

СПЕКТРИ КВАЗІЧАСТОК У СФЕРИЧНИХ НАНОСТРУКТУРАХ

Проведено аналіз спектрів квазічастинок у сферичних наноструктурах. Показано, за яких умов можуть існувати квазістаціонарні стани та можливості їх використання у нових приладах.

Spectrum analysis of the quaziparticles in spherical nanostructures is performed. It is shown at what condition quazistationary states can exist and the possibilities of their utilization in new devices.

Сучасні технології дозволяють отримувати напівпровідникові гетероструктури різної симетрії, характерні розміри яких досягають десятків нанометрів, що відповідає десяткам моношарів. Особливий інтерес викликають сферичні наноструктури, найпростішим видом яких є наносфери одного напівпровідника, вкраплені в інший масивний напівпровідник. У випадку, коли дно зони провідності матеріалу наносфери знаходиться нижче по енергії від дна зони провідності матеріалу зовнішнього середовища, спостерігається спектр розмірного квантування електронів. Такі структури називають "квантовими точками" або "штучними атомами". Спектр квазічастинок в таких квантових ямах через відсутність квазіімпульсу строго дискретний, що його якісно відрізняє від подібних спектрів циліндричних чи плоских наноструктур. Тому, як від-

значалось в [1], напівпровідникові лазери, побудовані на основі квантових точок, матимуть унікально стабільні частоти генерації. Кількість і положення дискретних енергетичних рівнів електрона у квантових точках визначаються як розмірами, так і матеріалом складових частин сферичної наногетеросистеми. Складнішу систему рівнів мають електрони в багат шарових сферичних наногетероструктурах. Тому такі структури володіють більшими можливостями моделювання, необхідного для практичного застосування спектру квазічастинок.

Для прикладу розглянемо складну сферичну наногетероструктуру (рис.1), яка утворена з ядра (0) та трьох шарів різних матеріалів (1,2,3), розміщених у масивному напівпровіднику (4). Структури такого типу називають "російськими матрьошками".

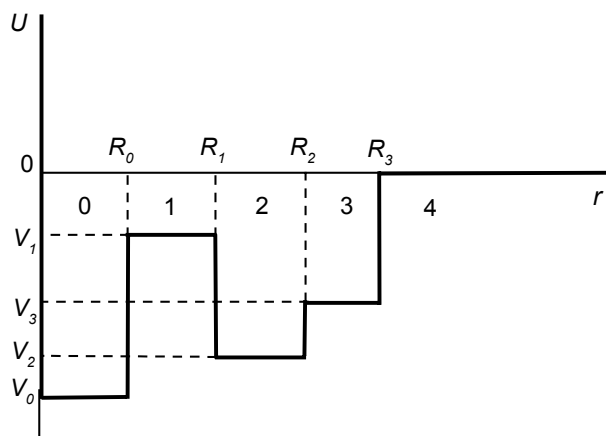


Рис.1. Потенціал складної сферичної наноструктури з дискретним електронним спектром.

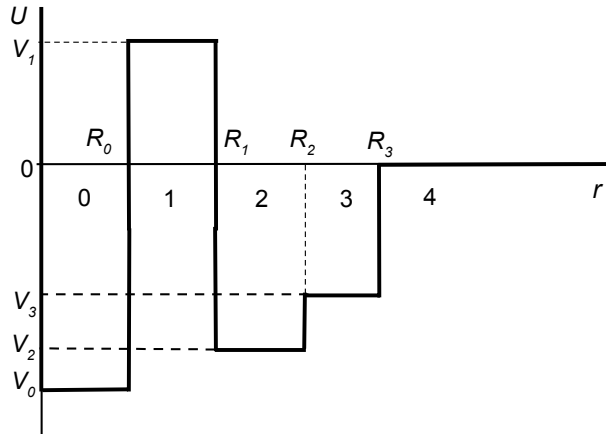


Рис.2. Потенціал складної сферичної наноструктури з ділянкою квазістаціонарного електронного спектру.

За початок відліку енергії виберемо дно зони провідності напівпровідникової матриці. Якщо потенціали $V_i \leq 0$ ($i=0,1,2,3$), то у випадку енергії $E > 0$ отримаємо неперервний спектр електронів, а в області $V_0 < E < 0$ матимемо дискретний спектр. Так як кількість і положення дискретних рівнів в спектрах "штучних атомів" задаються складом та лінійними розмірами сферичної наносистеми, то розрахунок моделі з необхідною системою рівнів для побудови напівпровідникових приладів на основі складних сферичних наноструктур не складає принципових труднощів.

Якщо потенціальний бар'єр, утворений одним з шарів сферичної наноструктури, буде вищим за потенціальний бар'єр напівпровідникової матриці, тобто, коли один з $V_i > 0$ ($i=1,2,3$), то можливе існування станів, час життя яких скінченний.

Нехай потенціал сферичної наноструктури має вигляд, як на рис.2). При енергіях $V_0 < E < 0$, як і в попередньому випадку, матимемо дискретний спектр, який відповідає зв'язаним станам електронів в ядрі (0), та в шарах (2,3). У випадку $E > V_1$ отримується неперервний електронний спектр. А у випадку $0 < E < V_1$, електрон, перебуваючи в ядрі (0), має можливість тунелювати через бар'єр і рухатись на безмежність. Таким чином електронні стани з енергією $0 < E < V_1$ мають скінченний час життя, який залежить від ймовірності тунелювання крізь бар'єр. Такі стани називають квазістаціонарними [2]. Хвильова функція квазістаціонарного стану на безмежності має вигляд сферичної хвилі $\psi \sim e^{ikr}/r$,

що розходиться і яка відповідає інфінітному рухові частки після тунелювання через бар'єр. Так як гранична умова комплексна, то в результаті розв'язку рівняння Шредінгера отримується комплексне значення енергії

$$E = E_0 - \frac{i\Gamma}{2}, \quad (1)$$

де додатні величини E_0 і Γ визначають положення рівня енергії і його розмиття відповідно. Часова залежність хвильової функції матиме вигляд

$$\psi \sim e^{-\frac{i}{\hbar}E_0 t} e^{-\frac{\Gamma}{2\hbar}t}, \quad (2)$$

Таким чином ймовірність знаходження частки в такому стані експоненційно згасає з часом. Величина $\tau = \hbar/\Gamma$ вважається часом життя квазістаціонарного стану.

Квазістаціонарні стани в напівпровідникових лазерах можуть бути використані для процесу "накачки" вільних електронів з енергією, рівною енергії квазістаціонарного стану. При цьому цікавою є задача на визначення оптимальної ширини потенціального бар'єру, який забезпечить достатньо високу ймовірність процесу "накачки" і достатньо довгий час життя квазістаціонарного стану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. - 1998. - 32, №1. - С.3-11.
2. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М. Рассеяния, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. - М.: Наука, 1971.