

УДК 537.311

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ,
ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ
ПЕШЛЯ–ТЕЛЛЕРА**

А. ХАКИМИФАРД¹, М.Г. БАРСЕГЯН¹, К.А. ДЮКЕ², А.А. КИРАКОСЯН¹

¹Ереванский государственный университет, Армения

²Институт физики, Университет Антикуа, Мэделин, Колумбия

(Поступила в редакцию 12 марта 2010 г.)

Исследовано влияние электрического поля и гидростатического давления на электронные состояния в полупроводниковой квантовой яме с ограничивающим потенциалом Пешля–Теллера. В рамках вариационного метода вычислена энергия основного состояния как функция электрического поля и гидростатического давления при различных значениях параметров потенциала и температуры. Показано, что увеличение электрического поля приводит к увеличению энергии основного состояния, а увеличение ширины ямы – к усилению влияния поля. Энергия основного состояния уменьшается при увеличении гидростатического давления и увеличивается при повышении температуры.

1. Введение

Полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе представляют собой одни из важнейших объектов современной физики полупроводниковой электроники [1,2]. Прогресс в области микро- и оптоэлектроники в значительной степени обусловлен использованием низкоразмерных гетероструктур. В настоящее время широко изучаются физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ), что связано с использованием таких систем в качестве детекторов инфракрасного и дальнего инфракрасного излучения.

Применение электрического поля по направлению роста гетероструктуры приводит к поляризации распределения носителей заряда и к изменению энергии квантовых состояний, что следует учитывать при расчете характеристик современных приборов микро- и оптоэлектроники, поскольку в ряде случаев это может привести к качественно новым результатам [3-10].

Исследование влияния гидростатического давления также имеет важное значение в расчетах оптических характеристик низкоразмерных структур, поскольку применением гидростатического давления можно управлять переходами между различными энергетическими уровнями в них [11,12].

В работах [13,14] в рамках вариационного метода исследована зависимость энергии основного состояния от напряженности электрического поля в полупроводниковой КЯ с бесконечным прямоугольным потенциалом, когда электрическое поле направлено вдоль оси роста гетероструктуры. В работе [15] изучено влияние электрического поля на электронные состояния и спектр межподзонного поглощения в полупроводниковой КЯ с потенциалом Пешля–Теллера. В рамках вариационного метода исследовано поведение уровней энергии основного и первого возбужденного состояний для различных значений напряженности электрического поля, когда все остальные параметры потенциала фиксированы. В [16] рассмотрено влияние магнитного поля и гидростатического давления на межподзonné оптические переходы в КЯ с потенциалом Пешля–Теллера. Показано, что увеличение гидростатического давления приводит к красному смещению в спектре оптического поглощения.

В данной работе в рамках вариационного метода исследовано влияние электрического поля и гидростатического давления на электронные состояния в полупроводниковой квантовой яме с ограничивающим потенциалом Пешля–Теллера. Рассмотрено также влияние асимметричности потенциала и температуры на энергию основного состояния.

2. Теория

Гамильтониан электрона в рассматриваемой системе имеет вид [17]

$$\hat{H}(P, T) = -\frac{\hbar^2}{2m(P, T)} \nabla^2 + V(z, P, T) + eFz, \quad (1)$$

где e – модуль заряда электрона, F – напряженность электрического поля, направленного вдоль оси z , $m(P, T)$ – эффективная масса электрона, зависящая от давления и температуры [18,19]:

$$m(P, T) = \left[1 + \frac{15020}{E_g(P, T)} + \frac{7510}{E_g(P, T) + 341} \right]^{-1} m_0, \quad (2)$$

где $E_g(P, T)$ – ширина запрещенной зоны GaAs:

$$E_g(P, T) = \left(1519 + 10.7P - \frac{0.5405T^2}{T + 204} \right) \text{meV}, \quad (3)$$

$V(z, P, T)$ – ограничивающий потенциал Пешля–Теллера [20]:

$$V(z, P, T) = \frac{\hbar^2 \beta^2}{2m(P, T)} \left(\frac{\chi(\chi - 1)}{\sin^2[\beta(P)z]} + \frac{\lambda(\lambda - 1)}{\cos^2[\beta(P)z]} \right), \quad (4)$$

λ и χ – параметры потенциала, $\beta(P) = \pi/2L(P)$, $L(P)$ – характеристическая ширина КЯ при заданном давлении. В случае GaAs, согласно [21], имеем

$$L_z(P) = L_z(0)(1 - 1.9 \times 10^{-3} P), \quad (5)$$

где P измеряется в килобарах, $L_z(0)$ – характеристическая ширина при $P = 0$. При $\lambda = \chi$ потенциал (4) симметричен относительно прямой $\beta(P)z = \pi/4$, а при $\lambda \neq \chi$ появляется асимметричность, которой можно управлять изменением указанных параметров.

Следуя вариационному принципу, волновую функцию основного состояния запишем в виде [14]

$$f(z, \alpha) = N f_0(z) \exp(-\alpha z), \quad (6)$$

где α – вариационный параметр, N – постоянная нормировки, $f_0(z)$ – волновая функция электрона в отсутствие электрического поля [20].

Энергия основного состояния дается выражением [21]

$$E = \langle f(z, \alpha_{\min}) | \hat{H} | f(z, \alpha_{\min}) \rangle, \quad (7)$$

где $\alpha_{\min}$ – значение вариационного параметра, которому соответствует минимальное значение энергии основного состояния.

3. Обсуждение

Рис.1 иллюстрирует влияние электрического поля на профиль симметричного потенциала Пешля–Теллера при $P = 0$, $T = 4$ К, $L = 100$ Å. Видно, что электрическое поле приводит к добавочной асимметрии потенциала, причем с увеличением напряженности поля положение минимума потенциала поднимается, а эффективная ширина КЯ уменьшается, что приводит к усилению локализации носителя заряда.

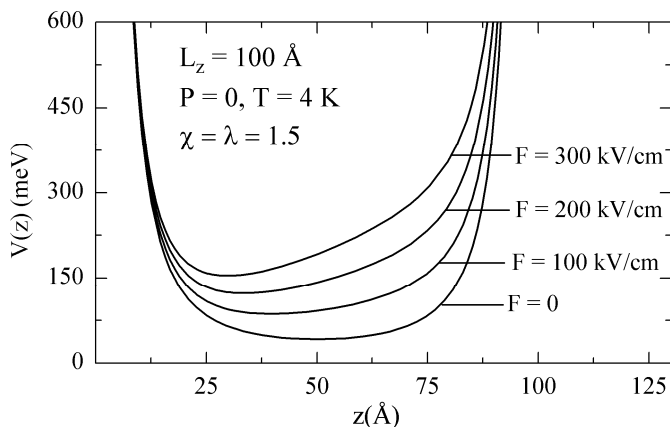


Рис.1. Форма потенциала Пешля–Теллера при различных значениях напряженности электрического поля.

На рис.2 представлены зависимости плотности вероятности распределения электрона в основном состоянии для различных значений

напряженности электрического поля (рис.2а) и параметра λ (рис.2б) при фиксированных значениях χ и L . Как видно из рисунка, увеличение электрического поля и параметра λ приводят к смещению максимумов плотности вероятности из центральной части КЯ влево и к их повышению, что обусловлено смещением минимума потенциала влево и, как следствие, усилением локализации электрона.

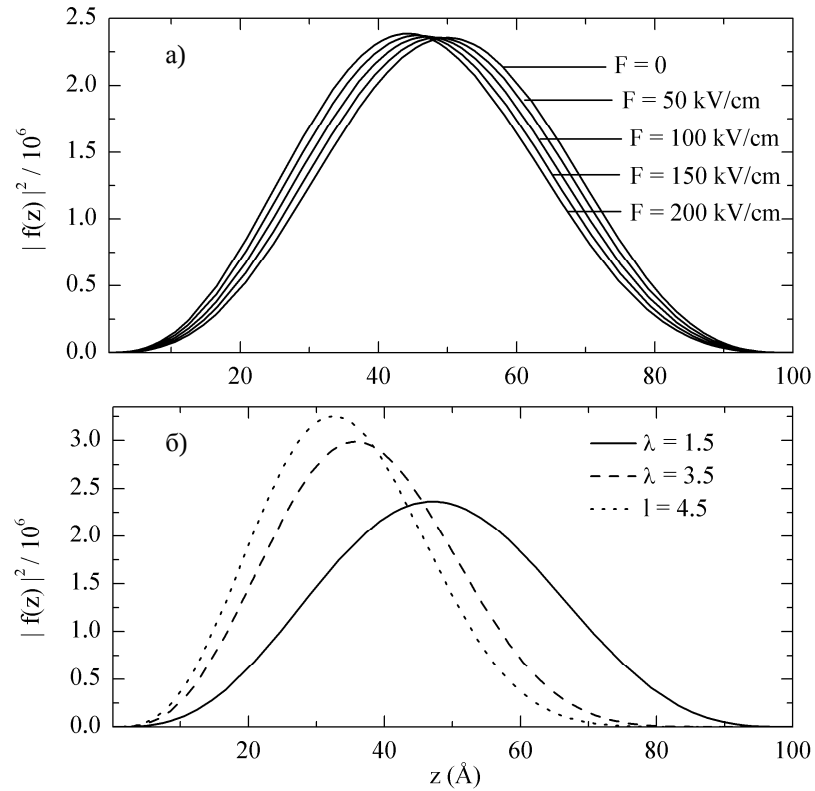


Рис.2. Зависимость плотности вероятности от координаты при различных значениях напряженности электрического поля (а) и параметра λ (б) при $P = 0$, $T = 4$ К.

На рис.3 приведены зависимости энергии основного состояния от напряженности электрического поля для различных значений параметра λ и ширины КЯ. Увеличение напряженности электрического поля приводит к увеличению энергии основного состояния, что обусловлено отмеченным выше усилением локализации с увеличением напряженности электрического поля (рис.1 и рис.2а). Из рис.3 также видно, что влияние электрического поля на энергию основного состояния больше для больших значений ширины КЯ, поскольку увеличение области локализации электрона приводит к ослаблению размерного квантования и усилению влияния электрического поля на электрон.

Увеличение параметра λ также приводит к увеличению энергии из-за сужения области локализации (рис.2б).

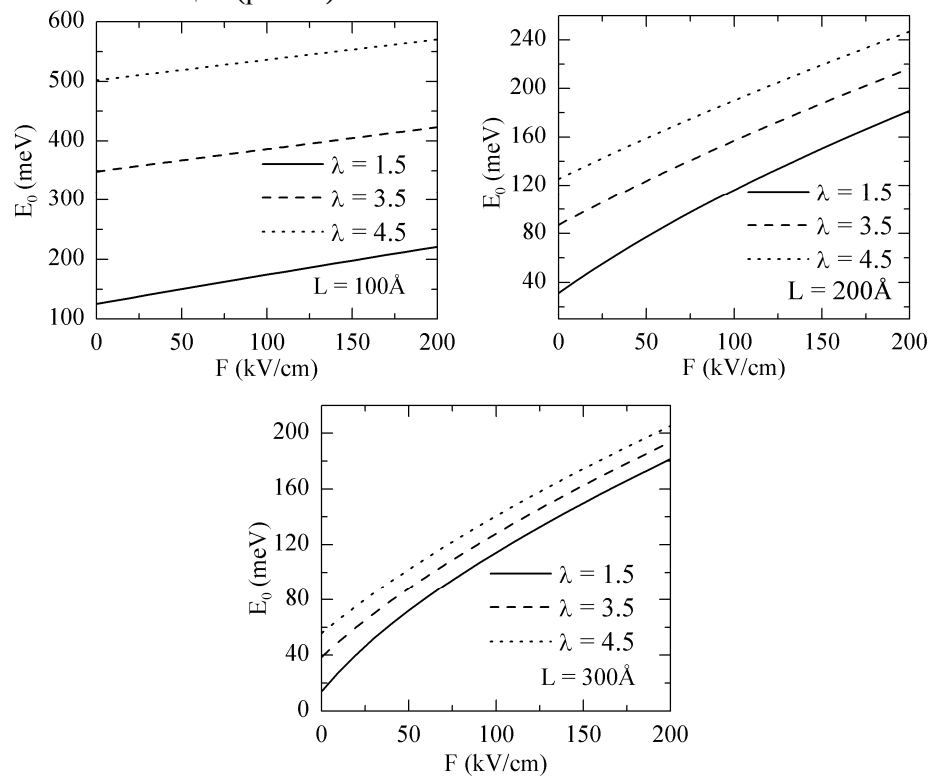


Рис.3. Зависимость энергии основного состояния от напряженности электрического поля при различных значениях параметра λ и ширины КЯ при $P = 0$, $T = 4 \text{ K}$.

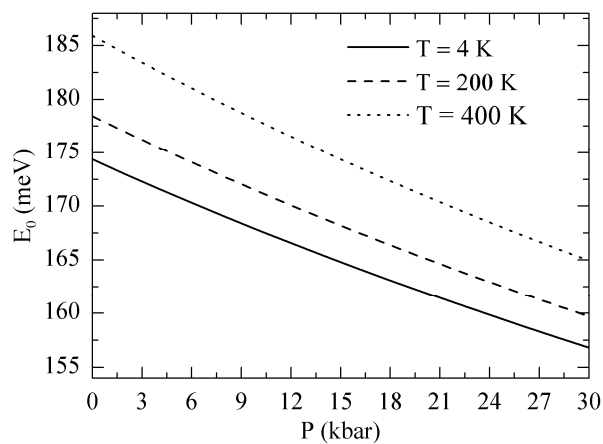


Рис.4. Зависимость энергии основного состояния от гидростатического давления для различных значений температуры при $\lambda = \chi = 1.5$, $L = 100 \text{ Å}$, $F = 100 \text{ кВ/см}$.

На рис.4 представлена зависимость энергии основного состояния от гидростатического давления для различных значений температуры. При увеличении гидростатического давления энергия электрона уменьшается, так как дно потенциала смещается вниз, и область локализации электрона увеличивается [16]. Повышение температуры при фиксированных значениях остальных параметров приводит к увеличению энергии основного состояния. Это обусловлено тем, что увеличение температуры приводит к повышению дна потенциала и, как следствие, к уменьшению области локализации электрона [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zh.I.Alferow**. Rev. Mod. Phys., **73**, 767 (2001).
2. **В.Н.Драгунов и др.** Основы наноэлектроники. Новосибирск, НГТУ, 2004.
3. **А.Н.Пихтин, О.С.Комков, К.В.Базаров**. ФТП, **40**, 608 (2006).
4. **О.Л.Лазаренкова, А.Н.Пихтин**. ФТП, **32**, 1108 (1998).
5. **K.F.Haiwi**, Superlatt. Microstruct., **20**, 173 (1996).
6. **H.Thien Cao, D.B.Tran Thoi**. Solid State Commun., **97**, 643 (1996).
7. **V.Narayani, B.Sukumar**. Solid State Commun., **90**, 579 (1994).
8. **C.A.Duque, A.Montes, A.L.Morales**. Physica B, **302/303**, 84 (2001).
9. **N.Porras-Montenegro, et al.** J. Appl. Phys., **74**, 7624 (1993).
10. **A.Montes, C.A.Duque, N.Porras-Montenegro**. J. Phys.: Cond. Matt., **10**, 5351 (1998).
11. **M.Chandrasekhar, H.R.Chandrasekhar**. High Pressure Res., **9**, 57 (1992).
12. **M.Chandrasekhar, H.R.Chandrasekhar**. Phil. Mag. B, **70**, 369 (1994).
13. **Doyeol Ahn, S.L.Chuang**. Appl. Phys. Lett., **49**, 1450 (1986).
14. **G.Bastard, E.E.Mendez, L.L.Chang, L.Esaki**. Phys. Rev. B, **28**, 3241 (1983).
15. **H.Yildirim, M.Tomak**. Eur. Phys. J. B, **50**, 559 (2006).
16. **Alireza Hakimyfard, M.G.Barseghyan, A.A.Kirakosyan**. Phys. E, **41**, 1596 (2009).
17. **A.L.Morales, A.Montes, S.Y.López, C.A.Duque**. J. Phys.: Cond. Matt., **14**, 987 (2002).
18. **Alireza Hakimyfard, M.G.Barseghyan, C.A.Duque, A.A.Kirakosyan**. Phys. B, **404**, 5159 (2009).
19. **A.M.Elabsy**. J. Phys.: Cond. Matt., **6**, 10025 (1994).
20. **З.Флюрге**. Задачи по квантовой механике, т.1. М., Мир, 1974.
21. **G.Bastard**. Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructure. Les Ulis Cedex France, 1998.

INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD, HYDROSTATIC PRESSURE AND TEMPERATURE ON THE ELECTRONIC STATES IN A PÖSCHL–TELLER QUANTUM WELL

A. HAKIMYFARD, M.G. BARSEGHYAN, C.A. DUQUE, A.A. KIRAKOSYAN

Influence of the electric field and hydrostatic pressure on the electronic states in a Pöschl–Teller quantum well is studied. In the framework of variational method the dependences of the ground state energy on the electric field and hydrostatic pressure are calculated for different values of the potential parameters and the temperature. It is shown that the increase in the electric field leads to the increase in the ground state energy, while the increase in the well width leads to the strengthening of the electric field effect. The ground state energy decreases with increasing pressure and increases with increasing temperature.