

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.915

DOI: 10.17223/00213411/63/4/159

А.А. ВАСИЛЬЧЕНКО, Г.Ф. КОПЫТОВ

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКИ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ *

Ключевые слова: квантовая проволока, плотность электронов, уравнения Кона – Шэма.

В настоящее время большой интерес вызывают одномерные квантовые проволоки, свойства которых исследованы меньше, чем свойства квантовых ям и двумерных квантовых точек. В этих системах при низких плотностях электронов могут возникать такие явления, как вигнеровская кристаллизация, спонтанная поляризация электронов в нулевом магнитном поле, «0.7 аномалия» проводимости [1–3]. Перечисленные выше явления все ещё далеки до полного теоретического объяснения.

Значительный интерес проявляется к вигнеровской кристаллизации в двумерных электронных системах низкой плотности [4]. Численные расчеты [5] предсказывают, что вигнеровская кристаллизация ожидается в чрезвычайно разреженном электронном газе. Например, в случае двумерного электронного газа в GaAs переход к вигнеровскому кристаллу происходит при плотностях порядка $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Однако при таких плотностях электроны будут локализованы на примесном потенциале.

Считается, что в магнитном поле переход к вигнеровской кристаллизации происходит при больших плотностях, чем без магнитного поля. При факторе заполнения уровня Ландау меньше единицы в двумерном электронном газе может формироваться состояние вигнеровского кристалла – электроны могут локализоваться в некоторую регулярную структуру [6, 7]. Точные вычисления [6] показали, что в сильном магнитном поле плотность двумерных электронов является сильно неоднородной. Аналогичное явление может наблюдаться в квантовой проволоке. Для исследования электронной структуры квантовой проволоки используется теория функционала плотности с учетом только обменного взаимодействия в локальном приближении.

Рассмотрим одиночный квазиодномерный слой электронов в перпендикулярном магнитном поле. Внутри квантовой проволоки электроны удерживаются положительно заряженным фоном с двумерной плотностью n_p (n_p отлична от нуля при $|x| \leq a/2$, где a – ширина квантовой проволоки). Магнитное поле берется таким, чтобы все электроны были спин-поляризованными.

Далее используем атомную систему единиц, в которой энергия выражается в единицах $Ry = e^2/(2\epsilon a_B)$, а длина в единицах $a_B = \hbar^2/(m_e e^2)$, где m_e – эффективная масса электрона, ϵ – диэлектрическая проницаемость. Все вычисления будут проведены для двумерных квантовых проволок на основе GaAs, для которого $\epsilon = 12.4$ и $m_e = 0.067m_0$ (m_0 – масса свободного электрона). Для GaAs получаем $a_B = 9.8 \text{ нм}$, $Ry = 5.9 \text{ мэВ}$.

В атомной системе единиц уравнения Кона – Шэма имеют следующий вид:

$$-\frac{d^2 \psi_k(x)}{dx^2} + \frac{(x - kL^2)^2}{L^4} \psi_k(x) + V_{\text{eff}}(x) \psi_k(x) = E_k \psi_k(x), \tag{1}$$

где $V_{\text{eff}}(x) = V_H(x) + V_x(x)$, $V_H(x) = 4 \int_{-\infty}^{\infty} (n_p - n(x_1)) \ln|x - x_1| dx_1$, $V_x(x) = \frac{d(\epsilon_x(n) n)}{dn}$, $n(x) = \int_{-k_F}^{k_F} \frac{dk}{2\pi} \psi_k^2(x) dk$,

$k_F = \pi n_p a$, $\epsilon_x = \pi \sqrt{2\pi L n}$, L – магнитная длина.

Нелинейная система уравнений Кона – Шэма решалась численно при $n_p 2\pi L^2 = 1$ (для макроскопической системы это условие соответствует фактору заполнения $\nu = 1$). Результаты расчетов для GaAs квантовой проволоки приведены на рис. 1. Видно, что при низких плотностях электронная плотность имеет два максимума и в центре квантовой проволоки она практически равна нулю. В этом случае квантовая проволока разбивается на две туннельно-связанные проволоки. Этот эффект связан с увеличением роли обменного взаимодействия при понижении плотности электронов. С увеличением n_p плотность электронов отличается от n_p только вблизи границы квантовой проволоки. Проведенные вычисления для различных a показали, что с уменьшением a электронная плотность имеет один максимум (например, для $n_p = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ это происходит при $a < 56 \text{ нм}$).

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 17/26 Т.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>