

537.31.33(049.3)

### ЭКСИТОНЫ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

**Exciton at High Density.** (Springer Tracts in Modern Physics/Ergebnisse der exakten Naturwissenschaft. 73.) Berlin—Heidelberg—New York, Springer-Verlag, 1975, 303 p.

Усовершенствование технологии получения чистых и совершенных кристаллов и успехи лазерной техники открыли новую область физики твердого тела — изучение свойств полупроводников при высоких концентрациях экситонов или пар свободных носителей — электронов и дырок. Эти исследования начались с 1966 г., когда Хайнс (J. R. Haynes) обнаружил в спектрах люминесценции Si при высоких уровнях накачки новую А-линию, которую он приписал рекомбинации биэкситонов, т. е. экситонных молекул, возможность образования которых была предсказана еще в 1958 г. С. А. Москаленко и Лампертом (M. A. Lampert).

В 1967 г. В. М. Аснин, А. А. Рогачев и С. М. Рывкин обнаружили, что при больших уровнях накачки экситонный газ в Ge металлизуется, образуя проводящую электронно-дырочную плазму. Обсуждая результаты этих экспериментов, Л. В. Келдыш в 1968 г. предсказал, что конденсация экситонов должна происходить путем образования проводящих электронно-дырочных капель (ЭДК), появляющихся при достижении критической концентрации экситонов аналогично конденсации пара в жидкость.

Первые доказательства существования ЭДК были получены в 1969 г. В. М. Асниным и А. А. Рогачевым, которые обнаружили изменение спектров поглощения, связанных с образованием прямого экситона в Ge, при больших концентрациях непрямых экситонов, свидетельствующее о том, что в образце в этих условиях появляются локализованные области, заполненные плазмой, где экситоны не могут существовать из-за экранировки кулоновского взаимодействия.

Одновременно Я. Е. Покровский и К. И. Свистунова обнаружили в спектре излучения Ge новую А-линию, появляющуюся при высоких уровнях накачки, и показали, что форма и температурная зависимость интенсивности этой линии свидетельствуют о том, что она связана с рекомбинацией пар в ЭДК. Несколько позже В. С. Багаев, Т. И. Галкина, О. В. Гаголин и Л. В. Келдыш исследовали поведение этой линии во внешних полях и получили новые доказательства ее принадлежности ЭДК. В связи с этим Я. Е. Покровским было высказано предположение, что открытая Хейнсом А-линия в Si также связана с рекомбинацией пар в ЭДК, а не биэкситонов.

Тогда же В. С. Вавилов, В. И. Мурзин и В. А. Заяц обнаружили в спектрах поглощения СВЧ в Ge новую линию, появляющуюся одновременно с А-линией излучения, которую удалось интерпретировать как плазменный резонанс в поглощении СВЧ.

Эти работы положили начало изучению ЭДК в Ge и Si.

В 1968—1970 гг. в спектрах излучения CuCl и CuBr Никитиным (S. Nikitine) и его сотрудниками была обнаружена новая М-линия, приписанная ими рекомбинации биэкситонов. Позже подобные линии были обнаружены в спектрах излучения CdS и CdSe, где также были открыты Р- и Р<sub>М</sub>-линии, связанные с рекомбинацией экситонов или биэкситонов при их столкновениях с образованием соответственно свободной пары или трех свободных экситонов.

При больших концентрациях экситонов также наблюдались бозе-конденсация экситонов (предсказанная в 1960 г. С. А. Москаленко и обнаруженная в 1970 г. Е. Ф. Гроссом и И. Х. Акоюном и Б. С. Разбириным), биэкситонов, стимулированное излучение при распаде экситона с излучением фонона или при столкновениях с другими экситонами, стимулированное излучение биэкситонов, фоторождение биэкситона, т. е. генерация экситона с одновременным его связыванием с другим свободным экситоном, а также прямая генерация биэкситонов при поглощении одного или двух фотонов.

Заметим, что вопрос о природе ряда указанных выше явлений до настоящего времени является предметом дискуссий и ряд авторов предлагают альтернативные объяснения эффектов, наблюдаемых в этих экспериментах.

Обсуждению этих новых явлений был посвящен Международный симпозиум, состоявшийся в 1973 г. в ФРГ (Tonbacht), в котором приняли участие ведущие ученые в этой области. Представленные на этом симпозиуме 15 докладов и составили рецензируемый сборник. Изложим кратко их содержание.

В докладе *«Введение в экситонную спектроскопию»* (S. Nikitine) кратко изложена история открытия и изучения экситонов в полупроводниках. Особо отмечены работы группы, возглавляемой автором.

В докладе *«Свойства биэкситонов»* (S. Nikitine) приведены результаты исследования спектров люминесценции CuCl, CuBr, CdS и CdSe. Указано, что принадлежность М-линии рекомбинации биэкситонов подтверждается формой линии, зависимостью ее интенсивности от уровня накачки, а также хорошим согласием энергии связи биэкситона, определенной из положения М-линии с рассчитанной теоретически. В то же время в Ge и Si энергия связи биэкситона, определяемая из положения А-линии, превышает рассчитанную более чем на порядок.

Доклад *«Бозе-конденсация биэкситонов и оптические свойства»* (Е. Hanamura) посвящен расчету свойств системы биэкситонов с учетом их взаимодействия. Рассчитано число биэкситонов в конденсате и вид спектра излучения при конденсации. Рассмотрены также другие эффекты, связанные с рекомбинацией и образованием биэкситонов: индуцированное излучение, двухфотонное поглощение и индуцированная прозрачность. Эти расчеты сопоставляются с имеющимися экспериментами.

В докладе *«Свойства электронно-дырочных капель в Ge»* (В. С. Багаев) изложены результаты исследования влияния одноосной деформации и магнитного поля на А-линию в спектре излучения Ge. Показано, что наблюдаемое приближение этой линии к экситонной при деформации, ее расщепление и осцилляции интенсивности излучения в магнитном поле, а также рассеяние света, появляющееся одновременно с возникновением этой линии, свидетельствуют о том, что она связана с рекомбинацией пар в ЭДК. Определены плотность пар в ЭДК и размер капель.

Доклад *«Теория электронно-дырочных капель в Ge»* (Т. М. Rice) содержит сводку результатов расчета энергии связи биэкситонов и ЭДК. Для простых зон энергия связи пар в ЭДК оказывается меньше, чем в экситоне, тогда как связь экситонов в биэкситон всегда уменьшает их энергию. Однако многодолинность зоны проводимости и вырождение валентной зоны в Ge и Si уменьшают кинетическую энергию пар и способствуют образованию ЭДК. Согласно расчетам энергия связи экситонов в ЭДК в Ge и Si превышает их энергию связи в биэкситонах и составляет в Ge 2,5 мэВ при плотности пар  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что согласуется с положением и формой А-линии.

Приведены также результаты расчетов поверхностной энергии и работ выхода электронов и дырок из капли.

В докладе *«Спектроскопическое изучение экситон-экситонного взаимодействия (биэкситоны, капли) в полупроводниках»* (Б. В. Новиков) изложены работы лаборатории, которой руководил Е. Ф. Гросс в ЛГУ, по исследованию спектров люминесценции и фотопроводимости сильнолегированных полупроводников, в том числе спектров связанных экситонов. Показано, что особенностью таких кристаллов является сильная зависимость положения А-линии в Ge от интенсивности накачки, что объясняется уменьшением размера капель при меньших накачках. Также приведены данные о спектрах люминесценции HgI<sub>2</sub>.

В докладе *«Конденсация экситонов в Ge»* (А. А. Рогачев) приведены результаты экспериментов по изучению фотопроводимости, спектров люминесценции, поляризации излучения в деформированном Ge, изменению спектров прямого поглощения при

увеличении концентрации пар, а также по исследованию флуктуаций тока в  $p-n$ -переходе, вызываемых попаданием ЭДК в область перехода. По мнению автора, полученные данные свидетельствуют о том, что в Ge экситоны при концентрации  $N$  от  $10^{12}$  см $^{-3}$  до  $10^{15}$  см $^{-3}$  (при  $T = 2-4$  °K) связываются в биэкситоны, с рекомбинацией которых и связана  $A$ -линия, а образование ЭДК происходит при  $N > 10^{15}$  см $^{-3}$ .

Доклад «Гигантская сила осцилляторов, присущая экситонным комплексам» (Э. И. Рашба) содержит обзор работ по расчету вероятности рождения экситонов вблизи дефектов. Начало этим работам положила статья автора, в которой было показано, что сила осцилляторов для линий возбуждения экситонов, связанных на примесях, аномально велика, так что их интенсивность сравнивается с интенсивностью линии свободного экситона при таких концентрациях примеси, когда среднее расстояние между ними близко к радиусу экситона. Гигантскую силу осцилляторов имеют также линии, связанные с фоторождением биэкситонов, с образованием экситон-фононных комплексов и т. п.

Доклад «Взаимодействие между экситонами при больших концентрациях» (R. Levy, A. Bivas, J. B. Grün, S. Nikitine) посвящен исследованию спектров люминесценции кристаллов CdS, CdSe и ZnO, в частности выяснению природы  $P$ - и  $P_M$ -линий. Также изучались спектры поглощения CuCl и CdS, где при интенсивном возбуждении обнаружено смещение экситонных линий. Авторы объясняют этот эффект изменением волновой функции экситона вследствие принципа Паули из-за заполнения состояний на две зоны свободными электронами или экситонами. Наряду с указанным квантовым механизмом имеется и классический — экранировка кулоновского взаимодействия свободными электронами.

В докладе «Теория стимулированной эмиссии экситонов» (H. Naken, S. Nikitine) последовательно изложены методы теории: метод кинетического уравнения, полуклассическое приближение и квантовомеханическая теория. Рассмотрено стимулированное излучение при рекомбинации экситонов по трем каналам — прямой, с излучением  $LO$ -фонона и при экситон-экситонных столкновениях. Показано, что вынужденное излучение может происходить только на двух последних каналах, причем одновременное излучение на обоих каналах невозможно. Наблюдение на опыте одновременного излучения на нескольких каналах (см. ниже) объясняется либо пространственной неоднородностью, либо последовательным излучением на разных каналах в течение импульса.

В докладе «Экспериментальное исследование стимулированного излучения, вызываемого экситонами» (R. Levy, J. B. Grün, S. Nikitine) указано, что в CdS наблюдается вынужденное излучение одновременно на  $M$ -линии и линиях рекомбинации свободных и связанных экситонов с излучением  $LO$ -фонона. Исследована зависимость интенсивности этих линий от уровня накачки.

В докладе «Экспериментальное изучение экситонов при высокой плотности» (K. L. Shaklee) приведены результаты изучения спектров отражения CdS. Показано, что изменение спектров при увеличении интенсивности света может быть объяснено линейным возрастанием коэффициента затухания экситонных линий с ростом интенсивности. Также исследовались спектры стимулированного излучения CuCl. Указано, что обнаруженная на длинных образцах тонкая структура линии  $M$ , а также наблюдаемые зависимости коэффициента усиления от интенсивности света и длины образца не объясняются теорией биэкситонной люминесценции.

Доклад «Испытание применимости теории пространственной дисперсии на  $PbI_2$ » (M. Grossmann, J. Biellmann, S. Nikitine) включает краткое изложение теории пространственной дисперсии и проблемы добавочных граничных условий (ДГУ) и содержит детальный расчет коэффициента отражения от разных граней одноосного кристалла при разных ДГУ. Сравнение этих расчетов с экспериментальными кривыми для  $PbI_2$  показывает, что некоторые добавочные пики на этих кривых можно объяснить только существованием у границы слоя, где экситоны не создаются (аналогичная модель была предложена ранее Хопфилдом для объяснения спектров отражения CdS). Учет пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости улучшает согласие теории и эксперимента, при этом ДГУ, предложенные С. И. Пекаром, как правило, обеспечивают лучшее согласие. Отметим, что в этих расчетах не учитывается тонкая структура экситонных уровней, связанная с обменным взаимодействием.

В докладе «Средние и высокие плотности поляритонов» (H. Mahr) приведены результаты исследования нестационарной люминесценции на CdS, позволяющие определить распределение поляритонов по энергии. При возбуждении поляритонов интенсивными наносекундными импульсами их распределение максвелловское, что объясняется столкновением поляритонов. При возбуждении микросекундными импульсами люминесценция нестационарна и за времена порядка 100—300 псек последовательно концентрируется у  $M$ -,  $P_M$ - и  $P$ -линий.

В докладе «Поляритоны при высокой плотности и в бозе-конденсированной экситонной системе» (H. Naken, J. Goll, A. Schenzle) теоретически рассмотрено распространение в среде интенсивного света, создающего взаимодействующие между собой поляритоны. Показано, что при возбуждении поляритонов короткими импульсами воз-

никает поляритонная волна солитонного типа и прозрачность кристалла увеличивается. При распространении слабого света в среде с большой концентрацией бозе-конденсированных поляритонов, создаваемых другим источником, спектр поляритонов модифицируется из-за их взаимодействия с конденсатом.

В целом включенные в сборник доклады дают достаточно полное представление о современном состоянии этой новой области физики. Они, несомненно, окажутся весьма полезными как для специалистов, занимающихся непосредственно рассматриваемыми вопросами, так и для физиков, желающих получить о ней общее представление. Конечно, из-за быстрого развития ряда направлений за истекшее время часть материалов сборника существенно устарела. Поэтому переводить его полностью на русский язык сейчас вряд ли целесообразно. Однако опубликовать отдельные доклады с соответствующими дополнениями или новые обзоры по этим же темам было бы весьма желательно.

*Г. Е. Пикус*