

## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ДЫРОК В КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ПРОВОДНИКОВ

В. С. Филинов<sup>1</sup>, М. Бониц<sup>2</sup>, П. Р. Левашов<sup>1</sup>, Х. Феске<sup>3</sup>, В. Е. Фортов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт теоретической физики и астрофизики, Киль, Германия*

<sup>3</sup>*Институт физики, Грайфсвальд, Германия*

В работе представлены результаты расчетов кристаллизации в двухкомпонентной полностью квантовой электронно-дырочной плазме полупроводников при низких температурах. Расчеты проводились квантовым методом Монте-Карло, эффективные массы электронов и дырок считались постоянными. При достаточно высокой концентрации электронов возможно упорядочивание дырок в периодическую структуру. Расчеты показали, что существование дырочного кристалла зависит от температуры, плотности и отношения масс дырки и электрона. Так, в трехмерном случае при отношении масс  $M = 800$  дырки формируют кристалл, при  $M = 50-100$  кристалл плавится, при  $M = 50$  дырочная структура напоминает жидкость, а при  $M = 1$  – газ. В результате анализа корреляционных функций продемонстрировано, что электронная плотность в квазипериодическом потенциальном поле дырочного кристалла распределена неравномерно, в частности, электрон-электронные корреляционные функции имеют максимумы на малых расстояниях. Плавление кристалла удовлетворяет критерию Линдемманна. При низких температурах и фиксированной плотности дырки могут сформировать антиферромагнитную структуру, состоящую из двух вложенных дырочных решеток, каждая из которых включает дырки с одной и той же проекцией спина. Устойчивость такой системы обеспечивается сильным ферми-отталкиванием частиц с одинаково направленными спинами. Результаты расчетов могут быть полезны для объяснения кристаллизации и в других кулоновских двухкомпонентных системах, в частности, в белых карликах, нейтронных звездах, ионных кристаллах в ловушках и т.п.

# CRYSTALLIZATION OF HOLES IN QUANTUM ELECTRON-HOLE PLASMA OF SEMICONDUCTORS

V. S. Filinov<sup>1</sup>, M. Bonitz<sup>2</sup>, P. R. Levashov<sup>1</sup>, H. Fehske<sup>3</sup>, V. E. Fortov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for High Energy Densities RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Kiel, Germany*

<sup>3</sup>*Institut für Physik, Greifswald, Germany*

In this work we present the results of calculation of crystallization in two-component wholly quantum electron-hole plasma of semiconductors at low temperatures. The simulation has been carried out using the direct path integral Monte Carlo method with constant effective masses of electron and hole. At relatively high concentration of electrons it is possible for the holes to form a periodic structure. The calculations have shown that the existence of the hole crystal depends on temperature, density and hole-electron mass ratio. Thus in 3D case at mass ratio  $M = 800$  the holes form the crystal, at  $M = 50 \div 100$  the crystal melts, at  $M = 50$  the hole structure resembles liquid, and at  $M = 1$  – gas. Analyzing the distribution functions we demonstrate that the electron density in quasi-periodic potential field of the hole structure is distributed non-uniformly, in particular, electron-electron distribution functions have maxima at low distance. The crystal melting obeys the Lindemann criterion. At low temperatures and fixed density the holes can form antiferromagnetic structure composed by two hole lattices each consisting of the holes with the same spin projection. The stability of such system is determined by a strong Fermi-repulsion of particles with the same spin projection. The results of calculations can be useful for the explanation of crystallization phenomena in other two-component Coulomb systems, in particular, white dwarfs, neutron stars, ion crystals in traps etc.