

文章编号: 1000-7032(2013)10-1300-06

纤锌矿 $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ 抛物量子阱中极化子能级

张国庆, 赵凤岐*, 张晨宏

(内蒙古师范大学 物理与电子信息学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 采用改进的 Lee-Low-Pines (LLP) 中间耦合方法研究纤锌矿 $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ 抛物量子阱材料中的极化子能级, 给出极化子基态能量、跃迁能量(第一激发态到基态)和不同支长波光声子对电子态能级的贡献随量子阱宽度 d 的变化规律。理论计算中考虑了纤锌矿 $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ 抛物量子阱材料中声子模的各向异性和介电常数、声子(类 LO 和类 TO)频率等随空间坐标 Z 变化(SD)效应对极化子能量的影响。结果表明, $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ 抛物量子阱中电子与长波光声子相互作用对极化子能级的移动很大, 使得极化子能量明显降低。阱宽较小时, 半空间长波光声子对极化子能量的贡献较大, 而定域长波光声子的贡献较小; 阱宽较大时, 情况则正好相反。在 d 的变化范围内, 电子与长波光声子相互作用对极化子能级的移动(约 67 ~ 79 meV)比 $Al_x Ga_{1-x} As/Al_{0.3} Ga_{0.7} As$ 抛物量子阱中的相应值(约 1.8 ~ 3.2 meV)大得多。因此, 讨论 ZnO 基量子阱中电子态问题时要考虑电子与长波光声子的相互作用。

关键词: 抛物量子阱; 电子-光学声子相互作用; 极化子

中图分类号: O471.3; O472+.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20133410.1300

Polaron Energy Level in Wurtzite $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ Parabolic Quantum Well

ZHANG Guo-qing, ZHAO Feng-qi*, ZHANG Chen-hong

(College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

* Corresponding Author, E-mail: fqzhao@imnu.edu.cn

Abstract: The energy levels of polaron in a wurtzite $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ parabolic quantum well are investigated by adopting a modified Lee-Low-Pines variational method. The ground state energy, the transition energy and the contributions of different branches of optical phonon modes to the ground state energy as functions of the well width d are given. The effects of the anisotropy of optical phonon modes (like-LO and like-TO) and the spatial dependence effective mass, dielectric constant, phonon frequency on energy levels are considered in theoretical calculation. The results indicate that the contributions of the electron-optical phonon interaction to polaron energy shift in $Mg_x Zn_{1-x} O/Mg_{0.3} Zn_{0.7} O$ parabolic quantum well are very large, which make the energy of polaron reduce. For a narrower quantum well, the contributions of half-space optical phonon modes is large, and the contributions of the confined optical phonon modes is small, while for a wider one, the case is contrary. In the region of d , the contributions of the electron-optical phonon interaction to polaron energy shift

收稿日期: 2013-05-22; 修订日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(11264027); 内蒙古师范大学“十百千”人才培养工程基金(RCPY-2-2012-K-039)资助项目

作者简介: 张国庆(1982-), 女, 山西晋城人, 主要从事凝聚态理论方面的研究。

E-mail: zhangguoqing0602@163.com

in wurtzite $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ (about from 67 to 79 meV) are greater than that of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ parabolic quantum well (about from 1.8 to 3.2 meV). Therefore, the electron-optical phonon interaction should be considered in studying electron state in ZnO based quantum well.

Key words: parabolic quantum well; electron-optical phonon interaction; polaron

1 引 言

ZnO 是一种重要的直接带隙宽禁带半导体光电材料,它具有良好的热稳定性和化学稳定性^[1],被认为是最有希望的纳电子和光电子材料^[2-3]。ZnO 可用作紫外光发射器件(LED)、激光二极管(LD)、太阳能电池和气敏传感器,是国际光电子领域的研究热点^[4-5]。ZnO 材料的稳定结构是纤锌矿结构,纤锌矿具有单轴异性、多支声子模、禁带宽度大等特点。同时,在纤锌矿结构中,声子以混合模(类纵模和类横模)形式出现^[6]。ZnO 基量子阱结构与 GaN 基量子阱结构相比有许多优点^[7-9],该结构在蓝光和紫外光的应用方面很有潜力^[10]。

国内外一些学者^[11-21]研究了 ZnO 基量子阱(如 $\text{ZnO}/\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, $\text{ZnO}/\text{Be}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$)材料的能带结构、声子传播特性、发光光谱和吸收光谱、激子结合能等问题,得到了一些理论和实验结果。但是,对声子模传播行为以及电子与光学声子相互作用对电子态影响的研究还比较少,尤其是在电子与光学声子相互作用对纤锌矿 ZnO 基量子阱中极化子、杂质态和激子态能量、跃迁能量和结合能的影响方面。因为纤锌矿 ZnO 基量子阱材料中电子与长波光学声子相互作用对电子态能级的影响较大,所以进一步研究 ZnO 基量子阱结构中声子模传播行为和电子与声子相互作用的有关问题具有深远的意义和用途。Lee 等^[22-23]和史俊杰等^[24-25]分别讨论了纤锌矿量子阱结构中声子传播特性和电子与长波光学声子的耦合,给出了电子与长波光学声子(包括半空间(Half space mode, HS)、定域(CF)、界面(IF)和传播(PR)光学声子)相互作用的哈密顿量。

本文用改进的 Lee-Low-Pines(LLP)中间耦合变分方法讨论了纤锌矿 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱结构中电子与长波光学声子相互作用对极化子能量的影响,给出极化子能量、跃迁能量

(第一激发态到基态)以及不同支长波光学声子对极化子能级的贡献随量子阱宽度变化的数值结果。在理论计算中考虑了 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 材料中类纵模(LO)和类横模(TO)声子的各向异性 and 介电常数、声子(类 LO 和类 TO)频率等随空间坐标 Z 的变化效应。

2 理论计算

选阱宽为 d 的抛物量子阱, $|z| \leq d/2$ 区间($\lambda = 1$)为阱内材料, $|z| > d/2$ 区间($\lambda = 2$)为垒材料。阱内材料由 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 的组分 x 从阱中心 $x = 0$ 到阱边 $x = 0.3$ 连续变化而产生^[26],垒材料是 $\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 。一个电子运动在阱中,并与定域(CF)和半空间(HS)类 LO(类 TO)声子相互作用,利用有效质量近似,纤锌矿抛物量子阱结构中极化子哈密顿量可写为:

$$H = p_z \left(\frac{p_z}{2m_{z\lambda}} \right) + \frac{p_{\perp}^2}{2m_{\perp\lambda}} + V(z) + \sum_{wj} \hbar\omega a_j^+(\mathbf{w}) a_j(\mathbf{w}) + H_1, \quad (1)$$

其中, $m_{z\lambda}$ 和 $m_{\perp\lambda}$ 分别是电子在 z 轴平行和垂直方向的有效带质量, $a_j^+(\mathbf{w})$ 和 $a_j(\mathbf{w})$ 分别是声子(频率为 ω 、波矢为 $\mathbf{w} = (\mathbf{q}, k_{\lambda z})$)的产生算符和湮灭算符。 $j = \{l, k\}$, l 代表对称和反对称声子模, k 代表 CF 和 HS 类 LO(或 TO)声子模。方程(1)中第 3 项是抛物势,它可写为:

$$V(z) = \begin{cases} 4V_0 z^2/d^2, & (|z| \leq d/2) \\ V_0, & (|z| > d/2) \end{cases}, \quad (2)$$

$V_0 = 0.7\Delta E_g = 350 \text{ meV}$ ^[17]。方程(1)中最后一项是电子-长波光学声子相互作用哈密顿量,可写为^[22]:

$$H_1 = \sum_{wj} [g_j \exp(-i\mathbf{q} \cdot \boldsymbol{\rho}) a_j^+(\mathbf{w}) + h.c.], \quad (3)$$

为了简化求解,对哈密顿量(1)做两次 LLP 么正变换:

$$U_1 = \exp[-i \left(\sum_{wj} \mathbf{q} \cdot \boldsymbol{\rho} a_j^+(\mathbf{w}) a_j(\mathbf{w}) \right)], \quad (4)$$

$$U_2 = \exp \left\{ \sum_{w_j} [\chi_j h_j a_j^+(\mathbf{w}) - \chi_j h_j^* a_j(\mathbf{w})] \right\}, \quad (5)$$

变分参数 h_j 和 h_j^* 由极化子能量取最小值而确定, g_j 和 χ_j 的表达式参看文献[22,27]。转换后的哈密顿量为 $H^* = U_2^{-1} U_1^{-1} H U_1 U_2$, 极化子波函数选为:

$$\psi_n = N \varphi_n(z) |0\rangle, \quad (6)$$

这里, $|0\rangle$ 是声子真空态波函数, $\varphi_n(z)$ 是抛物量子阱中电子状态波函数, N 是波函数归一化常数。极化子能量为:

$$E_n(d) = \langle \psi_n | H^* | \psi_n \rangle, \quad (7)$$

通过数值计算得到 $E_n(d)$ 。极化子跃迁能量为:

$$\Delta E = E_2 - E_1, \quad (8)$$

E_1 是极化子基态能量, E_2 是第一激发态能量。

3 结果与讨论

对方程(7)进行数值求解而获得纤锌矿 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱中极化子基态能量和激发态能量, 数值计算结果在图 1~3 中给出。在计算中, 我们假定电子有效带质量是各向同性的, 即 $m_{z\lambda} = m_{\perp\lambda}$ 。抛物量子阱中阱内材料 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 的参数随着坐标 z (或组分 x) 变化, $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 材料参数^[18,28-29] 选为 $m_z/m_e = 0.28x + 0.23(1-x)$, $\varepsilon_z^\infty = 2.6x + 3.78(1-x)$, $\omega_z = 49.72x + 47.11(1-x)$, $\omega_\perp = 49.72x + 50.71(1-x)$, $\omega_{zL} = 89.15x + 71.17(1-x)$, $\omega_{\perp L} = 89.15x + 72.78(1-x)$, 频率以 meV 为单位。

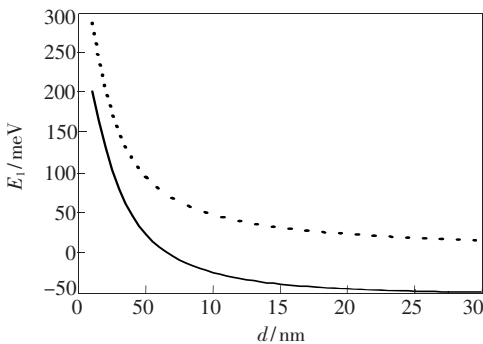


图 1 纤锌矿 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱中极化子基态能量随阱宽 d 的变化关系。实线和点线分别代表有声子影响和无声子影响的结果。

Fig. 1 Ground state energy of polaron as functions of the well width d in wurtzite $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ parabolic quantum well. The solid line and dot line indicate the results with and without phonon influence.

纤锌矿 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱中极化子基态能量随阱宽 d 的函数关系在图 1 中给出。从图 1 中看出, 阱宽较小时, 极化子能量随着阱宽的增大而减小的速度较快, 而阱宽较大时, 能量减小的速度变得较慢, 最后趋近于 ZnO 体材料的三维(3D)值。这一变化规律与电子在抛物量子阱中受量子限制有关。这些结果定性上与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 抛物量子阱中的相应结果相似^[30], 但定量上明显不同。电子-长波光学声子相互作用使极化子能量降低, 且这个作用对能量的贡献较大。

图 2 给出 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱中, 定域长波光学声子和半空间长波光学声子对极化子基态能量的贡献随阱宽 d 变化的函数关系。从图 2 中可以看出, 半空间长波光学声子的贡献随着 d 的增大急剧减小, 最后趋近于 0; 而定域声子的贡献随着 d 的增大而增大, 最后趋近于总的贡献。这是因为 d 较小时, 电子容易隧穿到垒材料中去, 这时电子与半空间长波光学声子耦合增强, 使得半空间长波光学声子贡献起重要作用。当 d 较大时, 电子隧穿到垒材料中的概率减小, 电子几乎在阱内区间中, 这时电子与定域长波光学声子耦合增强, 使得定域长波光学声子贡献起重要作用。对称声子模和反对称声子模的贡献随阱宽的变化规律大致相同, 但对称声子模的贡献明显大于反对称声子模的贡献。而定域和半空间长波光学声子的总贡献首先随着 d 的增大而减小, 在 $d = 3$ nm 处达到最小值, 之后随着 d 的增大而增大, 最终减小到 ZnO 材料的三维值。这一行为与电子在抛物量子阱中局域性的变化有关。根据计算结果, 光学声子对极化子基态能量的贡献主要来自于类 LO 声子, 类 TO 声子的贡献远远小于类 LO 声子的贡献。例如, $d = 20$ nm 时, 类 LO 声子贡献约为 68 meV, 而类 TO 声子的贡献约为 0.6 meV, 因此可以忽略类 TO 声子的影响。从数值计算结果还可以看出, 在 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱中, 电子-长波光学声子相互作用对极化子能量的贡献 (约 67 ~ 79 meV) 比 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 抛物量子阱中的相应值 (约 1.8 ~ 2.8 meV) 大得多。因此讨论 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Mg}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{O}$ 抛物量子阱中的电子态问题时, 应当考虑电子-长波光学

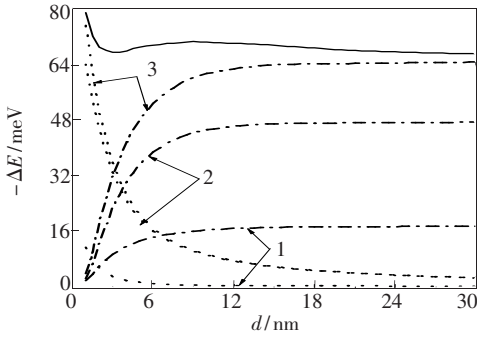


图 2 纤锌矿 $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ 抛物量子阱中不同支光学声子对极化子基态能量的贡献随量子阱宽度 d 的变化关系。虚点线表示定域长波光学声子的贡献, 点线表示半空间长波光学声子的贡献。线 1 和线 2 分别表示反对称和对称声子的贡献, 线 3 表示对称和反对称声子和的贡献, 实线表示总的贡献。

Fig. 2 Contributions of different branches of optical phonons to the ground state energy of polaron as functions of the well width d in wurtzite $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ parabolic quantum well. The dash-dot lines denote the contribution of the confined optical phonon, the dot lines denote the contribution of the half-space optical phonon. The lines 1 and lines 2 denote the contribution of the antisymmetric and the symmetric phonon, and the line 3 denote the contribution of the symmetric and the antisymmetric phonon summations. The solid line denotes total contribution.

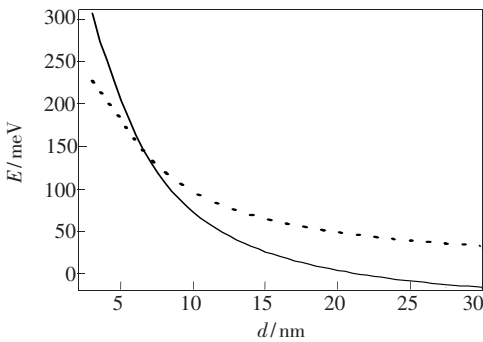


图 3 纤锌矿 $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ 抛物量子阱中极化子第一激发态能量(实线)和第一激发态到基态跃迁能量(点线)随阱宽 d 的变化关系

Fig. 3 The first excited state energy (solid line) and the transition (from the ground state to the first excited state) energy (dot line) of polaron in wurtzite $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ parabolic quantum well as functions of the well width d

声子相互作用。

图 3 给出了纤锌矿 $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ 抛物量子阱中极化子第一激发态能量(实线)和第一激发态到基态跃迁能量(点线)随阱宽 d 的变化关系。从图 3 中可以看出,极化子第一激发态能量和跃迁能量随 d 的增大而减小。阱宽 d 较小时,减小的速度比较快;而 d 较大时,降低缓慢。这是因为电子在不同阱宽抛物量子阱中受量子限制程度不同而导致的。

4 结 论

采用改进的 LLP 中间耦合方法研究了纤锌矿 $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ 抛物量子阱中的极化子效应,给出了极化子基态能量、第一激发态能量、跃迁能量(第一激发态到基态)以及不同支长波光学声子对极化子基态能量的贡献随阱宽 d 变化的数值结果。计算结果表明, $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ 抛物量子阱材料中极化子基态能量和跃迁能量随着 d 的增大而减小,最后缓慢减小到接近于 ZnO 体材料的三维值。 $Mg_xZn_{1-x}O/Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$ 抛物量子阱中电子与长波光学声子相互作用对极化子能级的移动很大,使得极化子能量明显降低。半空间长波光学声子的贡献随着 d 的增大而急剧减小,最后趋近于 0;而定域长波光学声子对能量的贡献随 d 的增大而增大,最终缓慢增大到总贡献。因此,阱宽 d 较小时,半空间长波光学声子起重要作用;而 d 较大时,定域长波光学声子起重要作用。光学声子模贡献主要来自于类 LO 声子模,类 TO 声子模的贡献(约 0.5 ~ 0.7 meV)远远小于类 LO 声子模的贡献(约 67 ~ 79 meV)。因此,可以忽略类 TO 声子的影响。在 d 的变化范围内,电子与长波光学声子相互作用对极化子能级的移动(约 67 ~ 79 meV)比 $Al_xGa_{1-x}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 抛物量子阱中的相应值(约 1.8 ~ 3.2 meV)大得多。因此,在讨论 ZnO 基量子阱中电子态问题时,必须要考虑电子-长波光学声子相互作用。

参 考 文 献:

[1] Su S C, Lu Y M, Mei T. Fabrication and optical properties of ZnO/ZnMgO multiple quantumwells on m-sapphire

- substrates [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2011, 60(9):096801-1-4 (in Chinese).
- [2] Nomura K, Ohta H, Ueda K, *et al.* Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor [J]. *Science*, 2003, 300(5623):1269-1272.
- [3] Ozgur U, Alivov Y I, Liu C, *et al.* A comprehensive review of ZnO materials and devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(4):041301-403.
- [4] Bagnall D M, Chen Y F, Zhu Z, *et al.* High temperature excitonic stimulated emission from ZnO epitaxial layers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(8):1038-1041.
- [5] Liu H X, Zhou S M, Li S Z, *et al.* Growth of ZnO microrod array films and their optical properties [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2006, 55(3):1398-1401 (in Chinese).
- [6] Lee B C, Kim K V, Strosio M A. Electron-optical-phonon scattering in wurtzite crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 1997, 56(3):997-1000.
- [7] Zhang B P, Binh N T, Wakatsuki K, *et al.* Growth of ZnO/MgZnO quantum wells on sapphire substrates and observation of the two-dimensional confinement effect [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 86(3):032105-1-3.
- [8] Park S H. Exciton binding energies in wurtzite ZnO/MgZnO quantum well with spontaneous and piezoelectric polarizations [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2007, 51(4):1404-1408.
- [9] Makino T, Chia C H, Tuan T, *et al.* Room-temperature luminescence of excitons in ZnO/(Mg,Zn)O multiple quantum wells on lattice-matched substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(7):975-977.
- [10] Gruber T, Kirchner C, Kling R, *et al.* ZnMgO epilayers and ZnO-ZnMgO quantum wells for optoelectronic applications in the blue and UV spectral region [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(26):5359-5361.
- [11] Makino T, Tuan N T, Sun H D, *et al.* Temperature dependence of near ultraviolet photoluminescence in ZnO/(Mg,Zn)O multiple quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(14):1979-1981.
- [12] Bretagnon T, Lefebvre P, Guillet T, *et al.* Barrier composition dependence of the internal electric field in ZnO/Zn_{1-x}Mg_xO quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(20):201912-1-3.
- [13] Furno E, Chiaria S, Penna M, *et al.* Electronic and optical properties of Mg_xZn_{1-x}O and Be_xZn_{1-x}O quantum wells [J]. *J. Elect. Mater.*, 2010, 39(3):936-944.
- [14] Ohtomo A, Tamura K, Kawasaki M, *et al.* Room-temperature stimulated emission of excitons in ZnO/(Mg,Zn)O superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(14):2204-2206.
- [15] Xia Y, Brault J, Nemoz M, *et al.* Optical properties of *a*-plane (Al, Ga)N/GaN multiple quantum wells grown on strain engineered Zn_{1-x}Mg_xO layers by molecular beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(15):261910-261912.
- [16] Stölzel M, Kupper J, Brandt M, *et al.* Electronic and optical properties of ZnO/(Mg,Zn)O quantum wells with and without a distinct quantum-confined Stark effect [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, 111(6):063701-1-10.
- [17] Fan W J, Xia J B, Agus P A, *et al.* Band parameters and electronic structures of wurtzite ZnO and ZnO/MgZnO quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 99(1):013702-1-4.
- [18] Coli G, Bajaj K K. Excitonic transitions in ZnO/MgZnO quantum well heterostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(18):2861-2863.
- [19] Lange M, Kupper J, Dietrich C P, *et al.* Exciton localization and phonon sidebands in polar ZnO/MgZnO quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, 86(4):045318-1-8.
- [20] Morhain C, Bretagnon T, Lefebvre P, *et al.* Internal electric field in wurtzite ZnO/Zn_{0.78}Mg_{0.22}O quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 72(24):241305-1-4.
- [21] Weston L, Cui X Y, Delley B, *et al.* Band offsets and polarization effects in wurtzite ZnO/Mg_{0.25}Zn_{0.75}O superlattices from first principles [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, 86(20):205322-1-10.
- [22] Lee B C, Kim K W, Strosio M A, *et al.* Optical-phonon confinement and scattering in wurtzite heterostructures [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58(8):4860-4865.
- [23] Komirenko S M, Kim K W, Strosio M A, *et al.* Energy-dependent electron scattering *via* interaction with optical phonons in wurtzite crystals and quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, 61(3):2034-2040.
- [24] Shi J J. Electron-interface-phonon interaction in wurtzite multilayer heterostructures [J]. *Solid State Commun.*, 2003,

127(1):51-55.

- [25] Shi J J, Chu X L, Goldys E M. Propagating optical-phonon modes and their electron-phonon interactions in wurtzite GaN/ $Al_xGa_{1-x}N$ quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, 70(11):115318-1-8.
- [26] Qi X H, Kong X Y, Lin J Y. Effect of a spatially dependent effective mass on the hydrogenic impurity binding energy in a finite parabolic quantum well [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58(16):10578-10582.
- [27] Zhao F Q, Zhang M. Polaronic effect on the electron energy spectrum in a wurtzite $In_xGa_{1-x}N/GaN$ quantum well [J]. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2011, 80(9):94713-1-5.
- [28] Ashkenov N, Mbenkum B N, Bundesmann C. Infrared dielectric functions and phonon modes of high-quality ZnO films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(1):126-133.
- [29] Lucovsky G, Brodsky M H, Burstein E. Extension of a linear diatomic-chain model for the calculation of local-mode frequencies in real crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 1970, 2(8):3295-3302.
- [30] Zhao F Q, Liang X X. Polarons with spatially dependent mass in a finite parabolic quantum well [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, 19(7):974-977.

向您推荐《液晶与显示》——中文核心期刊

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊,也是中国惟一的液晶学科和显示技术领域综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国光学光电子行业协会液晶专业分会和中国物理学会液晶分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。本刊是英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》征集有关各类显示材料及制备方法、材料物理和化学、液晶光学与光子学、生物液晶;液晶显示、有机电致发光显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空各类荧光显示、电致变色显示及其他新型显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术和器件应用、显示材料和器件的测试方法与技术、与显示相关的成像技术和图像处理等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)86176059

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国际刊名代码(CODEN):YYXIFY

传真:(0431)84695881

网址:www.yjxs.com