产品,

作者简介: 张 俊(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事泛半导体装备研究, 包括集成电路装备、平板显示装备、LED 制造装备等。

E-mail: zhangj@smee.com.cn

收稿日期: 2022-02-16; 收到修改稿日期: 2022-05-23

为了进一步减少晶格失配,在蓝宝石和 GaN 中间,有较薄的 AlN 缓冲层,厚度范围为 10 nm~1 μm,多数情况小于 30 nm;AlN 熔点高于蓝宝石的熔点,热传导性能较好,带隙介于蓝宝石和 GaN 之间<sup>[8-10]</sup>。

本文中对 micro-LED 所采用的 sapphire/AlN/GaN 结构,建立了更完善的紫外脉冲激光剥离和热传导理论模型,通过前人的实验结果对特定波长的剥离条件下的计算结果作了验证,进而采用模型分析了在不同波长、脉冲宽度和能量密度的紫外激光辐照条件下 GaN 材料的热场分布,得到紫外脉冲激光辐照所需阈值能量密度,可作为设备开发或工艺调试的定量参考。

## 1 数学建模

### 1.1 波长的选择

目前常见的剥离前 LED 或 micro-LED 结构如图 1 所示<sup>[11-12]</sup>。

GaN:Mg P-contact	90 nm
AlGaIn:Mg	10 nm
GaN spacer	3 nm~12 nm
GaInN/GaN MQW	7 nm
GaN:Si N-contact	1 μm
GaN buffer	2 μm
GaN nucleation or AlN	25 μm
sapphire substrate	330 μm

图 1 激光剥离前发光二极管结构  
Fig. 1 LED structure before laser lift-off

图中,蓝宝石带隙为 9.9 eV, GaN 为 3.39 eV, AlN 为 6.2 eV。激光剥离原理为利用光子能量大于 GaN 带隙而小于蓝宝石和氮化铝带隙的短波长激光,从蓝宝石一侧开始辐照,激光透过蓝宝石及氮化铝后,被表层 GaN 强烈吸收;表层 GaN 发生热分解,生成氮气和金属镓,因为镓的熔点仅约 30 ℃,所以氮气随之逸出,进而可通过机械力实现 GaN 外延层与蓝宝石衬底的分离。

根据光子能量的公式,可计算出满足上述条件的较佳激光波长应为以下范围:125 nm < 209 nm ≤ λ ≤ 365 nm。如图 2 所示,根据 GaN 的吸收系数分析,大于 365 nm 波长的光吸收系数较小于 365 nm 波长的光吸收系数显著下降,光辐照深度显著加大,2 μm ~ 3 μm 深度的 GaN:Si 和发光层多重量子阱(multiple quantum well, MQW)等的热损伤的风险增大。因此,

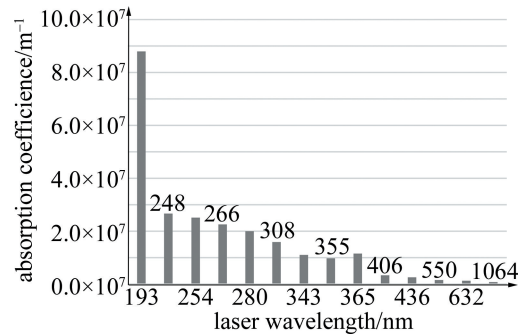


图 2 GaN 材料的激光吸收系数

Fig. 2 Absorption coefficient of laser in GaN

本文中采用满足较佳波长条件的 248 nm/266 nm/308 nm/355 nm 等紫外光作为典型激光来分析。

### 1.2 紫外光在材料中传播

建立的物理模型如图 3 所示。紫外光先穿透固定厚度的蓝宝石片及 AlN, 然后再辐照进入到 GaN 内, 在 GaN 很薄的范围内传播并大部分被 GaN 吸收。在光斑辐照面积内, GaN 材料温度场沿水平平面可以认为是均匀分布的, 并且由光斑边缘向非辐照区域的散热很小可以忽略; 沿深度方向的温度分布决定了激光剥离关键参数的选取<sup>[13]</sup>。为了简化问题, 本文中建立了 1 维的模型来分析激光剥离关键参数近似值。

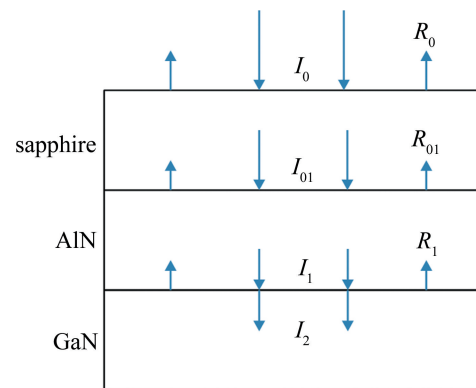


图 3 材料中激光传播示意图

Fig. 3 Laser transmission in materials

如图 3 所示,紫外光垂直入射厚度为 330 μm 蓝宝石,按光衰减模型, sapphire-AlN 交界面的入射光强为:

$$I_{01} = I_0(1 - R_0) \exp(-a_0 x_0) \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为激光到达蓝宝石上方的光强,  $I_{01}$  为辐照在蓝宝石材料内的光强,  $R_0$  为空气-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 交界面反射率,  $a_0$  为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光衰减系数,  $x_0$  为在材料内传播的路径总长度。

同理,如图 3 所示, AlN-GaN 交界面的入射光强为:

$$I_1 = I_{01}(1 - R_{01})\exp(-a_{01}x_{01}) \quad (2)$$

式中,  $R_{01}$  为 AlN-GaN 交界处反射率,  $a_{01}$  为 AlN 光衰减系数,  $x_{01}$  为光在 AlN 内传播的路径长度。

依次类推, 在 GaN 表面的光照穿透 GaN 厚度  $x$  处的光强为:

$$I = I_2 \exp(-a_1 x) \quad (3)$$

式中,  $a_1$  为 GaN 光衰减系数,  $x$  为光在 GaN 内传播的路径长度。设  $I_1$  为入射 AlN-GaN 交界面的光强,  $R_1$  为 GaN 和 AlN 表面反射率, 则  $I_2$  定义为出射 AlN-GaN 交界面的光强:

$$I_2 = I_1(1 - R_1) \quad (4)$$

### 1.3 紫外光辐照时热传导过程

紫外光穿透蓝宝石和氮化铝并进入到氮化镓材料中, 并对氮化镓进行激光加工。需要指出的是, AlN 的热导率和结构紧密相关, 薄膜 AlN 的热导率仅为  $3.19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 比热导率为  $130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  的 GaN 显著低<sup>[12]</sup>, 所以在 GaN 热分解时可近似为隔热层; 同时 AlN 的厚度一般相比于热导率也较低的蓝宝石 ( $23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 的厚度显得比较小, 为了简化起见, 本文中近似将蓝宝石和 AlN 薄层一起等效为隔热层, 并作为边界条件之一重点分析热在 GaN 材料中的传导。

如图 4 所示, GaN 材料的厚度为  $L$ , 根据热传导的 Fourier 定律<sup>[14]</sup>, 单位时间内通过垂直方向的单位面积的热量  $q (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$  和温度的空间变化率成正比, 因此:

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

式中,  $\kappa$  为 GaN 材料导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T$  为温度,  $dx$  为如图 4 中垂向小线元长度。

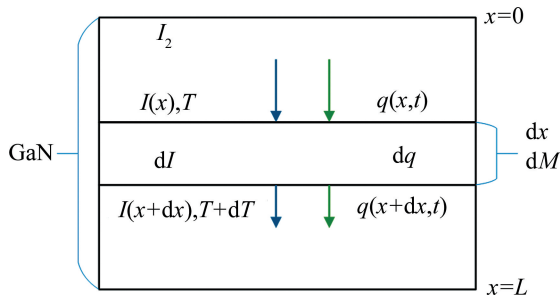


图 4 热传导模型示意图

Fig. 4 Heat transmission in materials

根据比热容公式, 在  $Sdx$  体积元内, 物体内能的变化  $dQ = cdMdt$ , 其中  $dM$  为该体积元的质量,  $S$  为该体积元垂直光传播方向的光照面积,  $dx$  为该体积元沿光传播方向的长度。根据热力学第一定律, 该体积元的内能变化  $dQ$  应该等于其热量  $q$  的变化及所吸收的光

能, 则有:

$$\begin{aligned} dQ &= cdMdt = cpSdxdT = \\ &[q(x) - q(x + dx)]Sdt + \\ &[I(x) - I(x + dx)]Sdt \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $c$  为 GaN 材料比热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $\rho$  为 GaN 材料密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $I(x, t)$  为光辐照在 GaN 材料内的光强 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $S$  为垂直  $x$  方向的光照面积 ( $\text{m}^2$ );  $T(x, t)$  为  $t$  时刻在深度  $x$  处的温度, 简称为  $T$ ,  $dT$  为此处温度变化。进一步推导有:

$$cpdxdT = -\frac{dq}{dx}dxdt - \frac{dI}{dx}dxdt \quad (7)$$

$$cp \frac{dT}{dt} = -\frac{dq}{dx} - \frac{dI}{dx} \quad (8)$$

根据(5)式, 将  $q$  对  $x$  的导数代入(8)式, 得到初步的光照热传导模型为:

$$cp \frac{dT}{dt} = \kappa \frac{d^2T}{dx^2} - \frac{dI}{dx}, (0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_1) \quad (9)$$

根据(3)式, 将  $I$  对  $x$  的导数代入(9)式, 进一步得到展开的光照热传导模型为:

$$\begin{aligned} cp \frac{dT}{dt} &= \kappa \frac{d^2T}{dx^2} + I_2 a_1 \exp(-a_1 x), \\ &(0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_1) \end{aligned} \quad (10)$$

这就是本文中建立的光持续照射下的热传导模型。其中  $t_1$  为光持续照射的时间长度。设初始温度为  $T_0$ , 则初始条件为:

$$T(x, 0) = T_0, (0 \leq x \leq L) \quad (11)$$

GaN 材料对紫外光尤其是  $248 \text{ nm} \sim 355 \text{ nm}$  范围的光是强烈吸收的, 一般  $100 \text{ nm}$  内将  $70\% \sim 90\%$  以上的光吸收, 所以在相对较深的位置, 比如  $x \geq 3 \mu\text{m}$  深处, 光的吸收比较少, 温度变化也比较少。需要确保  $x \geq L$  深度温度不宜过高, 以免影响发光层, 设这个允许的最高温度为  $T_0'$ , 则求解(10)式后应有:

$$T(L, t) \leq T_0', (0 \leq t \leq t_1) \quad (12)$$

根据前面的分析, 蓝宝石和薄膜 AlN 的导热性能显著差于 GaN, 光照射时, 大部分转化的热能向 GaN 方向传导, 因此, 为了方便求解, 近似有以下绝热的边界条件:

$$q \Big|_{x=0} = -\kappa \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (13)$$

### 1.4 无光照冷却时间

如图 5 所示, 实际设备中, 一般采用脉冲激光辐照, 不采用连续激光的原因是容易热传导损伤到发光层。其中,  $I_2$  为 AlN 及 GaN 交界面的出射光强,  $0 \sim t_1$

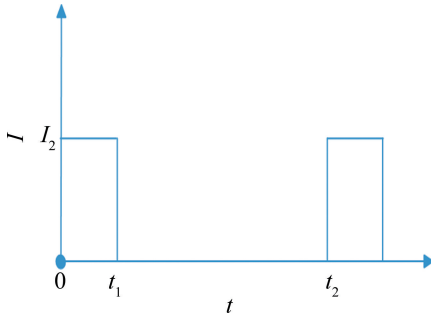


图5 光辐照示意图

Fig. 5 Light irradiation sketch

为光辐照时间,  $t_1 \sim t_2$  为无光辐照冷却时间。

当光照辐射  $t_1$  时间后停止, 此时 GaN 会冷却, 一直到  $t_2$  时间后重新加热。此冷却过程无热源, 但仍可采用(10)式的有光照条件下的热传导模型, 只需令其中的光照光强  $I_2=0$ , 有:

$$cp \frac{dT}{dt} = \kappa \frac{d^2T}{dx^2}, (0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_1) \quad (14)$$

这就是本文中无光照条件下的热传导模型。初始条件为:

$$T(x, t_1) = T_1(x, t_1), (0 \leq x \leq L) \quad (15)$$

式中,  $T_1(x, t_1)$  为光照停止时候的  $t_1$  时间点的温度场分布。

同理, 将蓝宝石和 AlN 近似为绝热, 且足够深处近似常温, 则边界条件同(12)式和(13)式。

需要指出的是, 本文中所推导的模型及其后续求解和传统文献的模型<sup>[15]</sup>有所不同。该模型在有光照时, 将每个深度位置的吸收的光能转化为实时热源, 而不是简单简化为表面的热源或作瞬时热源; 本模型在热传导方程中增加了一项  $-dI/dx = I_2 a_1 \exp(-a_1 x)$ , 此项包含位置变量  $x$ ; 而无光照的时候此项为 0。因为本模型及其后续求解可实时分析各处光吸收和热传导过程, 所以本模型更贴近真实情况。

## 2 数值计算

### 2.1 计算方法

有多种方法求解<sup>[16-17]</sup>, 比如采用向后差分法或 Crank-Nicolson 法求解, 解是稳定的。具体向后差分求解方法如下, 求解过程中, 每次差分迭代时都应充分考虑每个位置当前时间点光吸收和热传导的影响。

为了差分求解(10)式和(14)式, 参考图4, 将厚度为  $L$  的 GaN 材料平均分为  $m$  份, 每份厚度为  $\Delta x$ , 沿着光传播方向, 依次标记为第  $i$  份 ( $i=0, 1, \dots, m-1$ )。参考图5, 将  $0 \sim t_2$  时间段平均分为  $n'$  份, 每份时

长为  $\Delta t$ , 依次标记为第  $j$  份 ( $j=0, 1, \dots, n-1, n, n+1, \dots, n'-2, n'-1$ ), 其中  $0 \sim t_1$  时间段对应为第  $0 \sim n-1$  份, 每份时长也为  $\Delta t$ 。

对于有光照条件下的热传导过程求解 ( $0 \sim t_1$  时间段), 参考(10)式, 对方程进行隐式差分近似求解, 有:

$$cp \frac{T(i, j+1) - T(i, j)}{\Delta t} = \kappa \frac{T(i+1, j+1) - 2T(i, j+1) + T(i-1, j+1)}{\Delta x^2} + I_2 a_1 \exp[-a_1(i-1)\Delta x] \quad (16)$$

$$\text{令 } r = \frac{\kappa \Delta t}{cp \Delta x^2}, f(i, j) = \frac{\Delta t}{cp} I_2 a_1 \exp(-a_1 i \Delta x), \text{ 有:}$$

$$-rT(i-1, j+1) + (1+2r)T(i, j+1) - rT(i+1, j+1) = T(i, j) + f(i-1, j), \quad (i=1, 2, \dots, m-2; j=0, 1, \dots, n-2) \quad (17)$$

初始条件为:

$$T(i, 0) = T_0 = 300 \text{ K}, (i=0, 1, \dots, m-1) \quad (18)$$

边界条件之一为:

$$T(1, j) - T(0, j) = 0, (j=0, 1, \dots, n-1) \quad (19)$$

对于无光照条件下的热传导过程求解 ( $t_1 \sim t_2$  时间段), 解法和有光照热传导的解法类似, 只需参考(10)式, 令  $I_2(x, t_1 < t < t_2) = 0$ , 得到和(14)式一样的过程, 修订(17)式, 就可以采用一样差分法方法求解, 即令(17)式中:

$$f(i, j) = 0, (i=0, 1, \dots, m-1; j=n, n+1, \dots, n'-2, n'-1) \quad (20)$$

同时参考(15)式, 给出以下初始条件即可求解:

$$T(i, n) = T_1(i, n-1), (i=0, 1, \dots, m-1) \quad (21)$$

通过 MATLAB 求解该方程, 可得到下一时刻点的温度分布  $T(i, j+1)$ , 如此迭代, 可求出经过指定时间后的温度分布。需要指出的是,  $\Delta t$  和  $\Delta x$  越小, 计算结果越逼近真实。

### 2.2 计算参数

典型计算参数包括: (1) 蓝宝石厚度  $330 \mu\text{m}$ , 薄膜 AlN 厚度  $25 \text{ nm}$ , GaN 总厚度约  $3110 \text{ nm}$ ; (2) 典型固体紫外激光器波长有  $266 \text{ nm}$ 、 $355 \text{ nm}$ , 有纳秒激光和皮秒激光两种; 纳秒激光单脉冲脉宽一般为  $10 \text{ ns} \sim 100 \text{ ns}$ , 频率为  $10 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$ ; 皮秒激光单脉冲脉宽  $1 \text{ ps} \sim 30 \text{ ps}$ , 参考频率为  $100 \text{ kHz} \sim 200 \text{ kHz}$ ; (3) 典型准分子紫外气体激光器波长包括  $248 \text{ nm}$  和  $308 \text{ nm}$ , 一般都为纳秒激光, 纳秒激光单脉冲脉宽  $10 \text{ ns} \sim 100 \text{ ns}$ , 参考频率为  $100 \text{ Hz} \sim 600 \text{ Hz}$ ; (4) 初始温度为室温

23 °C;最佳的剥离温度大于 GaN 的溶解温度,约为 1050 °C;(5) 蓝宝石片反射系数  $R_0 = 0.09$ ; 蓝宝石片光衰减系数  $a_0 = 130.48 \text{ m}^{-1}$ ; GaN 和蓝宝石表面反射率  $R_1 = 0.033$ ; GaN 光衰减系数  $a_1 = 2.24 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。

### 3 结果与讨论

采用本文中的模型,对典型纳秒激光(波长 248 nm、脉宽 30 ns、频率 500 Hz、单脉冲能量密度 360 mJ/cm<sup>2</sup>)的工况进行计算,得到脉冲辐照时的 GaN 不同深度的温度变化如图 6 所示。计算结果表明,GaN 上表面温度可达到 1050 °C 以上的分解温度。激光相邻脉冲时间间隔 2 ms,无辐照时长为 1970 ns。如图 7 所示,上一脉冲停止辐照 200 ns 后,GaN 的温度就显著降低到 131 °C ~ 156 °C,停止辐照 1200 ns 后温度降低到 91 °C,停止辐照 10000 ns 后温度降低到 58 °C,而停止辐照 1970 ns 后温度恢复到常温 23 °C。因此,在下一脉冲开始辐照后,GaN 的温度变化近似重复,如图 6 所示(此时忽略少量 GaN 被分解等因素的影响)。

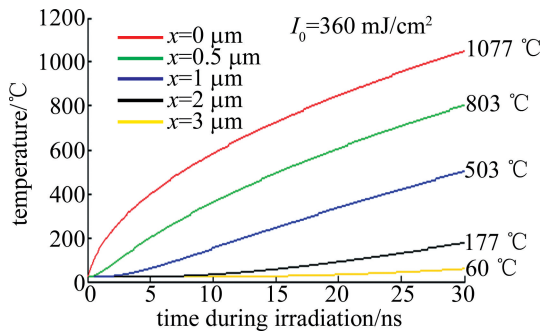


图 6 248 nm 波长、30 ns 脉宽的纳秒激光器辐照时 GaN 不同深度温度变化

Fig. 6 Temperature variation in GaN during irradiation by nanosecond pulsed laser of 248 nm wavelength and 30 ns pulse width

对常见的纳秒脉冲激光分析发现,脉宽越短,在一定的激光功率条件下,其对应的激光的峰值功率也就会越高,在相对较低的能量密度下可以满足剥离工艺要求;同时,脉宽越短,根据热影响深度<sup>[18]</sup>  $x \propto \sqrt{\alpha}$  (其中  $\alpha$  为脉冲宽度),其向  $x$  方向的热扩散影响越小,从而对器件底层的热影响越小。不同波长和脉宽的纳秒激光模拟分析结果如图 8 所示。计算表明,对于 248 nm 激光波长,所需单脉冲阈值能量为 350 mJ/cm<sup>2</sup> ~ 500 mJ/cm<sup>2</sup>,才能实现 GaN 表面达 1050 °C 的分解温度,这些和参考文献中的实验数据结果基本一致<sup>[19]</sup>,从而对模型计算结果的准确性做了验证,实验条件和仿真调节有所差异是导致细微差别的主要原因。根据分析,脉宽 100 ns 和脉宽 30 ns 比脉宽 10 ns 的 248 nm

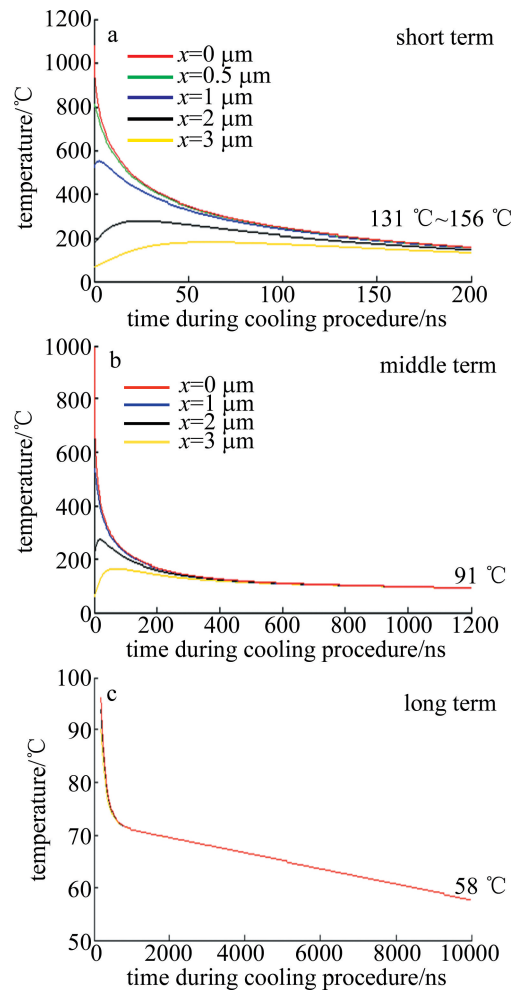


图 7 248 nm 波长、30 ns 脉宽的纳秒激光器辐后 GaN 不同深度温度变化

Fig. 7 Temperature variation in GaN after irradiation by nanosecond pulsed laser of 248 nm wavelength and 30 ns pulse width

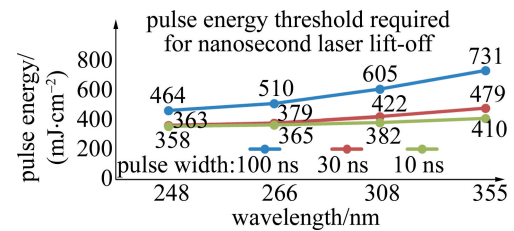


图 8 GaN 表面温度达 1050 °C 时,各波长纳秒激光器所需的单脉冲能量阈值

Fig. 8 Pulse energy threshold required for GaN surface temperature reaching 1050 °C at various wavelengths of nanosecond laser

激光单脉冲阈值能量需分别提高 106 mJ/cm<sup>2</sup> 和 5 mJ/cm<sup>2</sup>,才能实现良好的激光剥离,因此,在激光剥离中,短脉宽的纳米激光能量利用效率比长脉宽的纳米激光更高。同时,长波激光脉冲比短波激光脉冲的能量利用率低,例如,对于 266 nm、308 nm 和 355 nm 波长的 30 ns 脉宽激光的单脉冲能量,分别需要相对 248 nm 激光提高 14 mJ/cm<sup>2</sup>、40 mJ/cm<sup>2</sup>、69 mJ/cm<sup>2</sup>,才能实现

有效的激光剥离效果。需要指出的是,由于 GaN 具有一定的厚度,仅一个脉冲无法达到良好的激光剥离效果,往往需要多个脉冲,比如对于采用 248 nm 激光来分解 400 nm~1200 nm 厚度 GaN,参考需要 10~30 个脉冲<sup>[20]</sup>。

采用本文中的模型,对典型皮秒激光(266 nm 波长、30 ps 脉宽、频率为 100 kHz、单脉冲能量密度为 39 mJ/cm<sup>2</sup>)的工况进行计算,得到脉冲辐照时的 GaN 不同深度的温度变化,如图 9 所示。计算结果表明,GaN 上表面温度可达到 1050 °C 以上的分解温度;激光相邻脉冲时间间隔 10 μs,无辐照时长为 9999.970 ns。如图 10 所示,上一脉冲停止辐照 5 ns 后,GaN 上表面温度就显著降低到 40 °C,停止辐照 50 ns 后,温度降低到 24 °C 接近室温。因此,在下一脉冲开始辐照时,GaN 的温度变化近似重复,如图 9 所示。

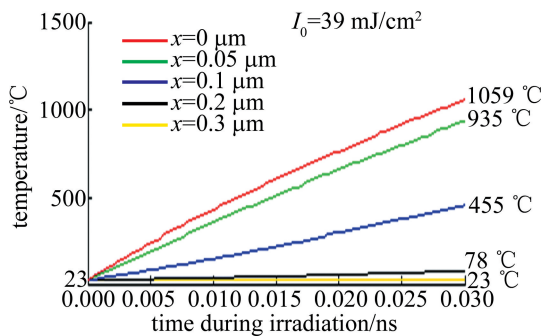


图 9 266 nm 波长、30 ps 脉宽的皮秒激光器辐照时 GaN 不同深度温度变化

Fig. 9 Temperature variation in GaN during irradiation by picosecond pulsed laser of 266 nm wavelength and 30 ps pulse width

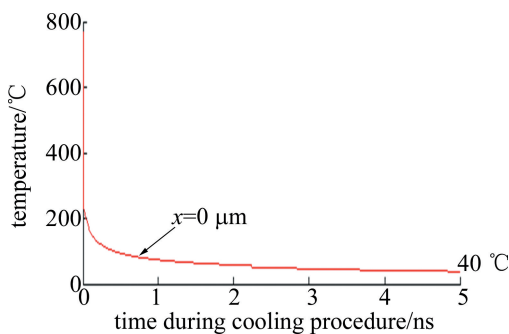


图 10 266 nm 波长、30 ps 脉宽的纳秒激光器辐照后 GaN 表面温度变化

Fig. 10 Temperature variation in GaN after irradiation by picosecond pulsed laser of 266 nm wavelength and 30 ps pulse width

不同波长和脉宽的皮秒激光的分析结果如图 11 所示。对于 266 nm 波长激光,要实现 GaN 表面温度达 1050 °C,采用脉宽 30 ps 的激光比脉宽 10 ps 和 1 ps 的激光的单脉冲阈值能量分别需提高 3 mJ/cm<sup>2</sup> 和

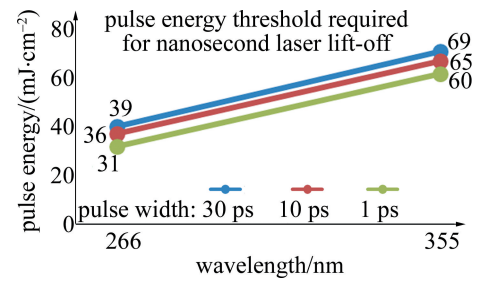


图 11 GaN 表面温度达 1050 °C 时,各波长皮秒激光器所需的单脉冲能量阈值

Fig. 11 Pulse energy threshold required for GaN surface temperature reaching 1050 °C at various wavelengths of picosecond laser

8 mJ/cm<sup>2</sup>,对于 355 nm 波长激光,则分别需提高 4 mJ/cm<sup>2</sup> 和 9 mJ/cm<sup>2</sup>,因此短脉宽的激光的能量利用率更高。此外,266 nm 波长激光比 355 nm 波长激光所需的单脉冲阈值能量要显著低,比如 30 ps 脉宽下,266 nm 波长激光单脉冲能量阈值为 39 mJ/cm<sup>2</sup>,而 355 nm 波长激光的为 69 mJ/cm<sup>2</sup>。对比图 11 和图 8 可知,在相同的波长情况下,皮秒激光所需的能量阈值低于纳秒激光的能量阈值,比如 266 nm 波长 30 ps 激光单脉冲能量阈值为 39 mJ/cm<sup>2</sup>,而 30 ns 激光单脉冲能量阈值为 379 mJ/cm<sup>2</sup>,主要原因是皮秒激光的脉宽短且峰值功率高,瞬时加热的效果比纳秒激光更好。

micro-LED 比传统 LED 更加缩微,所以更容易受到各种潜在因素的破坏。因为皮秒激光相比纳秒激光的脉宽更短,所以在相同脉冲能量及脉冲个数的情况下,其热加工的时间会更短,从而对底层结构尤其是 micro-LED 芯片发光层热影响也会更小。如图 12 所示,在一个脉冲能量作用后,在氮化镓上表面离开氮化铝交接面约 3 μm 处,采用脉宽为 10 ps 激光的热影响较小(接近处于室温状态),也即温升不明显,而采用脉宽为 10 ns 的激光有较大的温升,主要原因是后者激光辐照的时间相对较长;同时,纳秒激光的热影响深度也比皮秒激光大,从而说明使用皮秒激光器进行加工的工艺窗口大于纳秒激光器。在实际应用过程中,还需注意脉冲数目,即在激光照射过程,GaN 材料接收

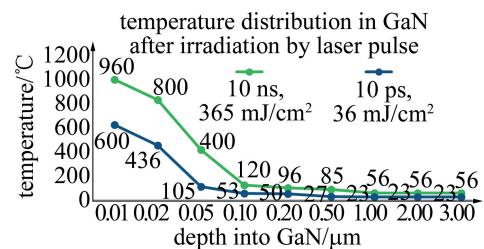


图 12 纳秒激光与皮秒激光作用后(降温)不同深度热影响

Fig. 12 Thermal effects of nanosecond laser and picosecond laser at different depths

到的激光脉冲数量影响;当激光脉冲频率较低,在下一个脉冲到来之前,前一个激光脉冲造成的温度梯度已逐渐趋近于常温。综上分析,皮秒激光的激光剥离预计比纳秒激光剥离对 LED 芯片的潜在破坏会更少,从而也更适合用来做 micro-LED 的激光剥离。

## 4 结 论

将脉冲激光视为面热源,对 LED 激光剥离 sapphire/AlN/GaN 建立热传导模型,分析了 GaN 外延层内的热场分布计算,结果表明,激光剥离的关键参数为脉冲激光脉宽、能量密度和激光波长,在波长 248 nm~355 nm 的紫外波段范围内,脉宽越短、波长越短,剥离所需脉冲阈值能量也越低,剥离时对芯片的热影响会越小;同等条件下,采用皮秒激光剥离比纳秒激光更好。基于以上分析结果,可实现工艺窗口宽、良率高的激光剥离设备工艺,为工业应用提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] HWANG D, MUGHAL A, PYNN C, *et al.* Sustained high external quantum efficiency in ultrasmall blue III-nitride micro-LEDs [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(3): 1-5.
- [2] YANG F L, YUAN G F, LI H. Study on laser etching of sapphire assisted by dissimilar metal oxides [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(6): 756-761 (in Chinese).  
杨富理, 袁根福, 李浩. 异种金属氧化物辅助激光刻蚀蓝宝石的研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 756-761.
- [3] BIAN X W, CHEN M, LI G. Study on machining of sapphire by 355 nm nanosecond and 1064 nm picosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051404 (in Chinese).  
边晓微, 陈檬, 李港. 355 nm 纳秒和 1064 nm 皮秒激光加工蓝宝石研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051404.
- [4] ISABEL A P S, MATHIVATHANI S. Fabrication of GaN LED's by wafer bonding and lift-off techniques [J]. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2015, 5(3): 232-247.
- [5] CHAO W X. Recent progress of micro LED mass transfer method [J]. *Video Engineering*, 2021, 45(9): 107-114 (in Chinese).  
曹文贤. Micro LED 巨量转移技术的研究进展[J]. *电视技术*, 2021, 45(9): 107-114.
- [6] MARINOV V R. Laser-enabled extremely-high rate technology for  $\mu$ LED assembly [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 692-695.
- [7] JI H L, ZHANG P P, CHEN N J, *et al.* Micro LED display: Recent progress and future challenge [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1102-1110 (in Chinese).  
季洪雷, 张萍萍, 陈乃军, 等. Micro-LED 显示的发展现状与技术挑战[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1102-1110.
- [8] XU X H, WU H Sh, ZHANG F Q, *et al.* Studies of structure and surface roughness of AlN thin films [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, 29(6): 394-397 (in Chinese).  
许小红, 武海顺, 张富强, 等. 氮化铝薄膜结构和表面粗糙度的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(6): 394-397.
- [9] BAI J, WANG T, PARBROOK K B, *et al.* A study of dislocations in AlN and GaN films grown on sapphire substrates [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 282(3/4): 290-296.
- [10] GOBLER C, BIERBRAUER C, MOSER R, *et al.* GaN-based micro-LED arrays on flexible substrates for optical cochlear implants [J]. *Journal of Physics*, 2014, D47(20): 1-6.
- [11] DELMDAHL R, PAETZEL R, BRUNE J. Large-area laser-lift-off processing in microelectronics [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41(30): 241-248.
- [12] HAO Ch L. Manufacturing and specification research of AlN thin films [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 6-7 (in Chinese).  
郝春蕾. 氮化铝薄膜的制备与性能研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 6-7.
- [13] WANG T, GUO X, LIU B, *et al.* Transient temperature field study of GaN material in laser lift-off technique based on finite element method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1295-1299 (in Chinese).  
王婷, 郭霞, 刘斌, 等. 基于有限元分析法的激光剥离技术中 GaN 材料瞬态温度场研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1295-1299.
- [14] LI Ch, QIAN Sh W, ZHANG L Y. Thermodynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 36-37 (in Chinese).  
李椿, 钱尚武, 章立源. 热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 36-37.
- [15] WANG T, GUO X, LIU B, *et al.* Temperature field simulation of GaN material during  $Al_2O_3$ /GaN laser lift-off [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(3): 102-103 (in Chinese).  
王婷, 郭霞, 刘斌, 等. 激光剥离  $Al_2O_3$  中 GaN 材料温度场的模拟[J]. *光电工程*, 2006, 33(3): 102-103.
- [16] FENG L W. A comparison of numerical solutions of several difference schemes for heat conduction equation by MATLAB [J]. *Journal of Shenyang University of Chemical Technology*, 2011, 25(2): 179-182 (in Chinese).  
冯立伟. 热传导方程几种差分格式的 MATLAB 数值解法比较[J]. *沈阳化工大学学报*, 2011, 25(2): 179-182.
- [17] TAO Y Y. Crank-Nicolson method for solving heat conduction equation [J]. *Journal of Zaozhuang University*, 2012, 29(5): 4-8 (in Chinese).  
陶燕燕. 求解热传导方程的 Crank-Nicolson 方法[J]. *枣庄学院学报*, 2012, 29(5): 4-8.
- [18] HUANG Sh R, LIU B L. Temperature distribution analytical calculation for the laser lift-off of GaN/ $Al_2O_3$  Material [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(7): 831-834 (in Chinese).  
黄生荣, 刘宝林. 激光剥离 GaN/ $Al_2O_3$  材料温度分布的解析分析[J]. *光电子激光*, 2004, 15(7): 831-834.
- [19] FANG Y, GUO X, WANG T, *et al.* Transferring GaN film from sapphire to cu substrate by laser lift-off [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 62-65 (in Chinese).  
方圆, 郭霞, 王婷, 等. 激光剥离技术实现 GaN 薄膜从蓝宝石衬底移至 Cu 衬底[J]. *激光与红外*, 2007, 37(1): 62-65.
- [20] LIN F, CHEN Zh Y, LIU B L, *et al.* Study on laser lift off of GaN material in low pressure [J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(12): 156-159 (in Chinese).  
林飞, 陈志远, 刘宝林, 等. 低压下激光剥离的研究[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(12): 156-159.