

激光剥离 GaN/Al₂O₃ 材料温度分布的解析分析*

黄生荣**，刘宝林

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要:分析了脉冲激光作用下 GaN 的衬底剥离过程。利用简化的一维模型,给出一种比较直观的脉冲激光辐照下 GaN/Al₂O₃ 材料温度分布的解析形式,得到了分界面温度和脉冲宽度的关系。表明,单脉冲作用下分界面的温度与加热时间的平方根成正比,并得出脉冲过后随着深度变化温度梯度的分布。在连续脉冲作用时,分界面的温度呈锯齿状不断升高。

关键词:激光剥离; GaN; 温度分布

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2004)07-0831-04

Temperature Distribution Analytical Calculation for the Laser Lift-off of GaN/Al₂O₃ Material

HUANG Sheng-rong**, LIU Bao-lin

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The process of laser lift-off of GaN thin films from substrates was analysed. A temperature distribution analytical calculation form of the GaN/Al₂O₃ material irradiated by pulsed laser was presented under one dimension, and the temperature calculation form of different interface was obtained. The results show that the temperature of interface is in proportion to the square root of time when the material is irradiated by single pulse laser, however, it increases saw-like when the material is irradiated by continuous pulse laser.

Key words: laser lift-off; GaN; temperature distribution

1 引言

近年来 GaN 基光电器件的研究吸引了人们极大的关注,这是因为它在高密度存储、高速读取数据及全色彩屏显示等方面有重要应用^[1,2]。然而长期以来,由于缺乏理想的衬底材料,通常选用 Al₂O₃ 衬底^[3]。但是 Al₂O₃ 本身硬度高,解理较为困难;同 GaN 材料的热膨胀系数存在较大的差异^[4];热导率和电导率很低。Al₂O₃ 衬底的低电导率要求器件电极必须制作在器件顶部,这种构造使大功率器件封装复杂化,并且引入了寄生电阻,升高了开启电压^[5]。

利用薄膜剥离技术结合芯片粘结技术,将 GaN 与其它材料结合在一起剥离 Al₂O₃ 衬底,可以消除以上限制^[6~8]。当一束脉冲激光通过透明的 Al₂O₃ 衬底照射到 GaN 薄膜上,被界面层的 GaN 吸收,导致界面层温度升高,当温度达到 900 左右时 GaN 就

会分解^[9],使得 GaN 外延层与 Al₂O₃ 衬底分离。W. S. Wong 等人^[10]利用能量密度为 400 mJ/cm²,脉冲宽度为 38 ns 的 KrF 激光器对 GaN 样品进行衬底剥离,分界面的温度达到 900 左右,成功地剥离了 Al₂O₃ 衬底。本文就衬底剥离这一过程进行理论分析,利用简化的一维模型,给出了一种比较直观简洁的 GaN/Al₂O₃ 材料温度解析表达形式,得到了分界面温度与脉冲宽度的关系以及脉冲过后随着深度变化的温度梯度分布,同时得到连续脉冲作用时分界面的温度变化情况。

2 理论分析

激光照射进行衬底剥离的原理如图 1 所示。激光束照射在衬底表面一部分被反射,一部分透过 Al₂O₃ 衬底在分界面处被 GaN 吸收。采用一维近式,即样品受到均匀照射。另外,由于 Al₂O₃ 衬底的导热

收稿日期:2003-07-28 修订日期:2004-03-09

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60276029);福建省自然科学基金资助项目(A0210006)资助项目

** E-mail :sammy8715@yahoo.com.cn

性很差,则可以当作一维半空间的情况来处理^[11]。照射时间短时,GaN内温度下降梯度很大,近似认为GaN为无限厚。

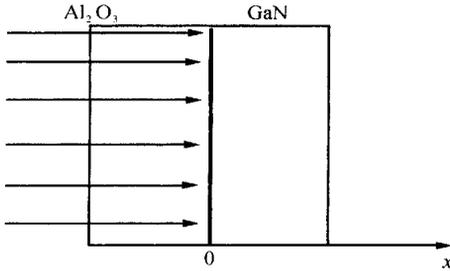


图1 激光衬底剥离示意图
Fig.1 The scheme of laser lift off

2.1 热传导方程的解

先求瞬时热源无限大物体的导热问题,然后再推广到半空间连续热源作用的情况。为简化计算,作温度坐标平移 $T(x, t) = T(x, t)' + T_0$ (其中 T_0 为室温,假定它为0),即温度坐标由绝对温度转变为摄氏温度。对于无限大物体一维非稳态热问题,其数学描述可表示为^[12]

$$k \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = c_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$$

$$(t > 0, -\infty < x < \infty)$$

$$T(x, 0) = 0 \quad T(\infty, t) = 0 \quad (t > 0) \quad (1)$$

式中: k 为热传导系数; c_p 为比热; ρ 为材料的密度。令 $B = k / c_p \rho$ 可得

$$T(x, t) = \frac{B}{2\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4t}} \quad (2)$$

式中, B 为常数。由式(2)得到

$$T(x, t) dx = B \quad (3)$$

根据能量守恒可知,在 $t=0, x=0$ 处传入物体的能量 Q 既不能消失又不会增加,而应在 $t>0$ 的各个时刻保持不变。在 $t>0$ 的任一时刻,物体内部所积累的热量 Q 应为

$$Q = c_p \int_0^\infty T(x, t) dx \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得 $B = Q / c_p$ 。由此,称 B 为热脉冲发热强度,又称热源强度。当 $Q = 1 J / m^2$ 时, $B = 1 / c_p$ 称为单位热源强度。所以

$$T(x, t) = \frac{Q}{2 c_p \sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4t}} \quad (5)$$

2.2 连续热源作用一维半空间问题

瞬时作用的集中热源法分析,仅适用于作用时间 ($t=0$) 的情形。推广到连续热源作用一维半空间的情形,激光照射的能量密度为

$$I = I_0(t) (1 - R) \quad (t > 0) \quad (6)$$

其中: $I_0(t)$ 为激光器输出能量密度; R 为反射率。由于为半空间传播,则热源强度 B 为

$$B = \frac{Q}{c_p} = 2 I_0 (1 - R) d$$

则温度分布函数为

$$T(x, t) = \frac{2 I_0 (1 - R)}{2 c_p \sqrt{t}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t - \tau}} e^{-\frac{x^2}{4(t - \tau)}} d\tau = \frac{2 I_0 (1 - R)}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4t}} \right] - \frac{x}{2\sqrt{t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right) \quad (7)$$

3 结果与讨论

由式(7),在 $x=0$,即分界面上,温度为

$$T(0, t) = \frac{2 I_0 (1 - R)}{k} \sqrt{t} \quad (8)$$

式(8)表明,分界面温度与加热时间的平方根成正比。即作用时间越长,温度越高。图2为分界面温度和激光脉冲宽度之间的关系,所用参数由表1给出^[13]。由图2可知,随着脉冲宽度增加和激光器的能量密度增加,分界面温度逐渐升高。对于给定能量的激光脉冲,当增加能量密度时,脉冲持续时间即加热时间缩短,同时分界面的温度也会升高。就是说,使用峰值功率高、脉冲宽度小的激光脉冲可以更有效地加热界面。由图可知,脉冲宽度为38 ns,能量密度为400 mJ/cm²的激光脉冲作用时,分界面的温度达到990,与W. S. Wong等人^[10]的试验结果符合得很好。

表1 GaN材料和Al₂O₃的热力学系数

Tab.1 Thermodynamics coefficient of GaN and Al₂O₃

Material	$\rho / (10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$d / (10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	R
Al ₂ O ₃	3.98	23.0	763.7	43.72	0.3
GaN	6.11	130	486.7	7.57	

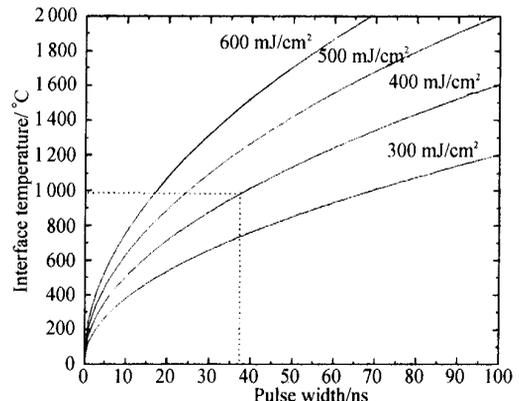


图2 分界面温度与脉冲宽度的关系

Fig.2 Interface temperature vs laser pulse width

同样由式(7)可知,热穿透深度为 $b = \sqrt{4t}$ 。取 $t = 38 \text{ ns}$ 时,此时可得到 GaN 内温度分布的情况,如图3示。由图可见, $b = 2.58 \times 10^{-6} \text{ m}$,表明1个脉冲结束后在离界面 $2.58 \times 10^{-6} \text{ m}$ GaN 材料中的温度下降到很低;在 $4.00 \times 10^{-6} \text{ m}$ 处的温度接近于零,这表明在远离界面处温度没有明显升高;加热时间较短在 GaN 材料表面处的温度梯度很小,即和空气的热交换很少,这表明假设材料无限厚是合理的。

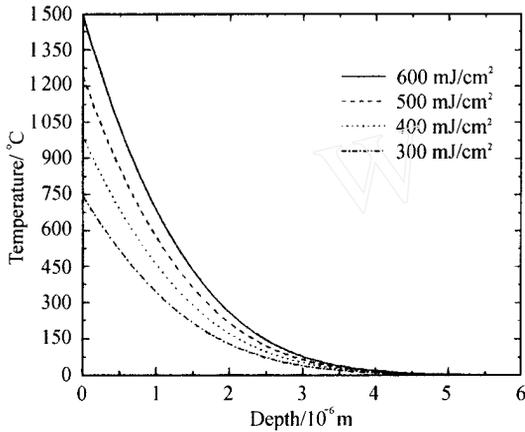


图3 GaN材料内温度分布

Fig.3 The temperature distribution in GaN material

而对于衬底而言,分界面的温度由式(8)决定,可得衬底内的温度分布为

$$T_s(x, t) = \frac{-xI_0(1-R)\sqrt{\text{GaN}}}{k_{\text{GaN}}\sqrt{\text{Al}_2\text{O}_3}} \frac{1}{\sqrt{t}} \exp\left[-\frac{x^2}{4\text{Al}_2\text{O}_3(t-\tau)}\right] \quad (x < 0) \quad (9)$$

衬底温度下降速度更快,加热时间较短时温度分布由式(9)决定,传入衬底的热量相对于传入 GaN 的热量比较少,则传入衬底的热量忽略不计,能量近似被 GaN 完全吸收。脉冲激光作用后,传入 GaN 的热量和传入衬底的热量之比约为 2.4,表明这种理论计算存在一定的误差。

如果照射材料的是矩形激光脉冲,假设占空比为 $1/n$,即 $0 < t - D/n, I_0(t) = I_0; D/n < t < D, I_0 = 0$,其中 D 为激光脉冲的周期。当 $0 < t - D/n$ 时,分界面温度由式(8)给出。当 $D/10 < t < D$,材料分界面的温度为

$$T(0, t) = \frac{2I_0(1-R)}{k} \sqrt{[t - \sqrt{t - D/n}]} \quad (10)$$

取 $D = 380 \text{ ns}$,占空比为 $1/10$,由式(10)可得第1个周期内激光脉冲作用后分界面温度随时间下降的情况,如图4示。从图可以看到,随着时间的增加温度下降,刚开始时温度下降得较快,随着时间延长渐渐趋于稳定,温度

变化缓慢。

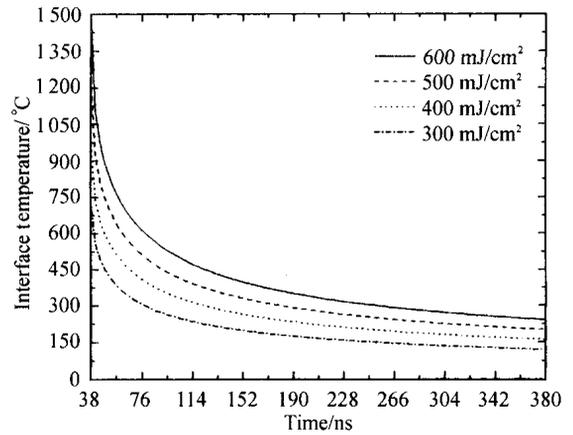


图4 第1个周期内激光脉冲作用后分界面温度随时间变化情况

Fig.4 Interface temperature vs. time in the first pulse cycle after the pulse acted on material

由式(8)、(10)可得,连续脉冲作用时,材料分界面的温度为

$$T(0, t) = \frac{2I_0(1-R)}{k} \sqrt{[t - (N-1)D]} + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{2I_0(1-R)}{k} \sqrt{[t - (n-1)D - \sqrt{t - (n-1)D - D/n(N-1)D}]} \quad (11)$$

$$T(0, t) = \sum_{n=1}^N \frac{2I_0(1-R)}{k} \sqrt{[t - (n-1)D - \sqrt{t - (n-1)D - D/n(N-1)D + D/n}]} \quad t < ND \quad (12)$$

同样,取 $D = 380 \text{ ns}$,占空比为 $1/10$,由式(11)、(12)可得到分界面温度和照射材料的脉冲激光照射时间之间的关系,如图5示。

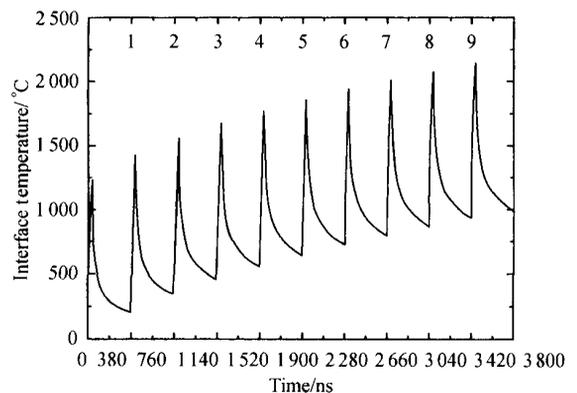


图5 分界面温度和照射材料的脉冲激光照射时间之间的关系

Fig.5 Interface temperature vs time of irradiation

从图5可以看到,当脉冲激光作用时,分界面的温度升高,脉冲间隙时温度下降;在连续脉冲作用下,分界面的温度呈锯齿状不断升高,随着时间的增加,分界面温度的增加越来越趋于缓慢;当加热时间较长时,则Ga_N层厚度不能当作无穷大,GaN材料升高到一定温度后吸收的热量和对流散发到空气中的热量保持一种平衡,温度不会再持续升高。

4 结 论

如何快速完整地将Ga_N薄膜从衬底上剥离下来,选择合适的能量密度和脉冲宽度的激光器是至关重要的。本文利用一维半空间的近似条件给出了一种比较直观的Ga_N/Al₂O₃材料内的温度分布解析表达形式,并对结果进行了讨论,指出了做一维半空间近似的可行性,得到了分界面温度的表达形式。分析结果表明,单脉冲作用时,分界面的温度与加热时间的平方根成正比,脉冲过后随着时间的增加,温度下降,刚开始时温度下降得较快,随着时间延长渐渐趋于稳定,温度变化缓慢;连续脉冲作用时,分界面的温度呈锯齿状不断升高。本文的结果可以用于选择合适的激光器进行Ga_N/Al₂O₃材料衬底剥离,以及对激光剥离过程中具体时刻分界面的温度以及材料内的温度分布情况进行理论预测。

参考文献:

- [1] Liang Chunguang, Zhang Ji. GaN dawn of 3rd Generation Semiconductors[J]. Chinese Journal of Semiconductor, 1999, 20(2): 89-99. (in Chinese)
- [2] GUO Zr-zheng, LIANG Xi-xia, BAN Shi-liang. Type- excitonic characteristics of the GaN/ GaAlN wide quantum well[J]. J of Optoelectronics · Laser (光电子·激光), 2002, 13(12): 1303-1306. (in Chinese)
- [3] Nakamura S, Senoh M, Mukai T. High-power InGa_N/ GaN double heterostructure violet light emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62: 2390-2393.
- [4] Lester S D, Ponce F A, Craford M G, et al. High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting

- diodes[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66: 1249-1251.
- [5] Yablonoitch E, Sands T, Hwang D M, et al. Van der Waals bonding of GaAs on Pd leads to a permanent, solid phase-topotaxial, metallurgical bond[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59: 3159-3161.
- [6] Wong W S, Cho Y, Weber E R, et al. Structural and optical quality of GaN/metal/ Si heterostructures fabricated by excimer laser lift-off [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(13): 1887-1889.
- [7] Xu J, Zhang R, Wang Y P, et al. Preparation of large area free-standing GaN by laser lift-off technology[J]. Materials Letters, 2002, 56: 43-46.
- [8] Wong W S, Sands T, Cheung N W, et al. Fabrication of thin film InGa_N light-emitting diode membranes by laser lift-off[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(10): 1360-1362.
- [9] Sands T, Wong W S, Cheung N W. Laser lift-off of gallium nitride from sapphire substrates[R]. Final Report 1998-1999 for MICRO Project, 98-133.
- [10] Wong W S, Kruger J, Cho Y, et al. Selective UV-laser processing for lift-off of GaN thin films from sapphire substrates[A]. In: Proceedings of the Symposium on LED for Optoelectronic Applications and the 28th State of the Art Programs on Compound Semiconductors[D]. 1998. 377.
- [11] Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Laser-Beam Interactions with Materials Physics [M]. Beijing: China Machine Press, 25-34. (in Chinese)
- [12] Ozisik M N. Heat Conduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983. 26-40. (in Chinese)
- [13] Liu L, Edgar J H. Substrates for gallium nitride epitaxy [J]. Materials Science and Engineering, 2002, 37: 61-127.

作者简介:

黄生荣 (1978-),男,硕士研究生,主要从事Ga_N基材料和发光器件的研究。