

Проявление резонансного Γ – X -смешивания в градиентных короткопериодных GaAs/AlAs-сверхрешетках

© И.Я. Герловин, Ю.К. Долгих, Ю.П. Ефимов, И.В. Игнатъев, И.А. Недокус

Научно-исследовательский институт физики при Санкт-Петербургском государственном университете, 198904 Петродворец, Россия

Экспериментально исследованы спектры низкотемпературной (10 К) люминесценции и отражения градиентной GaAs/AlAs-сверхрешетки. Изучено поведение фоонных спутников в окрестности X – Γ -резонанса. Плавное прохождение резонанса производилось путем сканирования возбуждающего светового луча по поверхности градиентного образца. По результатам экспериментов установлена функциональная зависимость потенциала Γ – X -смешивания от расстройки резонанса.

Нижайшими возбужденными состояниями GaAs/AlAs сверхрешеток типа II являются экситоны, образованные X -электронами зоны проводимости AlAs и Γ -дырками валентной зоны GaAs. Отличие от нуля силы осциллятора непрямого X – Γ -экситона обусловлено примешиванием к X -состояниям Γ -состояний электрона GaAs. Потенциал Γ – X -смешивания зависит от разности энергий смешиваемых состояний и принимает максимальные значения в области резонанса [1].

Экспериментальные данные об околорезонансном поведении X – Γ - и Γ – Γ -экситонов в короткопериодных GaAs/AlAs сверхрешетках приведены в работах [2–6]. Для относительного смещения смешиваемых состояний использовались всестороннее сжатие исследуемых структур [2,3], постоянное электрическое поле [4], а также набор сверхрешеток с разными толщинами гетерослоев [5,6]. Оцененные по результатам экспериментов значения потенциала Γ – X -смешивания 1–5 meV совпали в пределах порядка с результатами теоретических оценок [4,7]. Однако для сопоставления с теорией более информативной является не сама величина потенциала смешивания, а ее функциональная зависимость от параметров исследуемых структур. В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, направленных на уточнение функциональной зависимости силы осциллятора X – Γ -экситонного перехода от величины энергетического зазора между Γ - и X -электронными состояниями.

Исследовалось изменение положения, формы и интенсивности экситонных линий в оптических спектрах короткопериодной GaAs/AlAs сверхрешетки вблизи X – Γ -резонанса. Для прохождения резонанса использовалась зависимость энергий X -электронов AlAs и Γ -электронов GaAs от толщин соответствующих слоев. Образец представлял собой гетероструктуру на полупроводящей подложке GaAs, исследуемая структура (выращенная на установке молекулярной пучковой эпитаксии ЭП-1302 в НИИ Физики СПбГУ) содержала 50-периодную GaAs/AlAs сверхрешетку с номинальными значениями толщин слоев: GaAs — 20 Å, AlAs — 12 Å. Отличительной особенностью сверхрешетки являлось наличие встречного градиента слоев GaAs и AlAs. Благодаря такому градиенту, перемещение возбуждающего светового пучка по поверхности образца сопровождалось

существенным изменением соотношения толщин слоев GaAs и AlAs при почти постоянном значении периода сверхрешетки.

Измерялись спектры низкотемпературной (10 К) фотолюминесценции, и спектры отражения. Люминесценция возбуждалась излучением He–Ne-лазера. При регистрации спектров отражения использовалась вольфрамовая лампа накаливания с галогенным циклом.

Как показали результаты экспериментов, спектры низкотемпературной люминесценции испытывают отчетливую трансформацию при движении возбуждающего пятна по образцу. Спектр более тонкой части образца содержит, помимо яркого экситонного пика, типичные для непрямого X – Γ -перехода фоонные спутники. В наиболее толстой части образца фоонные повторения экситонного пика исчезают, а сам пик несколько уширяется, приобретая типичную для Γ – Γ -экситона форму. Следовательно, в этой части образца низжайшим состоянием становится Γ -состояние GaAs.

Излучательная X – Γ -рекомбинация с одновременным испусканием фонона, уносящего избыточный импульс, не требует примешивания Γ -состояний GaAs, т. е. интенсивность фоонных повторений не должна меняться при изменении потенциала Γ – X -смешивания. Это означает, что отношение интенсивностей X – Γ -экситонного пика и фоонных повторений может служить мерой изменения силы осциллятора чисто экситонного перехода. На рисунке представлена зависимость этого отношения, измеренного в разных точках образца, от величины энергетического зазора между Γ и X состояниями ΔE . Полученная зависимость хорошо описывается функцией

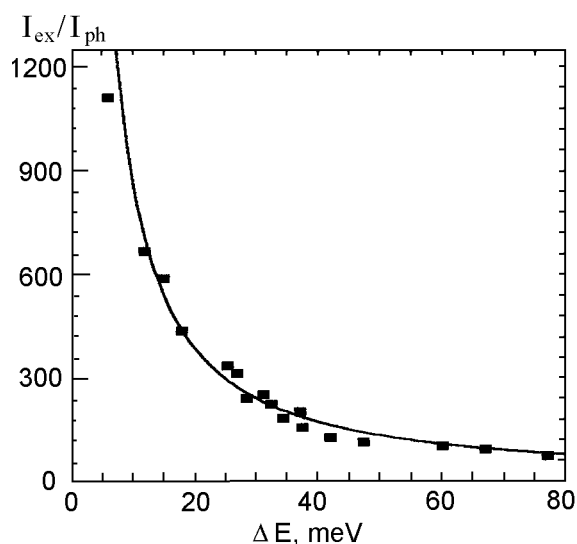
$$I_{\text{ex}}/I_{\text{ph}} \sim \Delta E^{-k}, \quad k = 1.1 \pm 0.1.$$

Согласно [1], сила осциллятора бесфононного X – Γ -перехода $S_{X-\Gamma}$ определяется выражением

$$S_{X-\Gamma} = |V_{\Gamma X}|^2 / \Delta E^2,$$

где $|V_{\Gamma X}|$ — матричный элемент потенциала смешивания, определяемый перекрытием соответствующих волновых функций.

Как отмечалось выше, в исследуемом образце относительное изменение толщин слоев GaAs и AlAs сопровождается крайне незначительным изменением периода сверхрешетки, задающего нормировку волновых



Зависимость отношения интенсивности X - Γ -экситонного пика к интенсивности LO -фононных повторений от разности энергий Γ и X -экситонных пиков.

функций. Это означает, что наблюдаемые изменения силы осциллятора X - Γ -перехода практически полностью обусловлены изменением зазора между Γ - и X -электронными состояниями. Таким образом, полученная из эксперимента функциональная зависимость силы осциллятора от зазора не совпадает с теоретически предсказанной.

По-видимому, основной причиной несовпадения является неоднородное уширение смешиваемых состояний. На наличие такого уширения указывает стоксов сдвиг Γ - Γ -экситонного пика в спектрах отражения и люминесценции. Для уточнения роли неоднородного уширения требуются более детальные исследования.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 97-02-18163 и 97-02-18339).

Список литературы

- [1] M.S. Skolnick, G.W. Smith, I.L. Spain, C.R. Whitehouse, D.C. Helbert, D.M. Whittaker, L.J. Reed. Phys. Rev. **B39**, 18, 11 191 (1989).
- [2] T. Nakayama, F. Minami, K. Inoue. In: The Physics of Semiconductors / Ed. P. Jiang and H.Z. Zheng. World Scientific Publishing Co, Singapore (1992). P. 717.
- [3] W.R. Tribe, P.C. Klipstein, R.A. Woolley, J.S. Roberts. Phys. Rev. **B51**, 15, 9735 (1995).
- [4] M.-H. Meynadier, R.E. Nahory, J.M. Worlock, M.C. Tamargo, J.L. de Miguel, M.D. Sturge. Phys. Rev. Lett. **60**, 13, 1338 (1988).

- [5] M. Nakayama, K. Lamazawa, K. Suyama, I. Tanaka, H. Nishimura. Phys. Rev. **B49**, 19, 13 564 (1994).
- [6] I.L. Aleiner, E.L. Ivchenko, V.P. Kochereshko, G.L. Sandler, P. Lavallard, R. Planel. Superlatt. Microstruct. **13**, 2, 237 (1993).
- [7] Y. Fu, M. Willander, E.L. Ivchenko, A.A. Kiselev. Phys. Rev. **B47**, 19, 13 498 (1993).