

01; 06

© 1992

ПОВЕДЕНИЕ ТАММОВСКИХ УРОВНЕЙ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

М.М. В р у б е л ь

В связи с работой [1], в которой впервые были экспериментально обнаружены таммовские состояния в сверхрешетках  $AlGaAs/GaAs$ , возрос интерес исследователей к этой проблеме [2-4].

Предлагаемая простая модель позволяет проанализировать поведение двух поверхностных состояний квантовой ямы в электростатическом поле, их взаимодействие с уровнями размерного квантования и друг с другом. Модель может быть обобщена для исследования поверхностных состояний, подобных рассматриваемым в [1, 2] в сверхрешетках в электростатическом поле.

Рассмотрим задачу в приближении огибающих волновых функций для случая эффективной массы. Будем решать уравнение Шредингера для электрона, движущегося в электрическом поле напряженности  $F$ :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} \Phi(z) - (E - eFz)\Phi(z) = 0, \quad (1)$$

где  $z$  - координата в направлении, перпендикулярном границе ямы,  $\Phi(z)$  - огибающая волновой функции,  $e$ ,  $m$ ,  $E$  - соответственно величина заряда, масса и энергия частицы,  $F$  - напряженность электрического поля. Произведем замену переменной [5]:

$$Z = - \left[ \frac{2m}{(e\hbar F)^2} \right]^{1/3} (E - eFz) \quad (2)$$

и уравнение (1) преобразуется в

$$\frac{d^2}{dZ^2} \Phi(Z) - Z\Phi(Z) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет решение

$$\Phi(Z) = a Ai(Z) + b Bi(Z), \quad (4)$$

где  $Ai(Z)$  и  $Bi(Z)$  - функции Эйри.

В качестве граничных условий выберем следующие [6, 7]:

$$\left( I + R \frac{d}{dz} \right) \Phi(z_0) = 0; \quad \left( I - R \frac{d}{dz} \right) \Phi(z_0 + L) = 0, \quad (5)$$

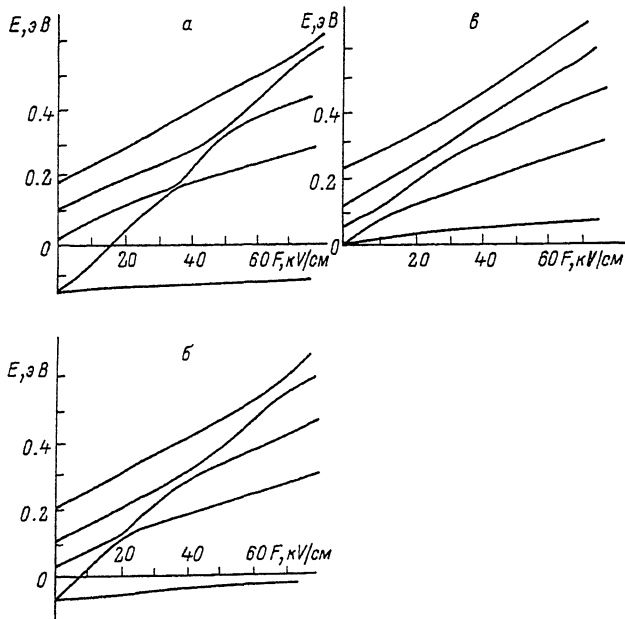


Рис. 1. Собственные значения энергий электронов в зависимости от напряженности электрического поля  $F$  для ямы шириной  $L = 1000 \text{ \AA}$ , (а)  $R = 100 \text{ \AA}$ , (б)  $R = 150 \text{ \AA}$ , (в)  $R = 1000 \text{ \AA}$ .

где  $L$  – ширина ямы,  $R$  – вещественная константа, имеющая размерность длины. Эти граничные условия выведены для поверхности трехмерного полупроводника, вблизи которой потенциал резко изменяется на атомных расстояниях, и сохраняют свой вид, когда в полупроводнике имеется дополнительный одномерный потенциал, медленно меняющийся на постоянной решетке. Для  $R$  предлагается [7] следующая грубая оценка:

$$R = \frac{k^2}{2mE_G} \quad (6)$$

где  $E_G$  – ширина запрещенной зоны.  $R$  характеризует возмущающее действие поверхности на электрон, расположенный у дна зоны проводимости, и является свободным параметром теории.

С учетом замены переменной граничные условия приобретают вид

$$\begin{aligned} \left( I - R \left[ \frac{2meF}{k^2} \right]^{1/3} \frac{d}{dz} \right) \Phi(z_0) &= 0, \\ \left( I - R \left[ \frac{2meF}{k^2} \right]^{1/3} \frac{d}{dz} \right) \Phi(z_L) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

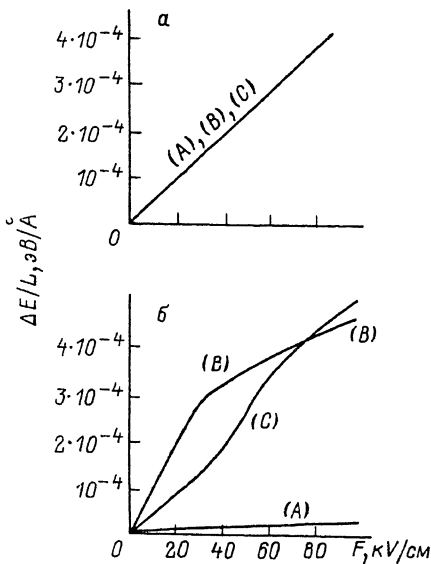


Рис. 2. Зависимость  $\Delta E/L$  от напряженности электрического поля, где  $\Delta E(F) = E(F) - E(0)$ , для двух поверхностных уровней ((A), (B)) и первого уровня размерного квантования ((C)) для  $R = 100 \text{ \AA}$ , (a)  $L = 10 \text{ \AA}$ , (б)  $L = 1000 \text{ \AA}$ .

Энергию  $E_0 = 0$  свяжем с левым краем ямы ( $z = z_0$ ).

В отсутствии электрического поля поверхностные уровни в достаточно большой яме ( $L = 1000 \text{ \AA}$ ,  $R = 100 \text{ \AA}$ ) являются практически вырожденными. Электрическое поле расщепляет их, причем вызванное электрическим полем дополнительное расщепление тем больше, чем меньше  $R$  и чем больше  $L$  для одинаковых значений напряженности поля. Кроме того, обнаруживается своеобразное „выталкивание” уровней друг другом с увеличением напряженности электрического поля: сперва один из поверхностных уровней занимает место первого уровня размерного квантования, при дальнейшем увеличении напряженности первый занимает место второго, и так далее (рис. 1). Следует отметить, что поверхностные уровни в широкой яме, практически вырожденные при  $F = 0$ , взаимодействуют с полем совершенно по-разному.

Зависимости, соответствующие рис. 1, остаются справедливыми с изменением  $L, R$  при условии  $L/R = \text{const}$  при соответствующей корректировке масштаба. Пусть  $L_1/L = R_1/R = n$ , тогда  $F/F_1 = n^2$ ,  $E/E_1 = n^3$ .

Графики, иллюстрирующие различия в характере зависимостей собственных значений энергий поверхностных уровней и первого уровня размерного квантования от напряженности электрического поля для разных значений  $L$  ( $L = 10; 1000 \text{ \AA}$ ) при одинаковом  $R = 100 \text{ \AA}$ , приведены на рис. 2. Для  $L = 10 \text{ \AA}$  изменение собст-

венных значений энергий под действием электрического поля практически одинаково для всех трех рассматриваемых уровней и приблизительно равно половине  $eU$ , где  $U$  — напряжение, приложенное к яме. По-другому обстоит дело для  $L = 1000 \text{ \AA}$ . Энергия нижнего поверхностного уровня меняется в электрическом поле меньше, чем энергия других уровней. Для остальных уровней существуют последовательно расположенные вдоль оси  $F$  участки, на которых изменение энергии с ростом напряженности приближается к  $eU$ .

С помощью предложенной модели можно исследовать поверхностные состояния сверхрешеток, помещая несколько периодов сверхрешетки в квантовую яму. Несложно преобразовать, подобно тому, как это сделано для случая эффективной массы, выведенные в [6, 7], граничные условия для двухзонного (кейновского) приближения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ohno H., Mendez E.E., Brum J.A., Agullo-Rueda F., Alexandrov A., Chang L.L., Esaki L. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. N 21. P. 2555-2558.
- [2] Steslicka M., Kuchaczuk R., Glasser M.L. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. N 2. P. 1458-1461.
- [3] Agullo-Rueda F., Mendez E.E., Ohno H., Hong J.M. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. N 2. P. 1470-1473.
- [4] Тиходеев С.Г. // ЖЭТФ. 1991. Т. 99. В. 6. С. 1871-1879.
- [5] Hutchings D.S. // Appl. Phys. Lett. V. 55. N 11. P. 1082-1084.
- [6] Волков В.А., Пинскер Т.Н. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. В. 6. С. 2268-2278.
- [7] Volkov V.A., Pinsker T.N. // Surf. Sci. 1979. V. 81. N 1. P. 181-192.

Белорусский  
государственный  
университет,  
Минск

Поступило в Редакцию  
24 января 1992 г.