

эмиссии электронов из металлов под действием коротких (фемтосекундных) и мощных лазерных импульсов. Наряду с эмиссией при одновременном поглощении нескольких фотонов, сравнительно недавно было обнаружено, что эмитированные электроны приобретают дополнительную энергию в переменном электрическом поле электромагнитной волны, действие которой многократно усиливается резонансным возбуждением поверхностных плазмонов. Таким образом, для объяснения этого эффекта привычную квантовую картину однофотонной и многофотонной фотоэмиссии необходимо дополнить классическими представлениями об ускорении электронов электрическими полями поверхностных плазмонов.

Литература

- [1] Д. Бриггс, М. П. Сих, *Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии*, М.: Мир, 1987.
- [2] Р. Л. Белл. *Эмиттеры с отрицательным электронным сродством*. М.: Энергия, 1978. 192 с.
- [3] Л. А. Ашкинази, Эмиссия? «Это просто» *Естеств. науки*, http://lit.lib.ru/a/ashkinazi_1_a/text_0030.shtml.
- [4] D. A. Orlov, M. Hoppe, U. Weigel, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2721 (2001).
- [5] V. V. Bakin, A. A. Pakhnevich, A. G. Zhuravlev, *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **5**, 80 (2007).
- [6] A. G. Zhuravlev, A. S. Romanov, V. L. Alperovich, *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 251602 (2014).
- [7] J. Kupersztych, P. Monchicourt, M. Raynaud, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5180 (2001).

Пространственно прямая и непрямая (диполярная) электронно-дырочные жидкости в гетероструктурах Si/SiGe II рода

Н.Н. Сибельдин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Конденсация экситонного газа в квантовую электронно-дырочную жидкость (ЭДЖ) и свойства ЭДЖ основательно исследованы в объемных полупроводниках, и более всего в германии и кремнии, поскольку в этих материалах благодаря особенностям зонной структуры ЭДЖ обладает высокой стабильностью. ЭДЖ отличается целым рядом замечательных свойств, о некоторых из которых будет рассказано в порядке введения. Сведения о ЭДЖ в объемных материалах можно найти в ряде обзоров (например, [1–5]).

Исследования этого явления в низкоразмерных структурах немногочисленны. В то же время, теория предсказывает не только появление новых

свойств, а и возможность образования жидкостей различных типов, пространственная структура и основные термодинамические параметры которых определяется размерностью, дизайном и устройством энергетических зон низкоразмерной структуры. Так, например, возможно образование пространственно неоднородных сильно анизотропных ЭДЖ: слоистых в структурах с периодически повторяющимися квантовыми ямами (КЯ) и квазидвумерных в системе параллельных квантовых нитей [6]. Последняя система формально эквивалентна случаю сильного магнитного поля в объемном материале [6,7], которое стабилизирует ЭДЖ. Экспериментально стабилизация ЭДЖ магнитным полем продемонстрирована в работах [8–11] (см. также обзор [12]).

В этой лекции мы подробнее остановимся на конденсации экситонов и образовании ЭДЖ в гетероструктурах на основе кремния и германия, использование которых позволяет реализовать условия для наблюдения как пространственно прямой (электроны и дырки заселяют КЯ в одном и том же слое структуры), так и пространственно непрямоугольной (электроны и дырки пространственно разделены) квазидвумерной жидкости. Пространственно непрямоугольная (дипольная) ЭДЖ рассмотрена теоретически в работах [13,14].

Квазидвумерная пространственно прямая ЭДЖ впервые наблюдалась в гетероструктурах Si/SiO₂ [15,16], которые являются гетероструктурами I рода с глубокими КЯ для электронов и дырок. Структуры Si/Si_{1-x}Ge_x/Si, о которых речь пойдет ниже, представляют собой гетероструктуры II рода с достаточно глубокой КЯ для дырок и относительно невысоким (при малых x) барьером для электронов в области, занимаемой напряженным SiGe-слоем. Взаимодействуя с дырками, электроны могут проникать в барьерный слой. Варьируя его состав и толщину можно изменять туннельную прозрачность барьера и получать как системы с пространственно прямыми, так и с пространственно непрямыми (дипольными) экситонами. Пространственно прямая ЭДЖ в структурах с туннельно прозрачным барьером экспериментально обнаружена и исследована в работах [17–22]. В структурах с туннельно непрозрачным для электронов барьером наблюдалась дипольная ЭДЖ, дырки которой находятся в слое твердого раствора, а электроны — в слоях кремния вблизи гетерограниц с SiGe-слоем [22]. Энергия связи и критическая температура дипольной ЭДЖ существенно ниже, чем пространственно прямой жидкости. Ранее дипольная ЭДЖ была обнаружена и изучена в двойных КЯ структур GaAs/AlGaAs [23].

Литература

- [1] T.M. Rice, *Solid State Physics* **32**, 1 (1977); J.C. Hensel, T.G. Phillips, and G.A. Thomas, *Ibid*, p. 87. Перевод: Т. Райс, Дж. Хенсел, Т. Филипс, Г. Томас, *Электронно-*

- дырочная жидкость в полупроводниках*, Мир, М., 1980.
- [2] *The Electron-Hole Drops in Semiconductors*, in: Modern Problems in Condensed Matter Sciences, Vol. **6**, Eds. C.D. Jeffries and L.V. Keldysh, North-Holland, Amsterdam, 1983. Перевод: *Электронно-дырочные капли в полупроводниках*, под ред. К.Д. Джеффриса и Л.В. Келдыша, Наука, М., 1988.
- [3] L.V. Keldysh and N.N. Sibeldin, *Ibid*, Vol. **16**, Eds. W. Eisenmenger and A.A. Kaplyanskii, 1986, p. 455.
- [4] С.Г. Тиходеев, УФН **145**, 3 (1985).
- [5] N.N. Sibeldin, in: *Problems of Condensed Matter Physics: Quantum coherence phenomena in electron-hole and coupled matter-light systems*, Vol. **139**, Eds. A.L. Ivanov and S.G. Tikhodeev, University Press, Oxford, 2008, p. 227.
- [6] Е.А. Андриюшин, В.С. Бабиченко, Л.В. Келдыш и др., Письма в ЖЭТФ **24**, 210 (1976).
- [7] Л.В. Келдыш, Т.А. Онищенко, Письма в ЖЭТФ **24**, 70 (1976).
- [8] И.В. Кавецкая, Я.Я. Кость, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков, Письма в ЖЭТФ **36**, 254 (1982).
- [9] I.V. Kavetskaaya, N.N. Sibeldin, V.A. Tsvetkov, *Solid State Commun.* **97**, 157 (1996).
- [10] И.В. Кавецкая, Н.В. Замковец, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков, ЖЭТФ **111**, 737 (1997).
- [11] А.В. Черненко, В.Б. Тимофеев, ЖЭТФ **112**, 1091 (1997).
- [12] Н.Н. Сибельдин, УФН **173**, 999 (2003).
- [13] Е.А. Андриюшин, ФТТ **18**, 2493 (1976).
- [14] Ю.Е. Лозовик, О.Л. Берман, ЖЭТФ **111**, 1879 (1997).
- [15] N. Pauc, V. Calvo, J. Eumery *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 236802 (2004).
- [16] N. Pauc, V. Calvo, J. Eumery *et al.*, *Phys. Rev. B* **72**, 205324 (2005).
- [17] Т.М. Бурбаев, Е.А. Бобрик, В.А. Курбатов и др., Письма в ЖЭТФ **85**, 410 (2007).
- [18] V.S. Bagaev, V.S. Krivobok, S.N. Nikolaev *et al.*, *Phys. Rev. B* **82**, 115313 (2010).
- [19] Т.М. Бурбаев, М.Н. Гордеев, Д.Н. Лобанов и др., Письма в ЖЭТФ **92**, 341 (2010).
- [20] В.С. Багаев, В.С. Кривобок, С.Н. Николаев и др., Письма в ЖЭТФ **94**, 63 (2011).
- [21] В.С. Багаев, В.С. Кривобок, С.Н. Николаев и др., ЖЭТФ **144**, 1045 (2013).
- [22] Т.М. Бурбаев, Д.С. Козырев, Н.Н. Сибельдин, М.Л.Скориков, ЖЭТФ **98**, 926 (2013).
- [23] V.B. Timofeev, A.V. Larionov, M. Grassi-Alessi *et al.*, *Phys. Rev. B* **61**, 8420 (2000).

A general theory of everything

D.R. Khokhlov

Physics Department, M.V. Lomonosov Moscow State University,
P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

The special and the general theories of high jumps have been developed. It is demonstrated that many, if not all, phenomena observed in nano-, bio-, info-,