

$\phi = \pi$  он будет одинаков. Однако, в процессе изменения  $\phi$  от  $-\pi$  до  $\pi$  фаза амплитудного коэффициента могла измениться на  $2\pi m$ , где  $m$  — целое число, представляющее собой топологический инвариант, характеризующий данную запрещенную зону. Число оборотов фазы коэффициента отражения определяет, сколько краевых состояний пересекает данную запрещенную зону при изменении параметра  $\phi$ . Оказывается, что число Черна разрешенной зоны равно разнице чисел оборотов фазы для запрещенных зон, лежащих над и под ней. Описанная выше связь между фазой коэффициента отражения и топологическими инвариантами носит достаточно общий характер и может быть обнаружена в различных физических системах.

Работа выполнена при поддержке фонда «Династия».

## Литература

- [1] M.Z. Hasan and C.L. Kane, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045 (2010).
- [2] L. Lu, J.D. Joannopoulos, and M. Soljačić, *Nat. Photonics* **8**, 821 (2014).
- [3] Y.E. Kraus, Y. Lahini, Z. Ringel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 106402 (2012).
- [4] A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, L. Pilozzi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 107403 (2014).
- [5] A. Poddubny, A. Miroschnichenko, A. Slobozhanyuk, *et al.*, *ACS Photonics* **1**, 101 (2014).
- [6] A.B. Khanikaev, S.H. Mousavi, W.-K. Tse *et al.*, *Nat. Mater.* **12**, 233 (2012).
- [7] M.C. Rechtsman, J.M. Zeuner, Y. Plotnik *et al.*, *Nature (London)* **496**, 196 (2013).
- [8] M. Hafezi, S. Mittal, J. Fan *et al.*, *Nat. Photonics* **7**, 1001 (2013).
- [9] S.A. Dyakov, A. Baldycheva, T.S. Perova *et al.*, *Phys. Rev. B* **86**, 115126 (2012).
- [10] A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, and S.A. Tarasenko, *Phys. Rev. B* **86**, 205304 (2012).
- [11] L.-J. Lang, X. Cai, and S. Chen, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 220401 (2012).

## Фотоэмиссия из полупроводников: проблемы физики поверхности и практические приложения

*В.Л. Альперович*

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Основные закономерности фотоэмиссии электронов из твердых тел, экспериментально обнаруженной Герцем в 1887 году, были объяснены Эйнштейном 110 лет назад, в 1905 году. С тех пор фотоэмиссия изучена для широкого круга металлов и полупроводников и стала основой метода фотоэлектронной

(фотоэмиссионной) спектроскопии, позволяющего определять химический состав и электронную структуру объема и поверхности материалов по энергетическим распределениям эмитированных электронов. Развитие этого метода в последние десятилетия связано с использованием новых источников ультрафиолетового и рентгеновского излучения, таких как синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах, а также с совершенствованием анализаторов энергии, импульса и спина эмитированных электронов. Фотоэмиссия лежит в основе многих важных приборов: фотоэлектронных умножителей с высоким квантовым выходом, электронно-оптических преобразователей, источников ультра-холодных и спин-поляризованных электронов. Эти приборы широко используются для научных исследований в физике элементарных частиц, астрономии, физике твердого тела, биологии и медицине; в космической и военной технике, в системах безопасности и аппаратуре для контроля за состоянием окружающей среды. Создание фотоэмиссионных приборов с высоким квантовым выходом (до  $\sim 50\%$ ) стало возможным благодаря изобретению полвека назад полупроводниковых фотокатодов с отрицательным эффективным электронным сродством, в которых, благодаря снижению работы выхода за счет адсорбции цезия и кислорода, уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости в объеме полупроводника.

Несмотря на многолетние исследования и прикладные разработки, многие вопросы физики фотоэмиссии остаются непонятными, а параметры приборов все ещё далеки от теоретически возможных. В этой лекции будут рассмотрены основы физики фотоэмиссии и фотоэмиссионных приборов, а также обсуждены вопросы, на которые до сих пор нет ясных и однозначных ответов. Фотоэмиссия обычно рассматривается в рамках «трехступенчатой» модели: (1) возбуждение электронов фотонами в объеме кристалла; (2) транспорт фотовозбужденных электронов к эмитирующей поверхности; (3) эмиссия электронов из кристалла в вакуум. Этапы фотовозбуждения и транспорта фотоэлектронов в объеме кристалла хорошо изучены и поняты, однако в том, как происходит перенос электронов через границу кристалла с вакуумом, до сих пор много неясного. Какова вероятность выхода электрона из кристалла в вакуум и можно ли эту вероятность рассчитывать в приближении эффективных масс? Насколько существенно квантово-механическое отражение электронов от эмитирующей поверхности? Какую роль играют процессы рассеяния энергии, импульса и спина при переходе электронов через границу раздела с вакуумом? Каковы микроскопические механизмы такого рассеяния? Возможности получить ответы на эти вопросы мы рассмотрим для наиболее хорошо изученной и важной для приборных применений системы p-GaAs со слоями цезия и кислорода. Интересные явления наблюдаются при фото-

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](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. Kupersztynch, 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