

doi: 10.3788/gzxb20134202.0161

GaN 结构相变、电子结构和光学性质

李建华, 崔元顺, 陈贵宾

(淮阴师范学院 物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223001)

摘 要: 运用第一性原理平面波赝势和广义梯度近似方法, 对纤锌矿结构和氯化钠结构 GaN 的状态方程及其在高压下的相变进行计算研究, 分析相变点附近的电子态密度、能带结构和光学性质的变化机制. 通过状态方程和焓相等原理得到 GaN 从纤锌矿到氯化钠结构的相变压强分别为 43.9 Gpa 和 46.0 Gpa; 在相变的过程中, GaN 由典型的直接带隙半导体转变为间接带隙半导体材料; 氯化钠结构 GaN 相比于纤锌矿结构, 介电函数主峰值增强, 本征吸收边明显往高能方向移动, 氯化钠结构 GaN 在低能区域的光学性质差于纤锌矿结构.

关键词: 氯化镓; 相变; 电子结构; 光学性质

中图分类号: O521+.23; O471.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0161-6

Structural Phase Transition, Electronic Structures and Optical Properties of GaN

LI Jian-hua, CUI Yuan-shun, CHEN Gui-bin

(College of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huai'an, Jiangsu 223300, China)

Abstract: Equation of state and phase transformation under high pressure of two phases GaN have been calculated by means of plane wave pseudo-potential method with generalized gradient approximation. The electronic density of states, band structure and optical properties of change mechanism have been discussed near the point of phase transformation. the transition pressure of wurtzite and rock salt structure GaN is 43.9 Gpa and 46.0 Gpa by means of the equation of state and enthalpy equal principle respectively; The typical direct bandgap semiconductor of GaN became indirect bandgap semiconductor material on the structural phase transition process. Compared rock salt structure GaN with wurtzite, the main peak of the dielectric constant increases, the intrinsic absorption edge shift to high energy apparently. The optical properties of rock salt structure GaN is worse than wurtzite structure in the low energy region.

Key words: GaN; Phase transition; Electronic structures; Optical properties

0 引言

GaN 作为 III-V 半导体材料中一种重要的半导体材料, 具有禁带宽度大、介电常量小、发光效率高、耐高温、抗辐射、硬度高等特性, 在短波长光电器件、高温器件、大功率器件和高密度集成的电子器件等方面得到了广泛的应用^[1-2]. 近几十年来, 物质高压行为已引起人们的广泛关注, 晶体结构高压相变的

研究已经成为一个重要的研究领域^[3]. 尤其是激光技术、同步辐射和金刚石压砧高压技术的出现及其广泛应用, 使得人们对物质结构的高压相变机制有了更进一步的认识^[4]. 高压下 GaN 的稳定性及其相变问题已引起了人们的广泛关注. 在实验方面, Perlin 等人利用 X 射线吸收光谱方法得到纤锌矿到氯化钠结构 (也称为岩盐结构) 的相变压强为 47.0 GPa^[5]; Ueno 等人利用 X 射线衍射方法得到

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11174101) 和江苏省自然科学基金项目 (No. BK2011411) 资助

第一作者: 李建华 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为宽禁带半导体材料与器件. Email: ljh-000@163.com

通讯作者: 崔元顺 (1957-), 男, 教授, 主要研究方向为量子光学和介观物理. Email: cys571015@hytc.edu.cn

收稿日期: 2012-07-18; **录用日期:** 2012-09-03

纤锌矿到氯化钠结构的相变压强为 52.2 GPa^[6]. 在进行实验研究的同时,大量的理论研究也随之展开, Abu-Jafar 等人利用全势线性缀加平面波 (Full Potential Linearized Augmented Plane Wave, FPLAPW) 局域密度近似 (Local Density Approximation, LDA) 和广义梯度近似 (Generalized Gradient Approximation, GGA) 方法分别得到纤锌矿结构到氯化钠结构的相变压强为 38.1 GPa 和 42.3 GPa^[7]; Halsall 等人利用平面波赝势 (Plane Wave Pseudo-potentials, PWP) 局域密度近似方法得到纤锌矿到氯化钠结构的高压相变发生在 50.0 GPa^[8]; 直到最近, Saoud 等人利用平面波赝势广义梯度近似方法得到纤锌矿到氯化钠结构的相变压强为 45.0 GPa^[9]. 尽管 GaN 高压相变的性质在理论和实验上得到了大量地研究, 但迄今为止, GaN 纤锌矿到氯化钠结构的相变点压强仍存在争议, 尤其是对相变点压强附近的电子结构和光学性质的变化机制报道较少. 本文采用平面波赝势从头计算方法研究 GaN 纤锌矿到氯化钠结构相变的基本问题, 包括相变点压强、晶体结构、电子结构、光学性质等. 同时将在此基础上进一步探讨相变点附近的电子结构和光学性质的变化机制.

1 计算方法与模型

理想 GaN 为六方纤锌矿结构, 属于 P63mc 空间群, 晶格参量 $a=b=0.3189$ nm, $c=0.5185$ nm, 其中 c/a 为 1.626. 其晶胞由 Ga 的六角密堆积和 N 的六角密堆积反向套构而成. 本文计算由 CASTEP^[10] 量子力学模块完成, 在给定初始的原子排列后, 求解出系统稳定时的基态电子分布、总能量、能带结构等. 本文基于平面波赝势从头计算方法, 对纤锌矿结构 (Wurtzite, WZ) 和氯化钠结构 (Rocksalt, RS) GaN 在外界压强 (0~60 GPa) 进行几何优化和性质计算, 交换-关联能用广义梯度近似 (GGA)^[11] 来描述. 为确保计算速度并能满足足够的准确度, 本文计算时平面波截止能量 (Cutoff energy) 取 450 eV, K 网格 (K-mesh) 的大小都为 $4 \times 4 \times 4$, 保证了体系能量和构型在准完备平面波基水平上的收敛. 其自洽收敛准确度为 2.0×10^{-6} eV/

atom, 原子间相互作用力收敛标准为 0.03 eV/nm, 单原子能量的收敛标准为 2.0×10^{-5} eV/atom. 为了使计算结果稳定精确, 计算中先优化晶胞结构, 根据所得晶胞参量再优化内坐标, 最后以此为基础计算电子结构和光学性质. 参与计算的价态电子: Ga 为 $3d^{10}4s^24p^1$, N 为 $2s^22p^3$.

2 结果与讨论

2.1 GaN 的基本性质及其状态方程

对 GaN 纤锌矿和氯化钠两种结构, 我们分别选取两种结构 GaN 晶体一系列不同的晶格参量, 并通过 CASTEP 软件优化得出晶胞总能量 E 和晶胞体积 V , 然后借助 Murnaghan 状态方程^[12] 来研究 GaN 的基本性质.

$$E(V) = E_0 - \frac{B_0 V_0}{B' - 1} + \frac{B_0 V}{B'} \left[\frac{(V_0/V)^{B'}}{B'} + 1 \right]$$

式中 E_0 和 V_0 分别代表外界压强为零时每个 GaN 晶胞的总能量和体积, B_0 为外界压强为零时的体模量, B' 为体模量对压强的一阶导数 dB/dp . 两种结构 GaN 晶胞能量随体积的变化关系如图 1, 其中黑点和白点代表本文计算值, 实线代表用 Murnaghan 状态方程拟合的曲线.

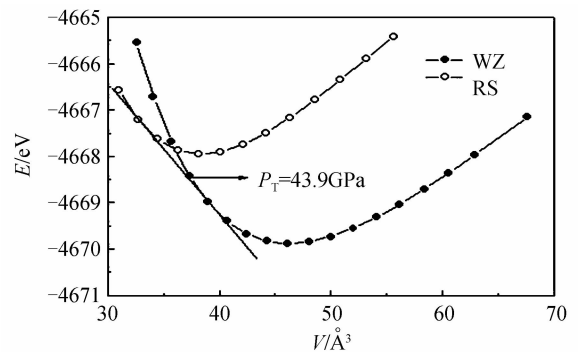


图 1 两种结构 GaN 晶胞能量与体积的关系曲线
Fig. 1 Energy and volume relationship curve of two phases GaN

表 1 中列出了 GaN 在外界压强为零时的平衡晶格常量、体变模量 B_0 以及体变模量对压强的一阶导数 B' , 从表中可以看出, 本文计算结果与实验和理论计算值符合得都较好. 将这些结果代入 Murnaghan 方程可得到两种结构在平衡状态时的状态方程.

表 1 两种结构 GaN 的理论计算值与其它计算值和实验值比较

Table 1 Theoretical and experimental value of two phases GaN

Parameters/ nm	Wurtzite phase			Rocksalt phase		
	Present work	Experiment(13)	Reference(9)	Present work	Experiment(13)	Reference(9)
$a/0.320, c/0.521$		$a/0.319, c/0.519$	$a/0.321, c/0.522$	0.425	0.401	0.425
$B_0/\text{Å}^3$	179.10	188	196.21	216.20	248	238.51
B'	3.86	3.20	4.20	4.14	5.50	4.25

2.2 GaN 从纤锌矿到氯化钠结构的相变

纤锌矿结构 GaN 的能量-体积关系曲线与氯化钠结构 GaN 的能量-体积关系曲线存在一条公切线,可以通过求这条公切线的斜率来得到这两种结构的相变压强^[12]. 利用这种方法求得相变压强值 $P_T = 43.9$ GPa(见图 1);在零温条件下,也可以通过焓相等原理得到相变压强,即 $H = E + PV$,如果两种结构的焓相等,相应的压强也相等,则 GaN 将发生结构相变. 图 2 给出了两种结构 GaN 的焓随着压强变化的关系图,从图中可以看出 GaN 从纤锌矿到氯化钠结构的相变压强值 $P_T = 46.0$ GPa. 以上两种结果与文献[5-6]实验结果 47.0 Gpa 和 52.2 Gpa 存在一定偏差,但与文献[9]的理论结果 45.0 Gpa 较为接近. 与实验结果的这一偏差可以理解为:本文的计算是基于体系的基态进行的,并没有考虑温度等因素的影响,另外也可能是密度泛函理论本身的缺陷所造成的,即在其理论框架中没有考虑交换-关联势的不连续性^[11],由此而导致计算结果与实验结果存在一定的偏差.

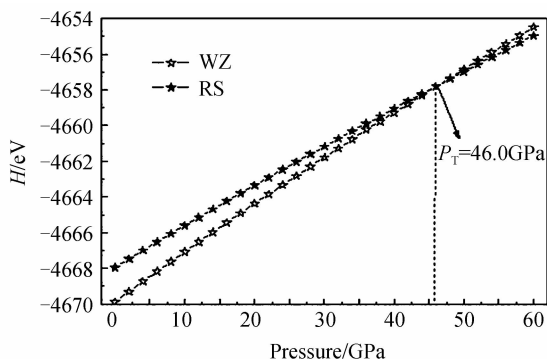


图 2 两种结构 GaN 的焓随压强的变化

Fig. 2 The enthalpy of two phases GaN with pressure change

2.3 GaN 结构相变压强附近的电子结构

为了分析 GaN 结构相变压强附近的电子结构和性质,选定由纤锌矿到氯化钠结构的相变压强为 $P_T = 46.0$ GPa. 图 3 给出了理想 GaN 晶体以及在相变点附近纤锌矿和氯化钠结构 GaN 的总电子态密度,图 4 中分别给出了纤锌矿和氯化钠结构 GaN 各原子的电子态密度. 从图 3 中可以看出理想的 GaN 晶体电子能级主要有 3 组,即由 $-15.67 - 11.92$ eV 的下价带, $-6.89 - 0$ eV 的上价带和导带. 结合图 4 可以发现:下价带主要来源于 Ga3d, N2s 及少量 Ga4s 的贡献;上价带主要来源于 N2p, Ga4s 和少量 Ga4p, N2s 的贡献. GaN 的导带主要来源于 Ga4s, Ga4p, N2p 及少量 N2s 的贡献. 结合图 3、4

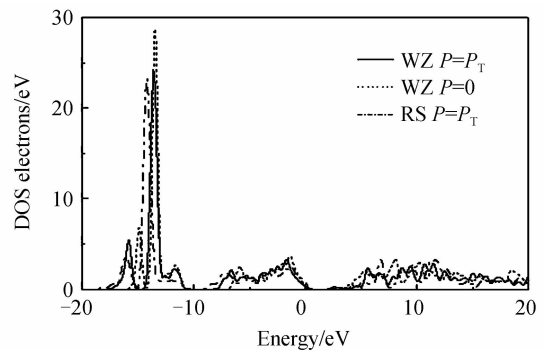
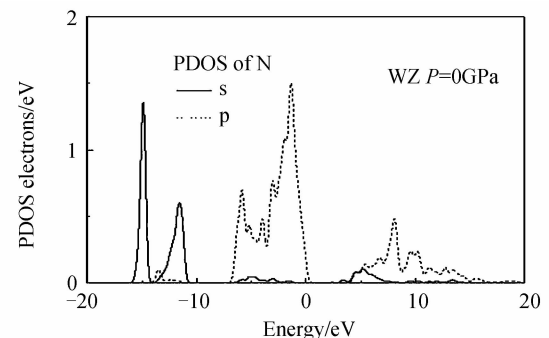
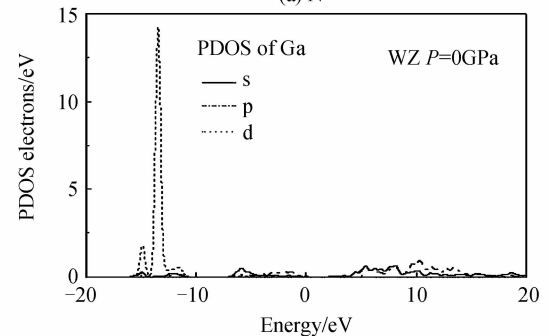


图 3 两种结构 GaN 的总电子态密度分布

Fig. 3 The total electron density distribution of two phases GaN



(a) N



(b) Ga

图 4 纤锌矿结构 GaN 原子 N 和 Ga 的电子密度图
Fig. 4 The electron density of N and Ga atom in wurtzite GaN

可以看出,理想纤锌矿结构 GaN 价带顶与导带底之间存在着较大的能隙,说明纤锌矿结构 GaN 是存在着较宽带隙的半导体材料. 随着外界压强的增大,纤锌矿结构 GaN 整个价带电子态峰值有所降低,并且向低能方向移动,而导带底电子态由于压强的增大而向高能方向发生偏移,致使价带与导带间的能隙有所增大. 图 5 给出了氯化钠结构 GaN 各原子的电子态密度. 结合图 3、5 可以看出,纤锌矿结构 GaN 向氯化钠结构过渡时,电子态密度的变化比较明显,上价带和下价带电子态密度峰值明显降低并向低能方向偏移,但价带顶位置没有明显变化,而导带底往低能方向移动,致使价带与导带间的能隙有所减小.

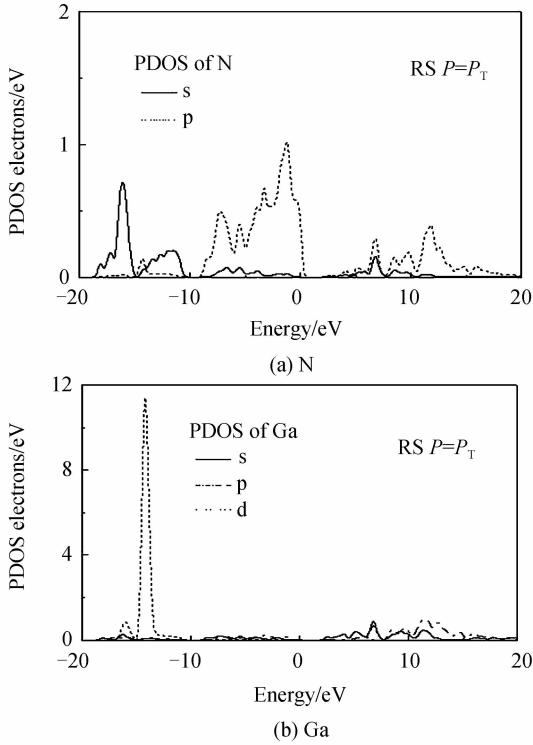


图5 氯化钠结构 GaN 原子 N 和 Ga 的电子密度图
Fig. 5 The electron density of N and Ga atom in rock salt GaN

为了进一步分析相变压强附近纤锌矿和氯化钠结构中 GaN 的电子结构的差异,图 6~7 给出了两种结构 GaN 沿布里渊区高对称点方向的能带结构图.从图 6 可以得到,当没有施加外界压强时,纤锌矿结构 GaN 是一种典型的直接带隙半导体,导带底和价带顶位于 Brillouin 区的 G 点处.实验中计算的直接带隙为 1.97 eV,较实验值 3.39 eV^[14] 偏低,但与邢海英等^[15] 人计算值 1.98 eV 一致.据文献^[16] 报道,广义梯度近似通常会导致带隙计算值偏低的现象产生,其原因归结为计算中采用的 DFT 理论是基态理论,而能隙属于激发态的性质,而且 GGA 对电子与电子之间的交换关联作用处理存在不足之处.对 GaN 晶体而言主要是在计算中过高地估计了 Ga3d 电子态的能量,造成 Ga3d 与 N2p 相互作用的增大,结果使价带带宽增大,带隙偏低.但这并不影响对 GaN 电子结构的理论分析^[17].当压强增加到相变压强 46.0 GPa 的时候,纤锌矿结构 GaN 从 G 处电子垂直方向跃迁产生的直接带隙为 3.15 eV.而对于氯化钠结构 GaN 而言,从图 7 可以发现,导带底出现在 Brillouin 区的 X 点处,价带顶出现在 Brillouin 区的 L 点处,具有明显的间接带隙半导体特征,GaN 在由纤锌矿结构往氯化钠结构相变的过程中,由典型的直接带隙半导体转变为间接带隙半导体材料.

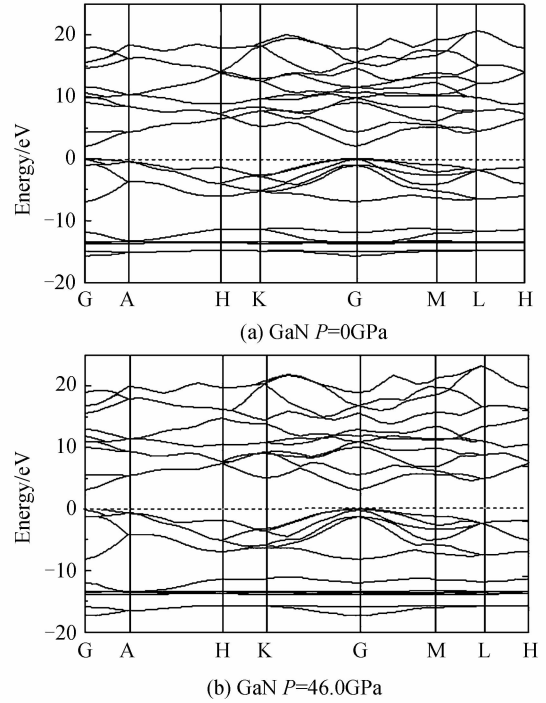


图6 纤锌矿结构 GaN $P=0$ GPa 和 $P=46.0$ GPa 的能带结构图

Fig. 6 The band structure of wurtzite GaN in $P=0$ GPa and $P=46.0$ GPa

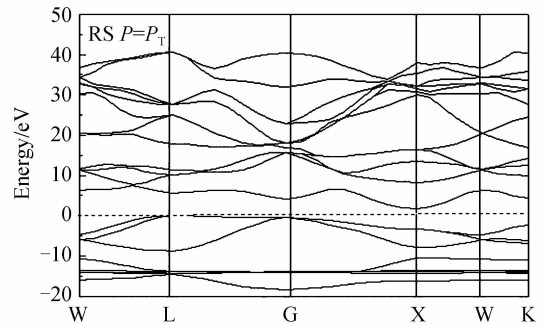


图7 氯化钠结构 GaN $P=46.0$ GPa 的能带结构图
Fig. 7 The band structure of rock salt GaN in $P=46.0$ GPa

2.4 GaN 结构相变压强附近的光学性质

电磁波在介质中传播时,介电函数复数形式为 $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$,其中 $\epsilon_1(\omega) = n^2(\omega) - k^2(\omega)$, $\epsilon_2(\omega) = 2n(\omega)k(\omega)$,从介电函数虚部出发可以推导出复折射率、吸收系数、反射系数等光学常量,介电常量虚部 $\epsilon_2(\omega)$ 反映了能级间电子跃迁所产生的光谱机理,体系在较小波矢下对光场的线性响应由复介电函数 $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ 的虚部 $\epsilon_2(\omega)$ 决定^[18],因此研究体系的介电函数虚部显得尤为重要.利用 Kramers-Krönig 关系,可以推导出晶体的介电函数的虚部与实部、吸收系数与反射系数等^[19-20],与本文计算相关公式为

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{4\pi^2}{m^2 \omega^2} \sum_{v,c} \left\{ \int_{BZ} d^3\mathbf{K} \frac{2}{(2\pi)} |e\mathbf{M}_{cv}(\mathbf{K})|^2 \times \delta[E_c(\mathbf{K}) - E_v(\mathbf{K}) - \hbar\omega] \right\} \quad (1)$$

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{8\pi^2 e^2}{m^2} \cdot \sum_{V,CBZ} \int d^3\mathbf{K} \frac{2}{(2\pi)} \cdot \frac{|e \cdot \mathbf{M}_{V,C}|^2}{[E_C(\mathbf{K}) - E_V(\mathbf{K})]^2} \cdot \frac{h^3}{[E_C(\mathbf{K}) - E_V(\mathbf{K})]^3 - \hbar^2 \omega^2} \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega k(\omega)}{c} = \frac{4\pi k(\omega)}{\lambda_0} \quad (3)$$

$$R(\omega) = \left| \frac{1-N}{1+N} \right|^2 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (4)$$

$$n(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon_1^2(\omega) + \epsilon_2^2(\omega)} + \epsilon_1(\omega)}{2}} \quad (5)$$

式中 C 和 V 分别为导带和价带, BZ 为第一布里渊区, \mathbf{K} 为倒格矢, $|e \cdot \mathbf{M}_{CV}(\mathbf{K})|^2$ 为动量跃迁矩阵元, λ_0 是光在真空中的波长, ω 为角频率, $E_C(\mathbf{K})$ 和 $E_V(\mathbf{K})$ 分别为导带和价带上的本征能级。

从图 8 中可以看出, 对于纤锌矿结构 GaN 而言, 当外界压强为 0 时, 在 2.0 eV 附近存在着光波吸收阈值, 这一能量值与计算的带隙值(1.97 eV)相对应, 能量位置与带隙宽度的能量相对应. 光子能量大于 2.0 eV 的介电峰主要是由不同能级间电子跃迁产生的, 在能量大于 2.0 eV 能量范围内主要存在五个介电峰, 介电峰位的分布与电子结构直接相关. 对照纤锌矿结构 GaN 在压强为 0 的电子态密度可以发现, 能量约为 2.45 eV 峰 E_1 , 与价带顶到导带底跃迁有关, 但它的值比较小, 这是由于导带底附近被能级占据的每单位能量间隔所对应的 K 空间体积不大而引起的; 峰 E_2 能量约为 3.69 eV, 主要来自于 N2p 与 Ga4s 间的跃迁; 峰 E_3 约为 6.99 eV, 主要来自 Ga3d 与 N2p 间的跃迁; 峰 E_4 约为 9.29 eV, 来自于 N2s 与 Ga4s 轨道间的跃迁; E_5 约为 10.98 eV, 可能来自于 N2p 与 Ga3p 轨道间的跃迁。

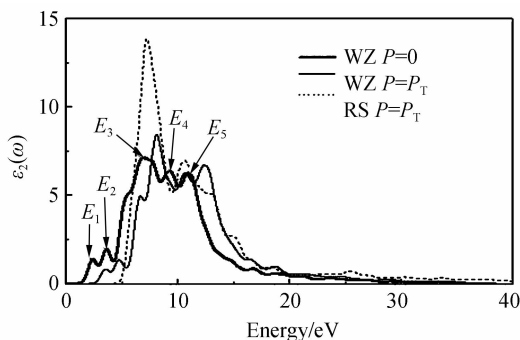


图 8 两种结构 GaN 的介电常量虚部 ϵ_2

Fig. 8 The imaginary part of dielectric function of two phases GaN

随着压强的增大, 纤锌矿结构 GaN 介电函数的虚部 ϵ_2 主要存在以下变化: 1) 由于能带中的禁带宽度增大, 本征吸收边向高能方向移动, 所有介电峰存在向高能区移动的趋势; 2) 峰 E_1 、峰 E_2 随着压强的增加峰值减小, 峰位向高能方向偏移, 但在峰 E_1 和 E_2 之间出现了一个小峰. 峰 E_4 峰位发生偏移, 但峰

值几乎没有变化, 峰 E_3 、峰 E_5 由于压强的增加峰值变大, 峰位也向高能方向发生了一定程度的偏移, 以上这些变化主要是由于压强的增大导致了纤锌矿结构 GaN 各原子电子态分布出现了变化造成的。

对于氯化钠结构 GaN 而言, 介电常量虚部 ϵ_2 变化较为明显, 介电常量主峰明显增强, 并向低能方向出现了一定偏移, 本征吸收边明显往高能方向移动, 移动到 4.8 eV 附近, 氯化钠结构 GaN 在低能区域的光学性质差于纤锌矿结构。

3 结论

本文运用第一性原理平面波赝势方法, 对纤锌矿和氯化钠结构 GaN 的状态方程及其在高压下的相变进行了计算研究, 分析了相变点附近的电子态密度、能带结构和光学性质的变化机制. 结果表明: 1) 通过状态方程和焓相等原理得到纤锌矿结构到氯化钠结构的相变压强分别为 43.9 GPa 和 46.0 GPa; 2) GaN 在由纤锌矿结构往氯化钠结构相变的过程中, 由典型的直接带隙半导体转变为间接带隙半导体材料; 3) 对两种结构 GaN 相变点附近的光学性质进行分析, 氯化钠结构相比于纤锌矿结构, 介电函数主峰值明显增强, 本征吸收边明显往高能方向移动, 移动到 4.8 eV 附近, 氯化钠结构 GaN 在低能区域的光学性质差于纤锌矿结构。

参考文献

- [1] NAKAMURA S. The roles of structural imperfections in ingan-based blue light-emitting diodes and laser diodes[J]. *Science*, 1998, **281**(5379): 956-961.
- [2] BROWN S A, REEVES R J, HAASE C S. Reactive-ion-etched gallium nitride: Metastable defects and yellow luminescence[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **75**(21): 3285-3287.
- [3] MUJICA A, RUBIO A, MUÑOZ A, *et al.* Angle-resolved photoemission studies of the cuprate superconductors [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, **75**(2): 473-541.
- [4] KIRIN D, LUKA ČEVIĆ I. Stability of high-pressure phases in II-VI semiconductors by a density functional lattice dynamics approach[J]. *Physical Review B*, 2007, **75**(17): 172103(4).
- [5] PERLIN P, ITIE J P, POLIAN A, *et al.* Raman scattering and x-ray-absorption spectroscopy in gallium nitride under high pressure [J]. *Physical Review B*, 1992, **45**(1): 83-89.
- [6] UENO M, YOSHIDA M, ONODERA A, *et al.* Stability of the wurtzite-type structure under high pressure: GaN and InN [J]. *Physical Review B*, 1994, **49**(1): 14-21.
- [7] ABU-JAFAR M, AL-SHARIF A I, QTEISH A. FP-LAPW and pseudopotential calculations of the structural phase transformations of GaN under high-pressure[J]. *Solid State Communications*, 2000, **116**(7): 389-393.
- [8] HALSALL M P, HARMER P, PARBROOK P J, *et al.* Raman scattering and absorption study of the high-pressure wurtzite to rocksalt phase transition of GaN [J]. *Physical Review B*, 2004, **69**(23): 235207(5).
- [9] SAOUD F S, PLENET J C, LOUAIL L, *et al.* Mechanism of the phase transition in GaN under pressure up to 100 GPa[J].

- Computational and Theoretical Chemistry*, 2011, **964**(1-3): 65-71.
- [10] SEGALL M D, LINDAN P J D, PROBERT M J, *et al.* First-principles simulation: ideas, illustrations and the CASTEP code[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, **14**(11): 2717-2744.
- [11] PERDEW J P, LEVY M. Physical content of the exact kohnsham orbital energies; band gaps and derivative discontinuities [J]. *Physical Review Letters*, 1983, **51**(20): 1884-1887.
- [12] JAFFE J E, HESS A C. Hartree-Fock study of phase changes in ZnO at high pressure[J]. *Physical Review B*, 1993, **48**(11): 7903-7909.
- [13] XIAO H, XIA Q, RUOFF A L. High-pressure structure of gallium nitride: Wurtzite-to-rocksalt phase transition [J]. *Physical Review B*, 1993, **47**(19): 12925-12928.
- [14] PONCE F A, BOUR D P. Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices[J]. *Nature*, 1997, **386**(6623): 351-359.
- [15] XING Hai-ying, FAN Guang-han, ZHAO De-gang, *et al.* Electronic structure and optical properties of GaN with Mn-doping[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6513-6519.
- 邢海英, 范广涵, 赵德刚, 等. Mn 掺杂 GaN 电子结构和光学性质研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6513-6519.
- [16] ANISIMOV V I, ARYASETIWAN F, LICHTENSTEIN A I. First-principles calculations of the electronic structure and spectra of strongly correlated systems: the LDA + U method[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1997, **9**(4): 767-808.
- [17] CHEN Kun, FAN Guang-han, ZHANG Yong. First principles study of In-N codoped ZnO [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 3138-3147.
- 陈琨, 范广涵, 章勇. In-N 共掺杂 ZnO 第一性原理计算[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 3138-3147.
- [18] FENG Jing, XIAO Bing, CHEN Jing-chao. Electronic and optical properties of CuInSe₂ from ab-initio calculations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5990-5995.
- 冯晶, 肖冰, 陈敬超. CuInSe₂ 电子结构与光学性质的第一性原理计算[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 5990-5995.
- [19] 黄昆. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 438.
- [20] 沈学础. 半导体光谱和光学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 76.

• 下期预告 •

高均匀低眩光 LED 台灯配光设计及仿真分析

兰明强, 王敏, 陈雪梅

(福建师范大学大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要: 市场上的节能台灯普遍存在光效低、亮度不均匀、眩光较严重的缺点, 以改善这些缺点作为出发点, 设计了一款高均匀低眩光的 LED 护眼台灯. 设计加入非球面反光杯灯罩来收集 LED 光源发出的大角度光线, 提高了光能的利用率并改善了眩光. 加入配光透镜消除接受平面存在的中心亮斑, 解决了均匀照明问题. 通过 ProE 三维设计软件进行实体建模, 导入 TracePro 进行光线模拟和仿真分析, 结果表明这一 LED 台灯配光设计可在工作距离为 450 mm、直径为 700 mm 的接收面内实现低眩光高均匀照明, 平均照度可达 497.1 lx, 平均度达到 0.9 左右. 这一高均匀低眩光 LED 护眼台灯的设计方案有着广阔的实际应用前景.

关键词: LED 护眼台灯; 非球面反光杯; 配光透镜; 高均匀度; 低眩光