

1538.915+535.212](048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
(26-27 октября 1988 г.)**

26 и 27 октября 1988 г. в Институте физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

26 октября

1. Ю. Е. Л о з о в и к, С. М. Ч у д и н о в. Дрейфовый резонанс в двумерном электронном газе: динамический квантовый эффект Холла.
2. П. С. К о п ь ё в, И. Н. У р а л ь ц е в. Энергетический спектр кулоновских состояний в квантовой яме.

27 октября

3. А. М. Ш а л а г и н. Светоиндуцированный дрейф и его проявления, в частности в астрофизике.
4. И. Д. Н о в и к о в. Физические свойства машины времени.
Краткое содержание трех докладов приводится ниже.

538.915(048)

П. С. Копьёв, И. Н. Уральцев. Энергетический спектр кулоновских состояний в квантовой яме. Развитие современных технологий воспроизводимого получения сверхтонких полупроводниковых слоев привело к созданию модельных двумерных объектов — гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ), состоящих из слоев узкозонного материала (GaAs), разделенных барьерами (AlGaAs), толщина которых $\sim 100 \text{ \AA}$ достаточна для того, чтобы не учитывать взаимодействие квантовых ям (рис. 1, а). Использование традиционных магнитооптических методов

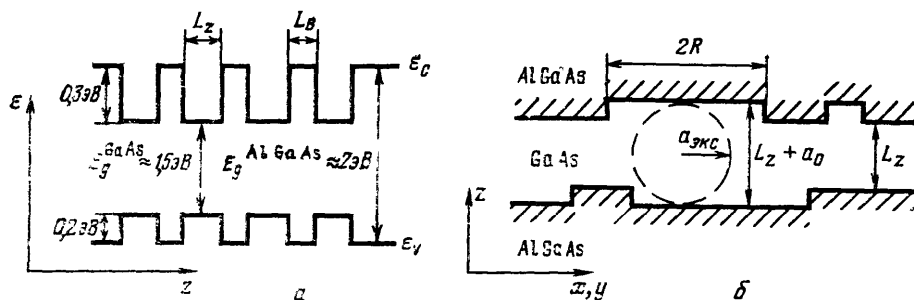


Рис. 1. Зонная диаграмма структуры с квантовыми ямами GaAs — Al_{0,4}Ga_{0,6}As (а) и схема флуктуации ширины квантовой ямы (б)

позволяет исследовать в этих структурах особенности двумерного энергетического спектра, связанные с локализацией экситона и образованием «примесной зоны» вследствие зависимости энергии связи на центре от его местоположения относительно гетерограниц.

Спектр низкотемпературной фотолюминесценции структуры с квантовыми ямами GaAs — AlGaAs толщиной 100 \AA , показанный на рис. 2, состоит из пика экситона, образованного электроном и тяжелой дыркой из нижайших подзон размерного квантования, и полосы, связанной с рекомбинацией электрона на мелком акцепторе, обусловленном присутствием неконтролируемой примеси углерода с концентрацией $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Характерная особенность

экситонного излучения, длинноволновый сдвиг его максимума относительно пика в спектре поглощения или линии в спектре возбуждения люминесценции, связывается с проявлением спектра локализованных состояний, обусловленного флуктуациями ширины квантовой ямы L_z (рис. 1, б). Величина стокова сдвига E_s и полуширина экситонной линии люминесценции, возрастающие с уменьшением L_z как $1/L_z^3$, позволяют оценить глубину флуктуации, которая не превышает одного-двух монослоев в совершенных структурах с квантовыми ямами, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. При заполнении локализованных состояний с увеличением плотности возбуждения или при температурной активации наблюдается плавный переход к излучению из делокализованных состояний экситона¹. Поскольку

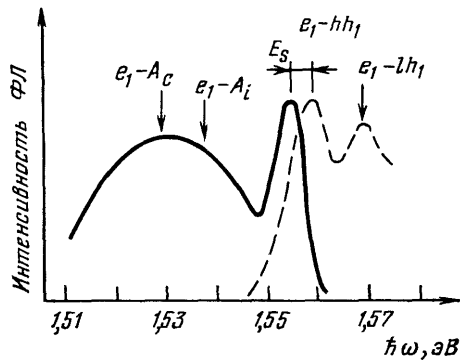


Рис 2. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) (сплошная кривая) и возбуждения люминесценции (штриховая кривая) структуры с квантовыми ямами шириной $L_z = 100 \text{ \AA}$ при $T = 1,6 \text{ K}$ и плотности возбуждения $0,1 \text{ Вт/см}^2$. Стрелками показаны переходы экситонов с участием легкой и тяжелой дырок и на акцепторы, расположенные в центре квантовой ямы и на гетерогранице

L_z меняется дискретно на величину одного монослоя, появление непрерывного спектра локализованных состояний может быть связано с зависимостью энергии локализации экситона от пространственного размера флуктуации ширины КЯ, если в распределении по размерам вдоль ямы имеются островки, соизмеримые с характерным размером экситона. Положение максимума линии локализованного экситона обусловлено особенностью в плотности состояний, которая определяется характерным размером локализуемого экситон островка. Условия локализации экситона можно изменить, уменьшая радиус экситона магнитным полем, приложенным перпендикулярно плоскости квантовых слоев. При этом смещение линии локализованного экситона в магнитном поле происходит быстрее, чем делокализованного. Анализ этого эффекта позволил определить характерный размер островков, локализуемых экситон. Он в 2,5 раза превосходит радиус экситона. Обнаруженное уменьшение стокова сдвига в магнитном поле, вообще говоря, указывает на делокализацию экситона. Ситуация уникальна, поскольку магнитное поле обычно увеличивает энергию локализации. Так как в КЯ величина локализуемого потенциала (глубина флуктуации) фиксирована для всех островков, флуктуации большого размера обладают большей энергии связи, чем малые флуктуации. Магнитное поле, создавая условия для локализации в островках меньшего размера, количество которых больше, приводит к эффективному уменьшению энергии локализации экситона². В этом заключается особенность локализации экситонов на флуктуациях ширины квантовой ямы.

Особенность проявления примесных состояний в структурах с КЯ связана с предсказанной теоретически зависимостью энергии связи E_A на примеси от ее местоположения в КЯ³. Если боровский радиус примеси a_0 несколько меньше L_z ($a_0 = 15 \text{ \AA}$ для мелкого акцептора), образуется непрерывный спектр примесных состояний, определяемый максимальной E_{Ac} для акцептора, расположенного вблизи центра ямы, и минимальной E_{A1} для акцептора на гетерогранице. Наиболее ярко различие в положении акцепторных центров в КЯ проявляется в спектральной зависимости степени циркулярной поляризации в магнитном поле⁴, которая обусловлена тепло-

вой ориентацией дырок на зеэмановских подуровнях акцептора. Анализ этой зависимости позволяет определить g -фактор и относительную силу осциллятора переходов на акцептор как функцию его местоположения в КЯ и связать их с модификацией волновой функции дырки при приближении акцептора к гетерогранице.

Наблюдаемая нижняя граница «примесной зоны» (E_{A_i}) уменьшается на одиночной гетерогранице за счет переходов на акцепторы, расположенные в барьере и связывающие дырки из узкозонного материала⁵. Потенциальный рельеф, создаваемый в КЯ глубокими заряженными центрами, расположенными в материале барьеров, сглаживается при слабой надбарьерной подсветке, что проявляется в возрастании эффективности экситонной рекомбинации⁶.

Описанные эффекты удалось использовать в качестве методов характеристики планарности гетерограниц, определения профиля концентрации мелкой примеси и контроля подвижности носителей в гетероструктурах с квантовыми ямами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ¹ Копьёв П. С., Мельцер Б. Я., Уральцев И. Н., Эфрос Ал. Л., Яковлев Д. Р. // Письма ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 343.
- ² Копьёв П. С., Уральцев И. Н., Эфрос Ал. Л., Яковлев Д. Р., Винокурова А. В. // ФТП. 1988. Т. 22. С. 422.
- ³ Bastard G., Vignani J. A. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. V. QE-22. P. 1625.
- ⁴ Копьёв П. С., Кочерешко В. П., Уральцев И. Н., Яковлев Д. Р. // ФТП. 1988. Т. 22. С. 597.
- ⁵ Алферов Ж. И., Васильев А. М., Копьёв П. С., Кочерешко В. П., Уральцев И. Н., Эфрос Ал. Л., Яковлев Д. Р. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. С. 442.
- ⁶ Копьёв П. С., Кочерешко В. П., Уральцев И. Н., Яковлев Д. Р. // Ibidem. 1987. Т. 46. С. 74.