

УДК 621.315.592

ИОНИЗАЦИЯ ДВУМЕРНОГО ЭКСИТОНА В ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. А. АРУТЮНЯН

Гюмрийский филиал Армянского государственного инженерного университета

(Поступила в редакцию 17 августа 1995 г.)

В квазиклассическом приближении рассчитана вероятность ионизации основного состояния двумерного экситона под воздействием однородного электрического поля. С уменьшением поля вероятность ионизации экспоненциально убывает. Понижение размерности системы приводит к более слабой предэкспоненциальной зависимости от напряженности внешнего поля, чем в трехмерном случае.

В ряде работ исследовано влияние однородного электрического поля на водородоподобные состояния экситонов различной размерности (см., например, [1—3]). В настоящей работе рассматривается ионизация двумерного экситона под действием внешнего электрического поля. Если направить внешнее поле по оси y : $\vec{E} = \mathcal{E}(0, \mathcal{E}, 0)$, то уравнение Шредингера, описывающее относительное движение электрона и дырки в параболических координатах на плоскости принимает следующий вид:

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 \Psi(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Psi(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} \right] + \left[(\xi^2 + \eta^2)E + \frac{1}{2} (\xi^4 - \eta^4)F + \right. \\ \left. + 2 \right] \Phi(\xi, \eta) = 0. \quad (1)$$

Здесь $\xi\eta = x$, $\frac{1}{2}(\xi^2 - \eta^2) = y$, $E = -|E|$ — энергия пары в плоскости, $F = e\mathcal{E}$, где e — заряд электрона. В уравнении (1) и далее пользуемся атомными единицами.

Для основного состояния имеем $E = -2$. и после разделения переменных в (1) получаем:

$$\frac{\partial^2 \Psi_1(\xi)}{\partial \xi^2} - 4\xi^2 \Psi_1(\xi) + F\xi^4 \Psi_1(\xi) + 2\Psi_1(\xi) = 0, \\ \frac{\partial^2 \Psi_2(\eta)}{\partial \eta^2} - 4\eta^2 \Psi_2(\eta) - F\eta^4 \Psi_2(\eta) + 2\Psi_2(\eta) = 0. \quad (2)$$

Из (2) ясно, что вследствие наличия потенциального барьера по «координате» ξ будет существовать конечная вероятность просачивания частицы в область $\xi \rightarrow \infty$. Предположим, что имеет место условие

$$F \ll 1. \quad (3)$$

Это—условие малости внешнего поля относительно поля «внутриатомного», что на практике всегда выполняется. При наличии условия (3) уравнения (2) можно решить исходя из того, что на малых расстояниях влиянием внешнего поля можно пренебречь и воспользоваться точными кулоновскими функциями. А в области, где влияние поля становится существенным, движение является квазиклассическим. После чего можно сшить кулоновскую квазиклассическую функцию с квазиклассической же функцией, но учитывающей уже и внешнее электрическое поле. Полевым слагаемым в (2) можно пренебречь, если

$$F\xi^4 \ll \max \{ 4\xi^2, 2 \}. \quad (4)$$

Так что в области $\xi \ll 2F^{-1/2} \gg 1$ в качестве волновой функции $\Psi_1(\xi)$ можно взять кулоновскую функцию основного состояния двумерного экситона:

$$\Psi_1(\xi) = \left| 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \right|^{1/2} \cdot e^{-\xi^2}. \quad (5)$$

Из вида потенциала

$$U(\xi) = 2\xi^2 - \frac{1}{2} F\xi^4. \quad (6)$$

следует, что при выполнении условия (3) движение будет квазиклассическим в области $\xi \gg 1$. Движение же по переменной η строго финитное, причем здесь можно ограничиться областью малых η , т. е. воспользоваться точными кулоновскими функциями вида (5). Для классических точек поворота соответственно имеем:

$$\xi_1 \cong 1; \xi_2 \cong \frac{2}{\sqrt{F}} \left(1 - \frac{F}{16} \right). \quad (7)$$

Так что для волновой функции правее барьера можем записать:

$$\Phi(\xi)|_{\xi > \xi_2} = \frac{\text{const}}{\sqrt{p(\xi)}} \exp \left\{ i \int_{\xi_2}^{\xi} p(\xi) d\xi + \frac{i\pi}{4} \right\}, \quad (8)$$

где $p(\xi) = (2 - 4\xi^2 + F\xi^4)^{1/2}$ — импульс, соответствующий движению в поле (6). Для определения окончательного вида волновой функции (8), учитывающей внешнее поле, „сошьем“ ее с кулоновской волновой функцией (5) в какой-либо точке ξ_0 внутри барьера, — такой, что $\xi_0 \gg 1$, но однако $F\xi_0^4 \ll \max \{ 4\xi_0^2, 2 \}$. После несложных вычислений, опускаемая ненужные в дальнейшем мнимые экспоненты, для $\Phi(\xi)$ получаем:

$$\Phi(\xi) = \left[2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi}} e^{-\xi^2}. \quad (9)$$

Для вероятности «вытягивания» экситона по направлению поля, вдоль оси y можем записать:

$$w = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x, y)|^2 v_y dx, \quad (10)$$

где v_y — скорость частицы в направлении поля, а полная волновая функция $\Psi(x, y)$ есть:

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) &= \Psi(\xi, \eta) = \Phi(\xi) \Psi_2(\eta), \\ \Psi_2(\eta) &= \left[2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \right] e^{-\eta^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом (3), (5), (9—11) для вероятности ионизации в единицу времени получаем

$$w = \frac{8e^{\frac{8}{F}}}{\pi \sqrt{F}}. \quad (12)$$

Или в обычных единицах:

$$w = \frac{8\mu^2 |e|^{13/2}}{\pi \hbar^5 \kappa^{7/2}} \cdot \frac{\exp\left\{-\frac{8\mu^2 |e|^5}{\kappa^3 \hbar^4 \mathcal{E}}\right\}}{\sqrt{\mathcal{E}}}, \quad (13)$$

где μ — приведенная эффективная масса электрона и дырки, κ — диэлектрическая проницаемость.

Как и следовало ожидать, с увеличением поля вероятность ионизации увеличивается. Однако предэкспоненциальная зависимость вероятности от напряженности внешнего поля оказывается слабее по сравнению со случаем массива: в двумерном случае имеем $\mathcal{E}^{-1/2}$ вместо \mathcal{E}^{-1} трехмерного случая. Подобный факт уменьшения влияния поля на процесс ионизации двумерного экситона обусловлен понижением размерности системы и соответствующим увеличением при этом энергии кулоновской связи электрона и дырки.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. G. Aronov and A. S. Ioselevich. Exciton Electrooptics. Chapter 7, 267 (1982).
2. A. S. Linssen, M. J. Gelten. J. Physics C 7, 2304 (1974).
3. В. А. Тягай, О. В. Снитко. Электроотражение света в полупроводниках, Киев, «Наукова думка», 1980.

ԵՐԿԶԱՓ ԷՔՍԻՏՈՆԻ ԻՈՆԱՅՈՒՄԸ ՀԱՄԱՍԵՌ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏՈՒՄ

Վ. Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Քվադրիդասական մոտավորությամբ հաշվարկված է երկչափ էքսիտոնի իոնացման հավանականությունը համասեռ էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ: Իոնացման հավանականությունը դաշտի փոքրացման հետ էքսպոնենցիալ նվազում է:

IONIZATION OF TWO-DIMENSIONAL EXCITON IN A HOMOGENEOUS ELECTRICAL FIELD

V. A. HAROUTUNIAN

The probability of two-dimensional exciton's ionization in a homogeneous electrical field is calculated using the quasi-classical approximation. The probability of ionization reduces exponentially with the decrease of electrical field.