

文章编号: 1000-7032(2012)05-0492-07

压力及屏蔽对无限深量子阱中施主结合能的影响

刘 贺, 温淑敏*, 赵春旺, 哈斯花

(内蒙古工业大学理学院 物理系, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 对 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 和 GaN/Al_xGa_{1-x}N 无限深量子阱系统, 考虑压力及屏蔽效应, 利用变分方法数值计算这两种系统中的杂质态结合能。给出了结合能随阱宽和压力的变化关系, 同时讨论了有无屏蔽时的区别。结果表明, 结合能随压力增大而增大, 随阱宽增大而减小; 屏蔽效应随着压力的增加而增加, 并且显著降低了杂质态的结合能。

关键词: 量子阱; 压力; 屏蔽; 结合能

中图分类号: O471.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20123305.0492

Hydrostatic Pressure and Screening Influence on Binding Energies of Impurity in Quantum Wells with Infinite Barriers

LIU He, WEN Shu-min*, ZHAO Chun-wang, HA Si-hua

(Department of Physics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

* Corresponding Author, E-mail: wsm1973a@126.com

Abstract: Under the effects of hydrostatic pressure and screening on the infinite GaAs/Al_xGa_{1-x}As and GaN/Al_xGa_{1-x}N quantum wells, the binding energies of the impurity are calculated by the variational method in the two systems. The impurity binding energies as functions of the well width and pressure are given. The result indicates that the binding energy increases with pressure, but decreases with well width. We also discussed the binding energies of impurity with and without the screening effects. It is found that the screening effect became stronger as pressure increases, and then decreases the binding energy of impurity significantly.

Key words: quantum well; pressure; screening; binding energy

1 引 言

随着材料技术的不断发展, III-V 族材料被用于制造异质结和量子阱, 使得光电材料的范围得到极大的拓展。III-V 族材料中以 GaAs 为代表的第二代半导体材料和以 GaN 为代表的第三代半导体材料具有广阔的应用前景。氮化物

晶体可以形成六方对称纤锌矿和立方对称闪锌矿两种结构, 其稳定相为纤锌矿结构。与纤锌矿相比较, 闪锌矿结构的氮化物材料属于亚稳态的结构相, 在实际晶体生长中不容易获得, 或者形成的晶体质量不佳。但是, 闪锌矿结构的氮化物材料及其层状结构因为对称性好、易于掺杂、载流子浓度高、声子散射低等优于纤锌矿

收稿日期: 2012-02-12; 修订日期: 2012-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(11062008); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-D909); 内蒙古自治区自然科学基金(2010BS0102)资助项目

作者简介: 刘贺(1987-), 男, 安徽阜阳人, 主要从事半导体光电方面的研究。

E-mail: 505318759@qq.com

结构的特点,在一些光电器件的制备上也具有独特的优越性^[14]。半导体材料的设计和制造从“杂质工程”发展到“能带工程”,它的出现产生了许多新器件和电路,其优越性能得到广泛的应用和体现。

杂质相对于半导体材料来说,不论是在基础理论研究还是在实际器件的开发上都非常重要。Bastard^[5]首先采用变分法研究了无限深势阱中的施主态,Hollox等^[6]讨论了磁场强度的变化对半导体异质结构中杂质态结合能的影响,Mailhot C等^[2]和Liu W等^[8]讨论了量子阱中杂质态结合能随杂质位置、阱宽的变化关系。近些年来,赵凤岐等^[9]采用变分的方法研究了抛物量子阱材料中类氢杂质态的能级,张敏等^[10]研究了磁场对异质结系统中束缚极化子的影响。随着研究的不断深入,赵国军等^[11]研究了压力对量子阱中施主结合能的影响,得出结合能随压力增大而增大的结论。温淑敏等^[12]研究了压力下有限深势阱中施主结合能的屏蔽效应,元丽华等^[13]研究了应变量子阱中杂质态结合能的压力效应。但就作者所知,目前尚未有同时考虑压力和屏蔽对无限势垒方阱中杂质态结合能影响的报道。

本文采用变分法讨论压力下屏蔽效应对无限深量子阱中施主结合能的影响,对GaAs/Al_xGa_{1-x}As和GaN/Al_xGa_{1-x}N量子阱系统进行数值计算,分析量子阱中施主结合能随阱宽、压力的变化趋势,以及有无屏蔽时的区别。结果表明,施主结合能随阱宽的增大而减小,随压力的增大而增加,屏蔽效应能够显著地降低施主结合能。

2 理论模型

以GaN/Al_xGa_{1-x}N为例,考虑一个阱宽为2d的量子阱,阱材料为GaN,填充在|z|≤d的区域;垒材料为Al_xGa_{1-x}N,填充在|z|>d的区域。量子阱沿着z轴方向生长,即z轴垂直于量子阱界面。选取两种材料的界面为x-y平面,并将坐标原点选在量子阱的中心。假设电量为e的施主杂质位于阱内(0,0,z₀)处,则电子与杂质系统的哈密顿量为

$$H = H_{\parallel} + H_{\perp} + H_C, \quad (1)$$

其中 H_{\parallel} 代表电子在x-y平面内的动能,其具体形式为

$$H_{\parallel} = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho}, \quad (2)$$

其中 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为电子在x-y平面内的径向坐标, m_e 为电子的有效质量。

在式(1)中 H_{\perp} 为杂质态哈密顿量的z方向的分量,其形式为

$$H_{\perp} = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V(z), \quad (3)$$

其中 $V(z)$ 是量子阱势垒,满足关系

$$V(z) = \begin{cases} 0, & |z| \leq d, \\ \infty, & |z| > d, \end{cases} \quad (4)$$

在式(1)中 H_C 表示电子与杂质的库仑相互作用,其形式为

$$H_C = -\frac{e^2}{\epsilon_0 \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}}, \quad (5)$$

当考虑屏蔽效应时, H_C 的形式应该为

$$H_C = -\frac{e^2}{\epsilon_0 \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}} f(r), \quad (6)$$

在式(5)和式(6)中 ϵ_0 是与材料有关的介电常数, $f(r)$ ^[14]是屏蔽因子。在准二维情况下,经傅立叶变换后,屏蔽因子 $f(r)$ 的形式为

$$V(\mathbf{q}) = -4\pi e^2 / \epsilon(\mathbf{Q}) q^2,$$

这里, \mathbf{q} 为波矢量,依赖于x-y方向二维波矢 \mathbf{Q} 的托马斯-费米项可选为^[14]

$$\epsilon(\mathbf{Q}) = 1 + \frac{2}{a_B Q} G(\mathbf{Q}) F(\mathbf{Q}), \quad (7)$$

$a_B = \epsilon_0 \hbar^2 / m_e^2$ 为有效玻尔半径。式(7)中

$$G(\mathbf{Q}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{Q} < 2\mathbf{Q}_F \\ 1 - [1 - (2\mathbf{Q}_F/\mathbf{Q})^2]^{\frac{1}{2}} & \mathbf{Q} > 2\mathbf{Q}_F \end{cases}, \quad (8)$$

这里,二维费米波矢满足 $\mathbf{Q}_F = (2\pi n_s)^{1/2}$, n_s 为电子面密度。屏蔽因子 $F(\mathbf{Q})$ 的表达式为

$$F(\mathbf{Q}) = \iint dz dz' |\varphi_0(z)|^2 e^{-Q|z-z'|} |\varphi_0(z')|^2, \quad (9)$$

其中, $\varphi_0(z)$ 为电子在z方向的波函数。

我们利用变分法计算杂质态的结合能,选取如下形式的试探波函数

$$|\varphi\rangle = \begin{cases} \varphi_0(z) \exp\left[-\frac{\lambda}{2} \sqrt{(z - z_0)^2 + \rho^2}\right] & |z| \leq d \\ 0 & |z| > d \end{cases}, \quad (10)$$

上式中 λ 是变分参数, $\varphi_0(z)$ 表示无限深量子阱中的电子基态波函数, 具体形式为

$$\varphi_0(z) = N_0(z) \cos\left(\frac{\pi z}{2d}\right), \quad (11)$$

式中的 $N_0(z)$ 是归一化常数。

利用变分法, 杂质态的变分能量通过式(1)对 λ 求变分极小给出:

$$E_v = \min_{\lambda} \frac{\langle \Phi | H | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle} = E_{\parallel} + E_{\perp} + E_C + V_e, \quad (12)$$

杂质态的结合能为

$$E_B = E_{\text{free}} - E_v, \quad (13)$$

式中的 E_{free} 表示无库仑相互作用时的自由电子能量。式(12)右侧各项表达式分别为

$$E_{\parallel} = \frac{\langle \Phi | -\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{\partial}{\partial \rho} | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle}, \quad (14)$$

$$E_{\perp} = \frac{\langle \Phi | -\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle}, \quad (15)$$

$$E_C = \frac{\langle \Phi | H_C | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle}, \quad (16)$$

将式(5)中的 H_C 代入式(16)可得

$$E_C = \frac{\langle \Phi | -\frac{e^2}{\epsilon_0 \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}} | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle}, \quad (17)$$

将式(6)中的 H_C 代入式(16)可得

$$E_C = \frac{\langle \Phi | -\frac{e^2}{\epsilon_0 \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}} f(r) | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle}. \quad (18)$$

3 物理参数的压力影响

半导体材料的能带间隙、电子有效质量、材料的介电常数和晶格振动频率等参数, 都将因有压力的作用而相应的发生变化。

禁带宽度的压力系数可由下式得出

$$E_g(P) = E_g + \alpha P, \quad (19)$$

其中 E_g 是材料在常压下的能隙, 其单位为 meV; P 是压力, 单位为 kPa; α 是能隙的压力系数。

电子有效质量的压力系数可由下式得出

$$\frac{m_0}{m(P)} = 1 + \frac{C}{E_g(P)}, \quad (20)$$

式中 m_0 是自由电子的质量, $m(P)$ 是在压力 P 作用下的电子的有效质量, C 是不随压力变化而只与材料有关的常数。

介电常数包括高频介电常数和静态介电常数。高频介电常数随压力的变化关系为

$$\epsilon_{\infty}(P) = 1 + [\epsilon_{\infty}(0) - 1] e^{-\frac{5}{5B}(0.9-f_i)P}, \quad (21)$$

式中的 f_i 是材料的电离度, $\epsilon_{\infty}(P)$ 是高频介电常数。

静态介电常数与高频介电常数的关系由 LST 关系确定:

$$\epsilon_0(P) = \epsilon_{\infty}(P) (\hbar\omega_{L0}/\hbar\omega_{T0})^2. \quad (22)$$

4 数值计算与结果讨论

为了分析讨论压力和屏蔽对无限深量子阱中的杂质态结合能的影响, 我们利用变分方法数值计算了 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱和闪锌矿结构的 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱中的杂质态结合能。表 1 列出了计算中所需的参数, 计算结果如图 1 和图 2 所示。

我们首先讨论杂质态结合能在不同压力条件下随阱宽的变化关系, 同时考虑有无屏蔽时的区别。

以 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱为例, 由于在压力低于 4×10^9 Pa 时, GaAs 为直接带隙半导体, 因此我们的计算只在压力为 $0 \sim 4 \times 10^9$ Pa 的范围内进行。

图 1 中分别给出了压力分别为 $0, 2 \times 10^9, 4 \times 10^9$ Pa 时, GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱和闪锌矿结构

表 1 数值计算中用到的参数

Table 1 Parameters used in the computation

	ϵ_{∞}	$\hbar\omega_{L0}$	$\hbar\omega_{T0}$	m_e	f_i	B_0	B'_0	E_g	α	γ_{L0}	γ_{T0}
GaAs ^[15]	10.89	33.25	33.29	0.067	0.310	770 ^[16]	4.6 ^[16]	1.424	11.5	1.01 ^[17]	1.12 ^[17]
AlAs ^[15]	8.16	50.09	44.88	0.15	0.274	748 ^[16]	4.6 ^[16]	2.168	10.2	0.85 ^[17]	1.08 ^[17]
GaN	5.41 ^[18]	92.99 ^[20]	69.43 ^[20]	0.19 ^[21]	0.5 ^[22]	2 054 ^[23]	4.6 ^[23]	3.3 ^[21]	3.6 ^[23]	1.02 ^[20]	1.19 ^[20]
AlN	4.46 ^[19]	112.5 ^[20]	82.08 ^[20]	0.33 ^[21]	0.499 ^[22]	2 158 ^[23]	4.2 ^[23]	6.0 ^[21]	4.7 ^[23]	0.89 ^[20]	1.14 ^[20]

的 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱中杂质态结合能随阱宽的变化关系。从图中可以看出,两种量子阱在外加压力为 2×10^9 Pa 和 4×10^9 Pa 的条件下,结合能随阱宽的变化趋势与零压及无屏蔽时基本相同,都随着阱宽的增大而减小。原因在于随着阱宽的增加,电子与杂质间的库仑相互作用减弱,因此杂质态结合能随阱宽增大而减小;另一方面,当压力越大时,结合能也越大;屏蔽效应对结合能的影响,随压力增大而增强。

图1中的虚线表示考虑屏蔽时的结合能,实线表示未考虑屏蔽时的结合能,可以看出,屏蔽可

以明显的降低杂质态结合能。当压力分别为 $0, 2 \times 10^9, 4 \times 10^9$ Pa 时,对于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱,屏蔽效应对结合能的影响先减弱后增强。屏蔽效应最弱处阱宽为 5 nm,结合能分别降低 66.42%、66.45%、66.58%,屏蔽效应最强处阱宽为 30 nm,结合能分别降低 74.34%、75.91%、77.29%;而对于 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱来说,在 $0 \sim 5$ nm 阱宽范围内,屏蔽效应并不明显,但是随着阱宽的逐渐增大,屏蔽效应也越来越显著,当阱宽为 30 nm 时屏蔽效应最为突出,使得结合能分别降低 85.03%、85.20%、85.34%。结果表明,

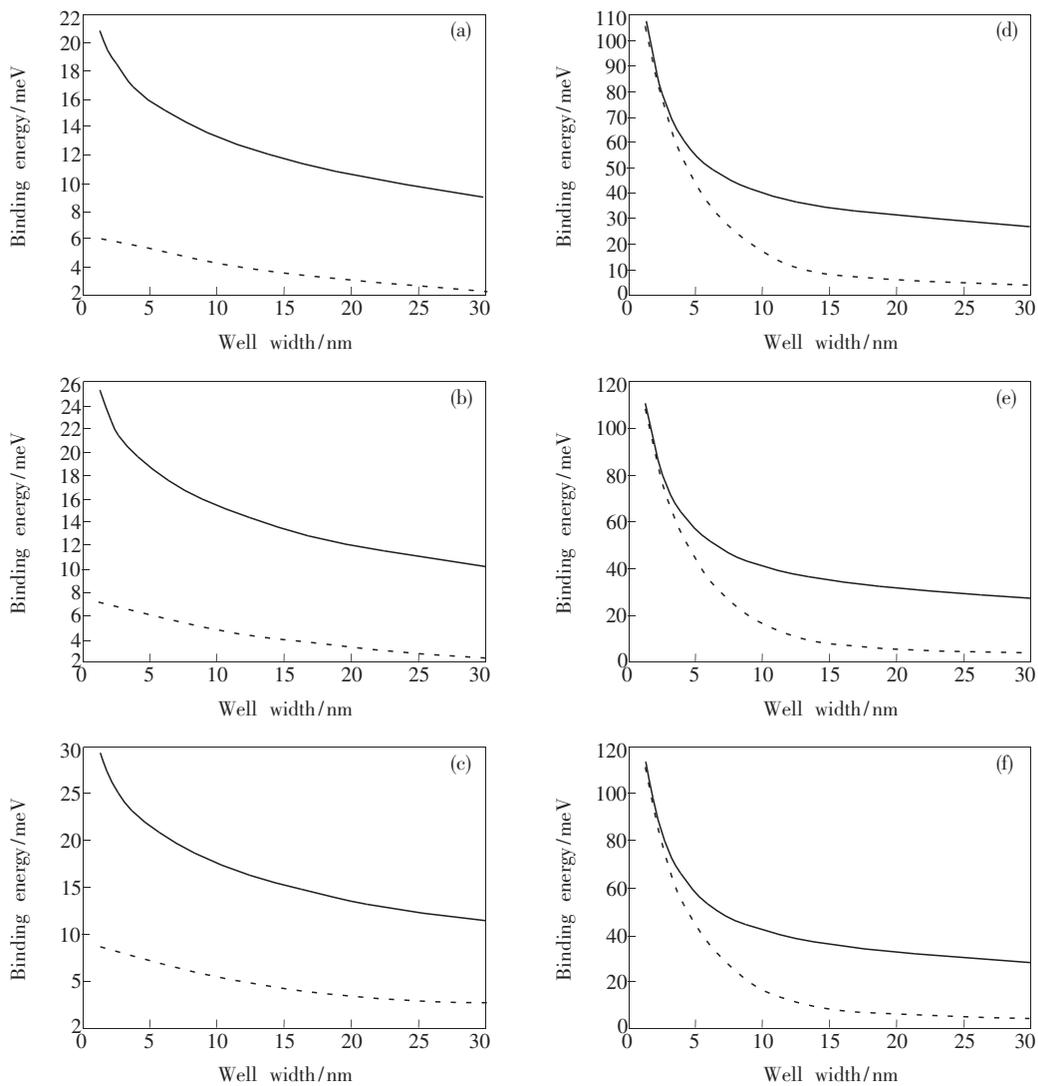


图1 (a)和(d)压力为0,(b)和(e)压力为 2×10^9 Pa,(c)和(f)压力为 4×10^9 Pa,杂质态结合能随阱宽的变化关系。虚(实)线分别为有(无)屏蔽的结果。(a)、(b)、(c)为 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱,(d)、(e)、(f)为 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱。

Fig. 1 The donor binding energies as functions of the well width for the given $P = 0$ (a) and (d), $P = 2 \times 10^9$ Pa (b) and (e), $P = 4 \times 10^9$ Pa (c) and (f), Dashed (solid) line is the result with (without) screening effect. (a), (b), (c) are for GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well and (d), (e), (f) for GaN/Al_xGa_{1-x}N quantum well.

屏蔽效应对 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱杂质态结合能的影响,在整个研究的阱宽范围内先减弱后增强;对于 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱来说,屏蔽效应随阱宽增大而增强,而且在宽阱范围内屏蔽效应才比较突出。

我们还讨论了杂质态结合能在不同阱宽条件下,随压力的变化关系,同时考虑有无屏蔽时的区别。

图 2 中分别给出了当阱宽 d 分别取 5, 10, 15 nm 时, GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱和闪锌矿结构的

GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱中杂质态结合能随压力的变化关系,我们所计算的压力范围是 $0 \sim 40 \times 10^9$ Pa。

当阱宽 d 分别取 5, 10, 15 nm 且不考虑屏蔽时,对于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱,当 $P = 2 \times 10^9$ Pa 时,结合能比零压时分别增加了 17.47%、15.95%、14.89%,当 $P = 4 \times 10^9$ Pa 时,结合能比零压时分别增加 35.42%、32.21%、30.02%;而对于 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱,当 $P = 2 \times 10^9$ Pa 时,结合能比零压时分别增加 2.18%、2.42%、2.56%;

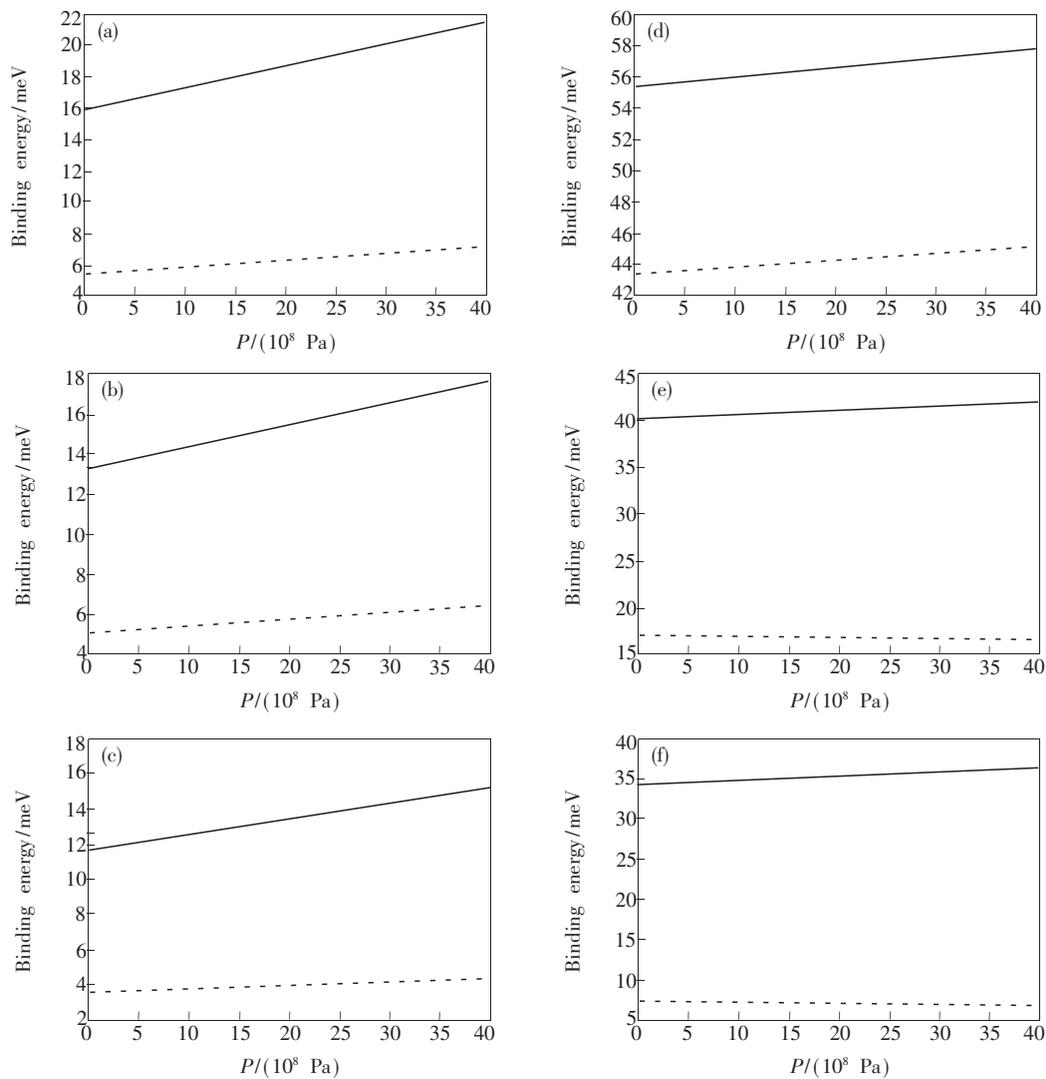


图 2 (a)和(d)阱宽为 5 nm,(b)和(e)阱宽为 10 nm,(c)和(f)阱宽为 15 nm 时,杂质态结合能随压力的变化关系。虚(实)线分别为有(无)屏蔽的结果。(a)、(b)、(c)为 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱,(d)、(e)、(f)为 GaN/Al_xGa_{1-x}N 量子阱。

Fig. 2 The donor binding energies as functions of the hydrostatic pressure for the given well width $d = 5$ nm (a) and (d), well width $d = 10$ nm (b) and (e), well width $d = 15$ nm (c) and (f), Dashed (solid) line is the result with (without) screening effect. (a), (b), (c) are for GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well and (d), (e), (f) for GaN/Al_xGa_{1-x}N quantum well.

当 $P = 4 \times 10^9$ Pa 时,结合能比零压时分别增加 4.38%、4.86%、5.16%。对比分析可知, GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱的压力效应比 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱的显著。

从上面的数据中也可看出:结合能的压力效应还与阱宽 d 有关。在 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱中,随着阱宽的增加压力效应减弱,当阱宽为 $d = 5$ nm 时,压力效应最为明显, $P = (2, 4) \times 10^9$ Pa 时结合能分别增加 17.47%、35.42%;而对于 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱,随着阱宽的增加压力效应增强,当阱宽为 $d = 15$ nm 时,压力效应最为明显, $P = (2, 4) \times 10^9$ Pa 时结合能分别增加 2.56%、5.16%。

结合能的屏蔽效应也与阱宽有关。当阱宽 $d = 5, 10, 15$ nm, 对于 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱,当 $P = 2 \times 10^9$ Pa 时,屏蔽使结合能分别降低 66.48%、68.12%、70.28%,当 $P = 4 \times 10^9$ Pa 时,屏蔽使结合能分别降低 66.59%、68.83%、71.30%;而对于 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱来说,当 $P = 2 \times 10^9$ Pa 时,屏蔽使结合能分别降低 22.87%、59.13%、76.50%,当 $P = 4 \times 10^9$ Pa 时,屏蔽使结合能分别降低 23.94%、60.59%、77.11%。结果表明,屏蔽效应对 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱杂质态结合能的影响,无论窄阱还是宽阱,变化都很明显,而且比较稳定。而对于 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱来说,随着阱宽的增加屏蔽效应才

逐渐突出。原因在于屏蔽因子与材料的有效玻尔半径有关,有效玻尔半径越大则屏蔽因子越大。GaN 的有效玻尔半径小于 GaAs 的有效玻尔半径,窄阱时 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱中电子与杂质间的库仑相互作用远大于屏蔽效应,而 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱中窄阱时屏蔽效应就开始起作用。

5 结 论

考虑压力及屏蔽效应对无限深量子阱杂质态结合能的影响,利用变分法数值计算了无限深 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱和闪锌矿结构的 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱中的杂质态结合能,给出了结合能随压力、阱宽的变化关系。杂质态结合能随阱宽的增大而减小。综合考虑压力对半导体材料的能带间隙、电子有效质量、材料的介电常数和晶格振动频率等参数的影响后,发现结合能随压力的增大而增大,屏蔽效应随压力的增大而增加。对比分析可知, GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱的压力效应比 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱的显著。屏蔽效应使得 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱杂质态结合能在所研究的压力范围内明显降低,而对于 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱来说,只有在宽阱范围内屏蔽效应才比较突出。可以看出屏蔽效应与压力和阱宽有关,因此不能忽视屏蔽效应对杂质态结合能的影响。

参 考 文 献:

- [1] Thompson M P, Auner G W, Zheleva T S, *et al.* Deposition factors and band gap of zinc-blende AlN [J]. *Appl. Phys.*, 2000, 89(6):3331-3336.
- [2] Lemos V, Silveira E, Leite J R, *et al.* Evidence for phase-separated quantum dots in cubic InGaN layers from resonant Raman scattering [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84(16):3666-3669.
- [3] Park S H, Chuang S L. Comparison of zinc-blende and wurtzite GaN semiconductors with spontaneous polarization and piezoelectric field effects [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, 87(1):353-364.
- [4] Li Zhenyong, Wang Mei, Su Xiyu, *et al.* First-principles study on electron structure and light absorption of the blende $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ systems [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(4):521-526 (in Chinese).
- [5] Bastard G. Hydrogenic impurity states in a quantum well: A simple model [J]. *Phys. Rev. B*, 1981, 24(8):4714-4722.
- [6] Hollox D M, Antoniewicz P R. Bound state of an external impurity at a semiconductor-semiconductor interface in the presence of a magnetic field [J]. *Phys. Rev. B*, 1986, 33(12):8558-8563.
- [7] Mailhiot C, Chang Y C, McGill T C. Energy spectra of donors in GaAs/ $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ quantum well structures in the effective-mass approximation [J]. *Phys. Rev. B*, 1982, 26:4449-4457.
- [8] Liu W, Quinn J J. Shallow-impurity states in semiconductor quantum-well structures [J]. *Phys. Rev. B*, 1985, 31:2348-2352.

- [9] Zhang Hairui, Xiao Jinglin. The Effective mass of weakly-coupling polaron in a triangular quantum well induced by the rashba effect [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1):12-16 (in English).
- [10] Zhang Min, Ban S L. Influence of magnetic field on bound polarons semiconductor GaAs/Al_{1-x}Ga_xAs heterojunctions [J]. *Journal of Semiconductors* (半导体学报), 2004, 25(12):70-75 (in Chinese).
- [11] Zhao G J, Liang X X, Ban S L. Binding energies of donors in quantum wells under hydrostatic pressure [J]. *Phys. Lett. A*, 2003, 319(1-2):191-197.
- [12] Wen Shumin, Ban Shiliang. Screening influence on binding energies of donors in quantum wells with finite barriers under hydrostatic pressure [J]. *Journal of Semiconductors* (半导体学报), 2006, 27(1):63-67 (in Chinese).
- [13] Yuan Lihua, An Zhanghui, Zhang Cairong, *et al.* Polaron effects of exciton in ZnSe/ZnS parabolic quantum wells [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(3):348-352 (in English).
- [14] Ban S L, Hasbun J E. Level in a quasi-two dimensional heterojunction system [J]. *Solid State Commun.*, 1999, 109:93-98.
- [15] Adachi S. GaAs, AlAs, Al_{1-x}Ga_xAs material parameters for use in research and device applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, 58(3):R1-R29.
- [16] Lam P K, Cohen M L, Martinze G. Analytic relation between bulk moduli and lattice constants [J]. *Phys. Rev. B*, 1987, 35:9190-9194.
- [17] Holtz M, Seon M, Brafran O, *et al.* Pressure dependence of the optic phonon energies in Al_{1-x}Ga_xAs [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, 54(12):8714-8720.
- [18] Karch K, Bechstedt F, Plehl T. Lattice dynamics of GaN: Effects of 3d electrons [J]. *Phys. Rev. B*, 1997, 56(7):3560-3563.
- [19] Karch K, Bechstedt F. Ab initio lattice dynamics of BN and AlN covalent versus ionic forces [J]. *Phys. Rev. B*, 1997, 56(12):7404-7415.
- [20] Wagner J M, Bechstedt F. Pressure dependence of the dielectric and lattice dynamical properties of GaN and AlN [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, 62(7):4526-4534.
- [21] Wang H, Farias G A, Freire V N. Interface related exciton energy blue shift in GaN/Al_xGa_{1-x}N zinc blende and wurtzite single quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, 60(8):5705-5713.
- [22] Phillips J C, Lucovsky G. *Bonds and Bands in Semiconductors* [M]. 2nd Edition, New York: Momentum Press, 1973: 125-129.
- [23] Wei Suhai, Zunger A. Predicted band gap pressure coefficients of all diamond and zinc-blende semiconductors: Chemical trends [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, 60(8):5404-5411.