

纤锌矿 GaN 外延层薄膜热膨胀行为的变温 Raman 散射研究

王党会 许天旱 宋海洋

Thermal expansion behaviors of epitaxial film for wurtzite GaN studied by using temperature-dependent Raman scattering

Wang Dang-Hui Xu Tian-Han Song Hai-Yang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 130702 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.130702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分子束外延生长的 1.05 eV InGaAsP 的超快光学特性研究

[Study on photoluminescence properties of 1.05 eV InGaAsP layers grown by molecular beam epitaxy](#)

物理学报.2015, 64(17): 177802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177802>

InGaN/GaN 多量子阱结构发光二极管发光机理转变的低频电流噪声表征

[Research on emission transition mechanisms of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes using low-frequency current noise](#)

物理学报.2015, 64(5): 050701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050701>

表面态调控对 GaN 荧光光谱的影响

[Effects of controlled surface states on the photoluminescence emission of GaN film](#)

物理学报.2014, 63(13): 137802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137802>

氮化镓基蓝光发光二极管伽马辐照的 1/f 噪声表征

[1/f noise characterization gamma irradiation of GaN-based blue light-emitting diode](#)

物理学报.2013, 62(14): 140703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.140703>

氮化镓基发光二极管结构中粗化 p 型氮化镓层的新型生长方法

[A new growth method of roughed p-GaN in GaN-based light emitting diodes](#)

物理学报.2011, 60(9): 098107 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.098107>

纤锌矿 GaN 外延层薄膜热膨胀行为的变温 Raman 散射研究*

王党会[†] 许天旱 宋海洋

(西安石油大学材料科学与工程学院, 西安 710065)

(2016 年 1 月 22 日收到; 2016 年 4 月 1 日收到修改稿)

本文对纤锌矿结构 GaN 外延层薄膜的热膨胀行为进行了研究, 结合热膨胀系数的物理意义与变温 Raman 散射时声子频移的变化规律, 研究了热膨胀系数与变温 Raman 散射之间的关系. 结果表明: 通过测量 Raman 声子 $E_2(\text{high})$, $A_1(\text{TO})$ 和 $E_1(\text{TO})$ 频移与温度之间的线性关系, 结合相应声子 Gruneisen 参数的涵义, 可对纤锌矿结构 GaN 外延层薄膜在一定温度范围内的热膨胀系数进行测量. 本文提供了一种表征纤锌矿结构 GaN 外延层薄膜热膨胀行为的有效方法, 为进一步研究 III 族氮化物外延层薄膜在生长过程中热膨胀系数的匹配、降低外延层薄膜中的位错密度并提高发光二极管的发光效率提供了理论依据.

关键词: 外延层薄膜, 热膨胀系数, Gruneisen 参数, 变温 Raman 散射

PACS: 07.50.Hp, 81.15.Kk, 78.55.Cr, 71.55.Eq

DOI: 10.7498/aps.65.130702

1 引言

III 族氮化物二元及多元合金材料体系以其具有在 0.7—6.2 eV 之间直接、连续可调的宽禁带特性, 是实现固体发光 (solid-state lighting, SSL) 的理想材料, 也是实现半导体发光二极管 (light-emitting diode, LED)、太阳能光伏 (solar photovoltaic, PV)、激光二极管 (laser diode, LD) 和各种紫外探测器的关键材料. 组分可调的 GaN 基多量子阱结构 (multiple quantum well, MQW) 成为制作 LED 发光活性区的关键材料, 也是 LED 和太阳能光伏发光活性区的最佳选择^[1-5]. 由于与太阳光的光谱范围 (0.4—4.0 eV) 非常匹配, 因而高亮度可见光 LED 在全色显示、高亮度白光体照明工程、太阳能光伏产业和节能减排等领域内具有非常广阔的应用前景和商业价值.

LED 发光以其具有亮度高、寿命长、发光稳定

和绿色节能等特点, 是一种非常理想的光源. 获得高亮度、低成本的白光 LED, 取决于发光活性区中 InGaN/GaN MQW 中的结晶质量、位错密度量级、LED 的量子效率和制作工艺的水平等因素.

由于缺乏大尺寸本征衬底材料的缘故, GaN 薄膜一般通过异质外延的方式 (例如金属有机化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)、分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE)) 生长在其他衬底上, 这些衬底包括蓝宝石、SiC 和 Si 等. 与衬底材料之间较大的晶格失配和热膨胀系数失配是导致 III 族氮化物外延层薄膜中存在较高线位错密度 (数量级约为 $10^8/\text{cm}^2$)、较高面位错密度 (数量级约为 $10^5/\text{cm}$) 的主要原因. 在 LED 器件的发光过程中, 这些位错、点缺陷以及杂质中心等能级中形成了深能级缺陷, 具有俘获载流子的作用, 以非辐射复合 (如俄歇复合等) 的方式消耗了载流子, 进而影响发光二极管的内量子效率. 虽然研究者通常采用常规的两步法、缓

* 陕西省自然科学基金项目 (批准号: 2015JM6327)、陕西省教育厅科学研究计划 (批准号: 2016JK1593)、西安石油大学博士科研启动基金 (批准号: Z14086)、西安石油大学材料加工工程重点学科 (批准号: YS32030203) 和陕西省大学生科研创新训练项目资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wdhyxp@163.com

冲层法、成核层(低温加高温成核层法)法^[6]、超晶格层^[7]和图形化衬底^[8](patterned sapphire substrate, PSS)等方法来降低外延层薄膜中的位错密度,然而对于 GaN 热膨胀行为和规律研究的文章较少. 众所周知,在 III 族氮化物外延层薄膜的生长过程中,温度是非常重要的影响因素之一,从生长 GaN 缓冲层开始的 500 °C 左右,到生长 GaN 外延层的 1025 °C,其间温度变化范围较大,各种材料在温度变化中的热膨胀现象存在差异,因此,研究 GaN 外延层薄膜中的热膨胀行为非常重要.

采用热膨胀仪测试 GaN 外延层薄膜热膨胀系数中存在诸多的弊端: 1) GaN 材料硬度高,脆性大,难以做成条状/标准试样; 2) GaN 的热膨胀系数小,因而在升温过程中,体积膨胀引起的尺寸增加效应较小,难以精确测量; 3) 最重要的是, GaN 材料多采用异质外延的生长方式,其薄膜材料的厚度一般很小(厚度为 430 μm 的蓝宝石衬底,加上缓冲层/成核层等,外延生长 GaN 薄膜样品的厚度一般为 600 μm 左右),而且这种层状结构将会对测量结果产生不利的影响.

Raman 散射提供了材料内部晶格振动的信息,它以非弹性散射的方式来表征材料的物质组成、晶体质量、残余应力大小以及自由载流子浓度的数目. 晶体缺陷、晶粒变小、无定形结构和晶体中的残余应力都会使 Raman 频移的峰值发生偏移、峰加宽以及峰对称形状的改变. 不同温度下 Raman 声子峰的行为包含了材料内部原子振动产生的光学格波的信息. 基于 Raman 散射中所蕴含的大量信息,很多研究者,均对变温 Raman 频移与温度之间的关系进行了研究. 例如,文献[9—11]采用 Raman 散射的方法,研究了 GaN 外延层薄膜和 In-GaN/GaN LED 中的应变信息;文献[12,13]研究了非极性 a 面 GaN 外延层薄膜在不同温度下 Raman 频移与生长方向上的应变关系;文献[14—16]采用了线性、二阶和三阶等模型对变温 Raman 频移与温度之间的关系进行拟合,研究了 Raman 声子发生劈裂的机理. 根据固体物理的知识,从原子振动的角度来理解,材料的热膨胀现象属于晶格振动的非谐效应,而体积的变化与光学格波之间的关系可用 Gruneisen 参数来表征,Gruneisen 参数是一个对温度变化不敏感的常数,数值在 1—2 之间. 因而可以通过对 GaN 外延层薄膜进行变温 Raman 散射测试,实现对其热膨胀系数的测量.

2 实验

GaN 外延层薄膜样品结构如图 1 所示,采用常规的生长工艺,将低温加高温 AlN 成核层技术和缓冲层技术结合起来. 实验以三乙基镓(TEGa)、三甲基铝(TMAI)和氨气(NH_3)作为金属源气体, H_2 作为载气. 首先在蓝宝石衬底上低温生长一层厚度约为 12 nm 厚的低温 AlN 成核层,生长温度为 660 °C;然后升温至 1100 °C,继续生长一层厚度约为 210 nm 厚的高温 AlN 成核层;降温至 550 °C,在高温 AlN 成核层上生长一层厚度约为 20 nm 的 GaN 缓冲层;最后升高温度至 1025 °C,生长一层厚度约为 200 nm 左右的 GaN 外延层. 采用 Labram HR 800 激光共聚焦拉曼光谱仪,变温台型号为 Linkam-Examina-THMS 600. 采用液氮作为冷却介质,变温范围从 83—503 K,步长设定为 52.5 K,精度控制在 0.1 K 以内,激光光源采用波长为 514.5 nm 的 Ar^+ 激光器进行测试,在 $x(yy)\bar{x}$ 偏振模式下,测量 GaN 外延层薄膜中声子振动模式 $E_2(\text{high})$ 的频移值. 在正式测试之前,首先要对仪器参数进行校准. 选择好配套的光栅后,通过硅单晶主峰的位置(520 cm^{-1})来对光栅的零点位置进行校准,校准完成之后即可进行采谱测量. 测量结束后可通过仪器自带软件进行数据处理,先剪掉基线,然后通过洛伦兹和高斯混合函数对数据进行拟合,从而得出峰位和半高宽的信息.

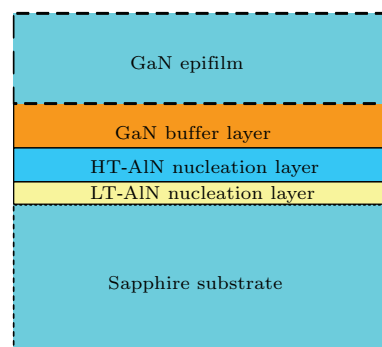


图 1 实验用 GaN 外延层薄膜结构示意图

Fig. 1. Cross-Section structure of GaN epitaxial film for experimental.

3 实验结果与讨论

3.1 理论基础

物体的体积或长度随温度的升高而增大的现象称为热膨胀,用线膨胀系数和体膨胀系数来表

示. 线(体)膨胀系数指温度升高 1 K 时物体的长度(体积)的相对增加. 表达式如下:

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad \alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}, \quad (1)$$

式中 L, V 分别表示材料在 T 温度时的长度和体积. 通常采用平均膨胀系数表示材料的膨胀系数:

$$\begin{aligned} \overline{\alpha_L} &= \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{L_T - L_0}{L_0(T - T_0)}, \\ \overline{\alpha_V} &= \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_T - V_0}{V_0(T - T_0)}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 L_0, V_0, L_T, V_T 分别表示材料在 T_0, T 温度时的长度和体积. 这样材料在温度为 T 时的长度和体积如下:

$$L_T = L_0(1 + \overline{\alpha_L} \Delta T), \quad V_T = V_0(1 + \overline{\alpha_V} \Delta T). \quad (3)$$

在使用平均膨胀系数时, 要特别注意使用温度范围. 无机非金属材料的线膨胀系数一般较小, 约为 $(10^{-5}—10^{-6}) \text{ K}^{-1}$. 各种金属和合金在 $0—100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的线膨胀系数也为 $(10^{-5}—10^{-6}) \text{ K}^{-1}$, 钢的线膨胀系数多在 $(10—20) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 范围.

Gruneisen 参数 γ_j 的定义^[17,18]如下:

$$\gamma_j(q) = -\frac{d[\ln \omega_j(q)]}{d \ln V} = -\frac{V}{\omega_j(q)} \cdot \frac{d\omega_j(q)}{dV}. \quad (4)$$

从(4)式可知, Gruneisen 参数表征了体积的变化对第 j 个格波(或者振动模式)声子频率的影响, Gruneisen 参数无量纲, 其值可正可负. 许多研究者对 Gruneisen 参数的特点和物理意义进行了研究, 例如, Song 等^[19]认为 Gruneisen 参数对温度变化不敏感; Gorczyca 等^[20]基于自洽线性全势能轨道法, 计算了纤锌矿结构 AlN 和 GaN 的 Gruneisen 参数. Li 等^[21]结合这些 Gruneisen 参数, 提出了纤锌矿结构 GaN 外延层薄膜 Raman 声子劈裂与耦合的 3-声子模型和 4-声子模型, 与实验结果符合得很好. 事实上, GaN 外延层薄膜的 Gruneisen 参数随温度变化确实不大, 一般在 1—2 之间.

根据(4)式可知: $\omega_j = \omega_0(V/V_0)^{-\gamma_j}$, 式中 j 为声子类型, ω_0 为声子本征频移(即绝对 0 K 时的频移), ω_j 为声子频移. 根据定义可知, Gruneisen 参数表征了体积的变化引起 Raman 散射声子峰频移的改变, 而体积的变化中包含了与热膨胀相关的行为和信

息. 根据体膨胀系数的公式 $V(T) = V_0(1 + 3\alpha\Delta T)$ 可知:

$$\omega = \omega_0(V/V_0)^{-\gamma} = \omega_0(1 + 3\alpha\Delta T)^{-\gamma}, \quad (5)$$

(5) 式中 α 为热膨胀系数, 其值一般很小, 典型值的数量级约为 $10^{-5}—10^{-6}/\text{K}$. 故:

$$\omega = \omega_0(1 + 3\alpha T)^{-\gamma} \approx \omega_0(1 - 3\alpha\gamma T), \quad (6)$$

(6) 式中 γ 为 Gruneisen 参数. 通过(6)式可以看出, 一定温度范围内 Raman 声子频移与温度的关系中包含材料热膨胀系数 α 的信息. 对(6)式进行线性拟合, 提取关系式中的截距 ω_0 和斜率 $-3\omega_0\alpha\gamma$, 然后根据 Gruneisen 参数 γ , 计算出热膨胀系数 α 的值. 本文采用最小二乘法分别对三种声子模式下的 ($E_2(\text{high})$, $A_1(\text{TO})$ 和 $E_1(\text{TO})$) ω 和温度之间的关系进行线性拟合, 分别如图 2、图 3 和图 4 所示, 拟合结果及计算出来的热膨胀系数如表 1 所列.

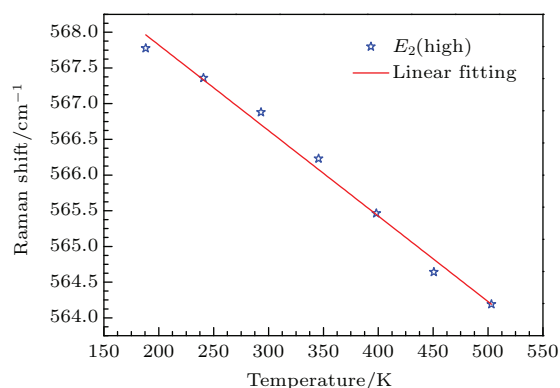


图 2 GaN 样品变温 Raman 散射 $E_2(\text{high})$ 声子频移与温度之间的关系

Fig. 2. Relationship between $E_2(\text{high})$ phonon shift and temperature for GaN epilim using temperature-dependent Raman scattering.

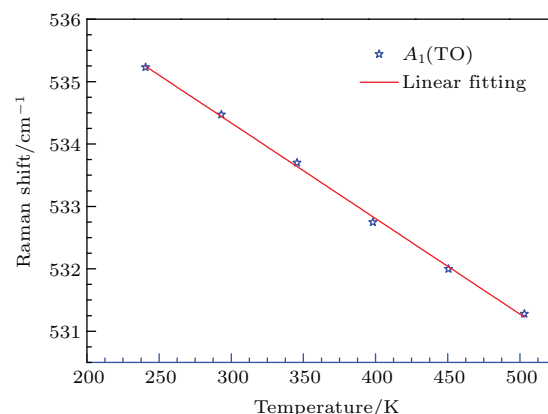


图 3 GaN 样品变温 Raman 散射 $A_1(\text{TO})$ 声子频移与温度之间的关系

Fig. 3. Relationship between $A_1(\text{TO})$ phonon shift and temperature for GaN epilim using temperature-dependent Raman scattering.

表1 GaN 样品变温 Raman 散射声子频移与温度之间关系的线性拟合结果

Table 1. Linear fitting results for relationships between phonon shift and temperature for GaN epilayer using temperature-dependent Raman scattering.

声子模式	ω_0/cm^{-1}	斜率 $-3\omega_0\alpha_T$	Gruneisen 参数 [10–12,20]	热膨胀系数/ K^{-1}
$E_2(\text{high})$	573.46(568.6)	−0.01104	1.50	4.28×10^{-6}
$A_1(\text{TO})$	538.93(531.8)	−0.01185	1.47	4.99×10^{-6}
$E_1(\text{TO})$	565.61(558.8)	−0.01211	1.41	5.06×10^{-6}

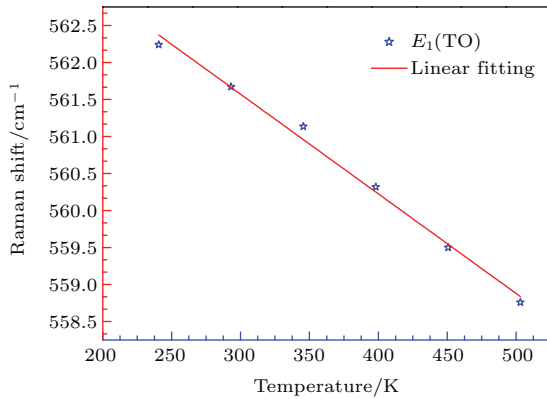


图4 GaN 样品变温 Raman 散射 $E_1(\text{TO})$ 声子频移与温度之间的关系

Fig. 4. Relationship between $E_1(\text{TO})$ phonon shift and temperature for GaN epilayer using temperature-dependent Raman scattering.

根据不同的声子类型计算得出的结果, 与 GaN 热膨胀系数的理论值 ($\alpha_a = 5.0 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\alpha_c = 4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$) [18,20,21] 非常接近, 这说明采用变温 Raman 的方法测量 GaN 外延层薄膜的热膨胀系数是可靠的, 但依然存在误差. 为了进一步分析产生误差的原因, 我们在室温下对样品进行了 Raman 散射测试, 激光波长为 514 nm, 背散射模式为 $x(yy)\bar{x}$. 测试结果如图 5 所示.

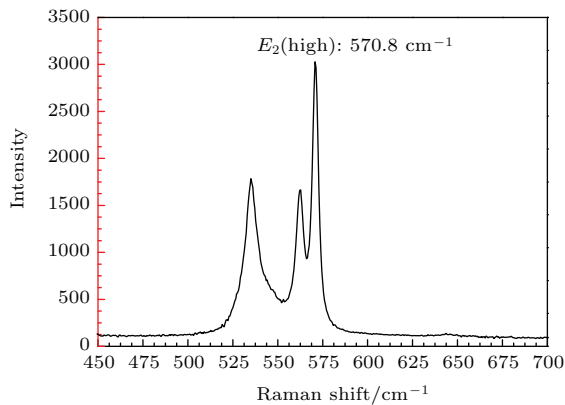


图5 室温时 GaN 外延层薄膜的 Raman 散射

Fig. 5. Raman shift recorded at room temperature for GaN epilayer.

从图 5 中可以看出, 与外延层薄膜中残余应力有关的 $E_2(\text{high})$ 的频移在 570.8 cm^{-1} , 这个值比理论值 568.6 cm^{-1} [12,20] 大, 表明在线性近似的双轴应力体系中, 外延层薄膜样品中存在着较大的压应变, 正是较大的压应变阻止了原子在温度变化时的晶格振动, 进而影响了样品的热膨胀行为; 此外, 变温 Raman 测试的冷却介质为液氮, 温度较低, 原子振动活性较低也是实验结果与理论值产生较大误差的影响因素之一.

4 结 论

本文采用了变温 Raman 散射测试, 利用 Raman 散射获得 Raman 声子频移与温度之间的关系, 通过热膨胀系数与外延层薄膜中光学格波声子在起源机理上的一致性, 结合 Gruneisen 参数的物理意义, 将二者之间的关系巧妙结合起来, 避免了一般表征方法中对样品的破坏和较为复杂的公式推导和数学计算. 能够实现对 GaN, AlN 和 InN 及其他 III 族氮化物外延层薄膜二元及多元合金体系热膨胀行为进行无损检测和表征.

参考文献

- [1] Akasaki I, Amano H, Itoh K, Koide N, Manabe K 1992 *Int. Phys. Conf. Ser.* **129** 851
- [2] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, Toyoda Y 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 353
- [3] Nakamura S, Mukai T 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 1457
- [4] Xu S R, Hao Y, Zhang J C, Jiang T, Yang L A, Lu X L, Lin Z Y 2013 *Nano Lett.* **13** 3654
- [5] Wang D H, Xu T H, Wang R, Luo S J, Yao T Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 050701 (in Chinese) [王党会, 许天早, 王荣, 雒设计, 姚婷珍 2015 物理学报 **64** 050701]
- [6] Wang D H, Hao Y, Xu S R, Xu T H, Wang D C, Yao T Z, Zhang Y N 2013 *J. Alloys Compd.* **555** 311
- [7] Xu S R, Hao Y, Zhang J C, Zhou X W, Yang L A, Zhang J F, Duan H T, Li Z M, Wei M, Hu S G, Cao Y R, Zhu Q W, Xu Z H, Gu W P 2009 *J. Cryst. Growth* **311** 3622

- [8] Zhao Y, Zhang J C, Xue J S, Xu S R, Zhou X W, Hao Y 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 110314
- [9] Liu M S, Bursill L, Prawer S, Nugent K W, Tong Y Z, Zhang G Y 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3125
- [10] Dong Y Q, Song J H, Kim H J, Kim T S, Ahn B J, Song J H, Cho I S, Im W T, Moon Y B, Hwang S M, Hong S K, Lee S W 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 043103
- [11] Lazić S, Moreno M, Calleja J M, Trampert A, Ploog K H, Naranjo F B, Fernandez S, Calleja E 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 61905
- [12] Irmer G, Brumme T, Herms M, Wernicke T, Kneissl M, Weyers M 2008 *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **19** 51
- [13] Yan Q, Rinke P, Scheffler M, van de Walle G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 2009
- [14] Correia M R, Pereira S, Pereira E, Frandon J, Alves E 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4761
- [15] Giehler M, Ramsteiner M, Waltereit P, Brandt O, Ploog K H, Obloh H 2002 *Physica B: Condens Matter* **316-317** 162
- [16] Gómez-Gómez M I, García A, de Lima M M, Daudin B, Rizzi A, Denker C, Malindretos J 2011 *Ann. Phys.* **523** 51
- [17] James P, Bernard B 2010 *Solid-State Physics: Introduction to the Theory* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag) p101
- [18] Sadao A 2005 *Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (New York: John Wiley & Sons Ltd) p83
- [19] Song S H, Jiles D C, Snyder J E, et al. 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10M516
- [20] Gorczyca I, Christensen N E, Peltzer E L, Rodriguez C O 1995 *Phys. Rev. B* **51** 11936
- [21] Li W S, Shen Z X, Feng Z C, Chua S J 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3332

Thermal expansion behaviors of epitaxial film for wurtzite GaN studied by using temperature-dependent Raman scattering*

Wang Dang-Hui[†] Xu Tian-Han Song Hai-Yang

(College of Materials Science and Engineering of Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(Received 22 January 2016; revised manuscript received 1 April 2016)

Abstract

III-nitride materials have attracted considerable attention in the last decade due to their wide applications in solid-state light devices with their direct wide band-gaps and higher quantum efficiencies. InGaN/GaN multiple quantum well is important active region for light-emitting diode, which can be tuned according to indium composition in the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloy system. Owing to difficulty in fabricating bulk materials, GaN thin films are heteroepitaxially grown on lattice-mismatched and thermal-expansion-mismatched substrates, such as sapphire (Al_2O_3), Si and SiC, which subsequently results in a mass of threading dislocations and higher residual strains. On the one hand, dislocations and defects existing in GaN epilayers trap the carriers as scattering centers in the radiative recombination process between electrons and holes, and play an important role in drooping the internal quantum efficiency. On the other hand, higher built-in electric field induced by residual strains existing in GaN epilayer could make the emission wavelength red-shifted.

It is common knowledge that temperature is one of the important factors in the growth process of epitaxial films, as a result, further research on thermal expansion behaviors is needed. Based on the above analysis, an in-depth study of thermal expansion behavior of wurtzite GaN epitaxial film is of vital importance both in theory and in application.

In this study, we investigate the thermal expansion behaviors of wurtzite GaN epitaxial films by using temperature-dependent Raman scattering in a temperature range from 83 K to 503 K. According to the physical implication, Gruneisen parameter is almost a constant (Gruneisen parameters of all phonon modes are in a range between 1 to 2 for GaN) that characterizes the relationship between the phonon shift and the volume of a solid-state material. More importantly, Gruneisen parameter is relatively insensitive to temperature and suitable for building the connection between the phonon shift and thermal expansion coefficient. Therefore, the linear relationship between the phonon shift and temperature is built and utilized to calculate the thermal expansion coefficient according to the physical implication of the Gruneisen parameter. Conclusions can be obtained as follows. 1) The thermal expansion coefficient of GaN epilayer can be calculated in a certain temperature range by measuring the phonon modes of E_2 (high), A_1 (TO) and E_1 (TO) through using temperature-dependent Raman scattering when the corresponding Gruneisen parameters are determined. 2) The calculated thermal expansion coefficients of GaN epilayer are consistent with the theoretical values.

Conclusions and methods in this paper provide an effective quantitative analysis method to characterize the thermal expansion behaviors of other III-nitride epitaxial thin films, such as AlN, InN, AlGaN, InGaN, InAlN *etc.*, which can be of benefit to reducing the dislocation density and improving the luminescence efficiency of light emitting diode. Therefore, research on thermal expansion behaviors of epilayers using temperature-dependent Raman scattering has a direction

* Project supported by the National Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2015JM6327), the Scientific Research Program of Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 2016JK1593), the Youth Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Shiyou University, China (Grant No. Z14086), the Key Subject of Materials Processing Engineering of Shaanxi Province, China (Grant No. YS32030203), and the Scientific Innovation and Training Project of College Students in Shaanxi Province, China.

[†] Corresponding author. E-mail: wdhyxp@163.com

for further studying the latter-mismatch and thermal-expansion-mismatch between the epitaxial film and substrate.

Keywords: epitaxial-film, thermal expansion coefficient, Gruneisen parameter, temperature-dependent Raman scattering

PACS: 07.50.Hp, 81.15.Kk, 78.55.Cr, 71.55.Eq

DOI: [10.7498/aps.65.130702](https://doi.org/10.7498/aps.65.130702)