

## Из истории открытия биэкситонов в полупроводниках

Период с 1970 по 2000 год ознаменовался бурным ростом числа работ по физике экситонов и биэкситонов большой плотности в полупроводниках, открытием и поиском новых форм существования электронно-дырочных систем в полупроводниках, таких, как электронно-дырочная жидкость и электронно-дырочные капли, предсказанные Л.В. Келдышем [1] и вскоре обнаруженные экспериментально в многодолинных полупроводниках Ge и Si, а также таких, как многоэкситонные комплексы, локализованные на примесях, обнаруженные и исследованные Я.Е. Покровским, А.С. Каминским и К.И. Сви-стуновой [2] (отмечены присуждением диплома на открытие). В этом ряду следует упомянуть и работы по обнаружению биэкситонов и биэкситонного расщепления линий оптического поглощения в молекулярных кристаллах, принадлежащие А.Ф. Прихотько, Ю.Б. Гайдидею, В.М. Локтеву и Л.И. Шанскому [3].

Описание предполагаемого открытия NOT-9020, поданное С.А. Москаленко и А.И. Бобрышевой, содержало 16 страниц, 52 ссылки на литературу и имело следующую формулу открытия: «Теоретически установлено неизвестное ранее явление возникновения связанной системы двух экситонов или биэкситона, обусловленной непосредственным кулоновским взаимодействием электронов и дырок и косвенным взаимодействием через фононы».

Работа С.А. Москаленко [4] по данному вопросу «К теории экситона Мотта в щелочно-галогенидных кристаллах» опубликована в журнале «Оптика и спектроскопия», том V, № 2 (февраль), стр. 147–155 за 1958 год (дата поступления – 12 июля 1957 г.). В статье рассматривается много-электронная теория экситона Мотта в щелочно-галогенидных кристаллах в узельном представлении, когда электрон и дырка одного экситона находятся в узлах  $G$  и  $H$  соответственно. Описание велось на основе полярной модели металла, разработанной Н.Н. Боголюбовым [5]. На страницах 151 и 152 статьи (имеются в виду выполненные расчеты интегралов прямого кулоновского взаимодействия) сделано следующее утверждение, составляющее предмет открытия.

Легко показать, что при возникновении двух экситонов в кристалле (в узлах  $G_1H_1$  одного и в узлах  $G_2H_2$  другого экситона) существует энергия кулоновского притяжения между ними:

$$W = F(G_1, G_2; G_1, G_2) + F(H_1M_1, H_2M_2; H_1M_1, H_2M_2) - F(G_1, H_2M_2; G_1H_2M_2) - F(G_2, H_1M_1; G_2H_1M_1).$$

Так как средние расстояния между двумя экситонами велики, обменное взаимодействие

между ними можно не учитывать. Выражение совпадает по форме с выражением для энергии взаимодействия двух атомов водорода: первые два члена выражают энергию взаимодействия электрон-электрон и дырка-дырка, а 3-й и 4-й члены – энергию притяжения электрона 1-го экситона с дыркой 2-го экситона, и наоборот.

Не исключена возможность спаривания экситонов в кристалле, если энергия их взаимодействия  $W$  обнаружит достаточно глубокий минимум при некотором расстоянии между экситонами. В таком случае при достаточно больших концентрациях экситонов в кристалле может наблюдаться спектр экситонного поглощения, похожий на спектр молекулы водорода.

Первые теоретические расчеты энергии связи биэкситона в трехмерном кристалле (3D) с учетом кулоновского взаимодействия между электронами и дырками, входящими в состав двух экситонов, а также с учетом их косвенного взаимодействия через фононы были выполнены А.И. Бобрышевой в 1964–1966 годах. Основная работа А.И. Бобрышевой, включенная в заявку на открытие, называлась «Взаимодействие двух экситонов в кристалле» и была опубликована в Phys. Stat. Sol. (b), 16, 337 (1966) [6].

Ранее были опубликованы работы по взаимодействию двух экситонов Трлифая (1963) [7] и Чеснута (1964) [8]. Но они относились к линейной молекулярной цепочке и не могли быть применимы к 3D электронно-дырочным системам, хотя и учитывали взаимодействие с фононами. В работе Хиллерааса и Оре [9] содержится вариационный расчет стабильности молекулы позитрония. Но в этой системе отсутствуют фононы. Поэтому были необходимы исследования А.И. Бобрышевой стабильности биэкситона в полупроводниках. Впоследствии выяснилось, что не все эксперты-рецензенты обратили на это внимание. В ряде отзывов значение работ А.И. Бобрышевой было недооценено.

Как будет видно из дальнейшего, основной упрек в адрес работы [4], который имеется в некоторых отзывах экспертов-рецензентов, – это осторожная форма высказывания, хотя и совершенно четкая и понятная формулировка ожидаемого нового явления. Имеются сопоставления работы [4] с работой М.А. Ламперта [10]: «Мобильные и иммобильные комплексы частиц с эффективной массой в неметаллических твердых телах». При обсуждении стабильности экситонной модели М.А. Ламперт сопоставил её не только с молекулой водорода, но и с молекулой позитрония. В работе М.А. Ламперта имеются ссылки на работы Е.А. Хиллерааса и А. Оре, по-

священные молекуле позитрония, которые отсутствуют в работе [4]. Это связано с тем, что к тому времени молекула позитрония не была обнаружена экспериментально и сопоставление в работе [4] проводилось только с молекулой водорода. С другой стороны, электрон-фононное взаимодействие играет важную роль в кристаллах и совершенно не было учтено в работе Ламперта [10]. К тому же работа М.А. Ламперта поступила в печать в ноябре 1958 года, то есть на 1 год и 4 месяца позже, чем [4], и была опубликована в декабре 1958, то есть на 9 месяцев позже, чем [4]. Эти обстоятельства играют роль при определении приоритета данной работы.

Заявка на предполагаемое открытие «Биэкситон» прошла экспертизу в крупнейших научных физических институтах Академии наук СССР.

Авторы гордятся честью, оказанной их заявке на открытие «Биэкситон», пройти суровую и нелицеприятную экспертизу в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР, Институте физики твердого тела АН СССР, в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау АН СССР, в Научном совете АН СССР по проблеме «Теория твердого тела», в Институте радиотехники и электроники АН СССР и в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе АН СССР. Отзывы, полученные в этих институтах АН СССР, были высланы в адрес ИПФ АНМ ГКИО в мае 1981 года (копии хранятся в редакции ЭОМ).

Развитие физики полупроводников при больших уровнях возбуждения и низких температурах в последующие 1981–1987 годы, сотрудничество между коллективами исследователей различных физических институтов СССР привели к выработке общих точек зрения, общих оценок полученных результатов и к возможности выдвижения коллектива из 9 исследователей многоэкситонных комплексов, включая и биэксито-

ны в полупроводниках, на соискание Государственной премии СССР в области науки и техники.

Выдвижение поддержал Президиум АН СССР, и в газете «Известия» за 1988 г. была опубликована статья в поддержку этого выдвижения, подписанная академиками Ж.И. Алфёровым (ФТИ), Ю.В. Гуляевым (ИРЭ), Л.В. Келдышем (ФИАН) и Ю.А. Осипьяном (ИФТТ). Государственная премия была присуждена в 1988 году. Коллектив авторов перечислен в копии диплома, приведенной ниже.

Присуждение столь высокой награды означает признание *de facto* и на высшем уровне заслуг Института прикладной физики АНМ в открытии и исследовании биэкситонов в полупроводниках. Но самое главное – физика экситонов и биэкситонов большой плотности в полупроводниках стала одной из развитых областей современной физики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Келдыш Л.В. *Труды девятой Международной конференции по физике полупроводников*. Ленинград: Наука, 1969, том 2.
2. Pokrovskii Ya.E. *Phys. Stat. Sol. (b)*. 1972, **11**, 385.
3. Гайдидей Ю.Б., Локтев В.М., Прихотько А.Ф., Шанский Л.И. *Письма в ЖЭТФ*. 1973, **18**(3), 164.
4. Москаленко С.А. *Оптика и спектроскопия*. 1958, **5**(2), 147.
5. Боголюбов Н.Н. *Лекции по квантовой статистике*. Київ: Радянська школа, 1949.
6. Bobrysheva A.I. *Phys. Stat. Sol. (b)*. 1966, **16**, 337.
7. Trlifaj M. *Czech. J. Phys.* 1963, **13**, 631.
8. Chessnut D.B. *J. Chem. Phys.* 1964, **41**, 472.
9. Hylleraas E. and Ore A. *Phys. Rev.* 1947, **71**, 493.
10. Lampert M.A. *Phys. Rev. Lett.* 1958, **1**(12), 450.

