

УДК 539.12-164, 539.3

Роман Пелещак, Олег Кузик, Олеся Даньків

*Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
м. Дрогобич, Україна*

РОЛЬ ЕЛЕКТРОН-ДЕФОРМАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ У ФОРМУВАННІ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ, АКУСТООПТИЧНИХ ТА БАРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КВАНТОВО-РОЗМІРНИХ СИСТЕМ

Дослідження електрон-деформаційних ефектів у квантово-розмірних структурах є одним з актуальних напрямків сучасної фізики конденсованого стану [1,2]. Це впливає як з необхідності поглиблення розуміння особливостей протікання електронних процесів у реальних напівпровідникових структурах, так і розробки рекомендацій для оптимізації робочих характеристик сучасних приладів електронної техніки: гетеролазерів, світлодіодів, різноваріантних детекторів, тощо.

Завдання теоретичних досліджень при цьому полягає у встановленні взаємозв'язку між електронною підсистемою і деформацією ґратки та у самоузгодженому описі електрон-деформаційних ефектів.

Не дивлячись на значні досягнення в цій області, є цілий ряд задач щодо взаємовпливу електронної і деформовано-ґраткової підсистем у квантово-розмірних структурах, які або не вивчалися зовсім, або розв'язувалися тільки для деяких спеціальних випадків. До числа нерозв'язаних задач слід віднести: встановлення ролі електрон-деформаційного механізму у формуванні електронно-діркових переходів у напівпровідниках із самоорганізованими нанокластерами точкових дефектів та квантовими точками, дослідження впливу електрон-деформаційних ефектів на властивості контакту Шотткі та спектральні характеристики напружених гетероструктур.

Відомо, що оптичні та електричні властивості напівпровідникових приладів на основі квантових ям значною мірою залежать від деформації ґратки і просторового розподілу точкових дефектів. Такі дефекти можуть проникати ззовні або виникати в процесі росту. Взаємодія точкових дефектів із самоузгодженим полем деформації, яке може виникати як за рахунок наявності цих дефектів, так і неоднорідності кристалічної системи (наприклад, гетеромежа) чи під дією зовнішніх факторів (наприклад, акустична хвиля), призводить до просторового перерозподілу дефектів і, при певних умовах, до утворення самоорганізованих дефектно-деформаційних структур (кластерів та періодичних структур). Неоднорідна деформація, зумовлена наявністю кластерів дефектів у гетероструктурах, внаслідок самоузгодженого електрон-деформаційного зв'язку призводить до локальної зміни ширини забороненої зони і, відповідно, до зміни потенціальної енергії носіїв струму та формування електронно-діркових переходів в околі кластера.

В даній роботі встановлено закономірності перебудови локалізованих електронних рівнів у тришарових гетеросистемах GaAs/InAs/GaAs під впливом

деформації, спричиненої наявністю кластера точкових дефектів у квантовій ямі та створеної акустичною хвилею.

Показано, що залежність різниці енергій електрона ΔE в першому збудженому та основному станах у гетероструктурі GaAs/InAs/GaAs з нанокластером у квантовій ямі InAs від середньої концентрації дефектів N_{d0} має немонотонний характер з максимумом в околі точки $N_{d0} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Наявність кластера дефектів виду центрів розтягу призводить до збільшення величини ΔE на 80% при $N_{d0} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$, що повинно відобразитись на ВАХ резонансно-тунельних діодів у зменшенні мінімального значення сили струму.

Ефект зміни різниці енергій електрона в першому збудженому та основному станах суттєво залежить від ефективної маси електрона. А саме, збільшення величини ΔE суттєво проявляється тільки при малих значеннях ефективної маси електрона в матеріалі нанокластера. У випадку, коли ефективна маса електрона в матеріалі нанокластера є більшою від ефективної маси електрона в матеріалі основної ями (InAs), збільшення ΔE є незначним, а при $N_{d0} > 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ різниця енергій електрона в першому збудженому та основному станах є меншою від відповідного значення для даної структури без кластера дефектів. Цей ефект пояснюється тим, що в досліджуваній структурі зміна енергії електрона визначається двома факторами: зміною потенціальної енергії електрона, спричиненою деформаційними ефектами за рахунок наявності кластера, та зміною кінетичної енергії за рахунок відмінності ефективних мас. Якщо ефективна маса електрона в матеріалі нанокластера є меншою від відповідного значення в основній ямі, то обидва фактори є причиною збільшення величини ΔE . У протилежному випадку ці фактори є конкуруючими, а саме, збільшення ефективної маси є причиною зменшення різниці енергій електрона ΔE в першому збудженому та основному станах.

Напівпровідникові гетероструктури з нанокластерами мають високий квантовий вихід фотолюмінесценції і є перспективним матеріалом для створення гетеролазерів у близькій інфрачервоній області спектру [3]. Джерела інфрачервоного випромінювання, які швидко змінюють свою частоту та напрям випромінювання, є важливим елементом оптичних систем зв'язку. Оскільки нанокластери є чутливими до деформації, то акустична хвиля, взаємодіючи з електронною підсистемою, повинна спричинити перебудову електронних та діркових рівнів, що дасть змогу керувати довжиною хвилі випромінювання гетеролазера у заданому діапазоні, який залежатиме від частоти акустичної хвилі, розмірів, поверхневої густини та форми нанокластерів. Змінюючи розміри, поверхневу густину, форму кластера та частоту акустичної хвилі, можна прогнозовано змінювати профіль показника заломлення оптичного резонатора у напрямку, перпендикулярному до напрямку випромінювання. Завдяки цьому можна керувати напрямом поширення випромінювання гетеролазера з КТ, швидко змінюючи його з часом, та здійснювати просторовий перерозподіл світлового потоку, зокрема, збільшувати його інтенсивність у заданих точках простору.

У роботі побудовано теоретичну модель процесу частотної модуляції випромінювання при рекомбінаційному переході між основними станами електрона та дірки в гетероструктурі InAs/GaAs з нанокластерами InAs за допомогою ультразвукової хвилі. Встановлено, що залежність амплітуди частотної модуляції від частоти акустичної хвилі має немонотонний характер з двома максимумами, положення яких визначається геометричними розмірами гетероструктури та пружними сталими її матеріалу. Показано, що із зменшенням розміру нанокластера від 9 нм до 3 нм амплітуда частотної модуляції зростає від 100 ГГц до 300 ГГц, що пояснюється збільшенням деформації матеріалу нанокластера. Також зменшення розміру нанокластера призводить до зміщення максимумів амплітуди частотної модуляції в сторону більших частот, що пояснюється збільшенням частоти власних коливань сферичного нановключення.

У роботі розвинуто метод розрахунку баричного коефіцієнта матеріалу напруженої квантової точки та встановлено закономірності впливу електрон-деформаційних ефектів на баричний коефіцієнт матеріалу квантової точки InAs/GaAs.

Досліджено, що в діапазоні зміни гідростатичного тиску $P = (0 \div 15)$ кбар спостерігається практично рівномірний зсув ліній люмінесценції в бік більших енергій, характер якого не змінюється якісно при збільшенні розмірів квантової точки. Зокрема, збільшення зовнішнього гідростатичного тиску в діапазоні $(0 \div 10)$ кбар збільшує енергію основного оптичного переходу в сферичній квантовій точці InAs радіусом $R_0 = 20 \text{ \AA}$ на 97,8 меВ. Встановлено, що величина баричного коефіцієнта матеріалу напруженої квантової точки є меншою від значення баричного коефіцієнта об'ємного кристалу. Зокрема, величина баричного коефіцієнта матеріалу напруженої сферичної квантової точки радіусом $R_0 = 25 \text{ \AA}$ становить 9,46 меВ/кбар і є меншою від значення баричного коефіцієнта об'ємного кристалу InAs ($K_\infty = 12 \text{ меВ/кбар}$) на 21%, що задовільно узгоджується з експериментом [4].

1. R.M. Peleshchak, I.Ya. Vachynsky, Condensed Matter Phys. **12**, 215 (2009).
2. Р.М. Пелешак, О.В. Кузик, О.О. Даньків, Укр. фіз. журн. **55**, 437 (2010).
3. N.N. Ledentsov, Semicond. Sci. Technol. **26**, 014001 (2011).
4. Б.В. Новиков, Г.Г. Зегря, Р.М. Пелешак, О.О. Даньків, В.А. Гайсин, В.Г. Талалаев, И.В. Штром, Г.Э. Цырлин, ФТП **42**, 1094 (2008).