

ЕКСИТОН-ПОЛЯРИТОННІ СОЛІТОНИ: ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

В. А. Коляденко^{1, a}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Анотація

У даній роботі розглянуто досягнення у області створення дисипативних екситон-поляритонних солітонів. Розглянуто типові моделі та результати їх застосування. Також показано наявність у запропонованих моделях бістабільності, як важливої умови для існування дисипативних солітонів.

Ключові слова: поляритон, резонатор, солітон, бістабільність

Вступ

Солітоном називають відокремлену хвилю, що розповсюджується у нелінійному середовищі. Певні нелінійні ефекти у системі компенсують лінійні ефекти, що повинні змінювати форму солітона (дисперсія, дифракція). До класу дисипативних солітонів відносяться такі солітони, у яких існують втрати енергії солітона (дисипація), що компенсуються надходженням із зовнішнього джерела (накачування). При цьому нелінійні ефекти можуть бути як у взаємодії всередині системи, так і у її реакції на накачування чи поглинання енергії.

Екситон-поляритон – це суперпозиція квазічастинки-екситона із фотоном у оптичному резонаторі. Екситон представляє собою зв'язаний стан електрона ті дірки у квантовій ямі, яка обмежує рух носіїв по одній координаті. У той же час оптичний резонатор накладає обмеження на проекцію хвильового вектора фотона на його вісь. Резонатор та квантова яма можуть мати склад із напівпровідників типу III-V (GaAs/AlAs та нітриди GaN/AlGaN) або II-VI (CdTe/CdHgTe та ZnO/ZnMgO). Для кожного типу активного середовища підбирається свій матеріал РБВ, що викликано різними типами вирощування структури. Окрім згаданого вище, ще можуть використовуватися CdTe/CdHgTe (як у роботі [1]), HfO₂/SiO₂ або SiN/SiO₂.

Метою роботи є показати можливість існування екситон-поляритонних солітонів та виявити необхідні для цього параметри системи. Актуальність дослідження саме таких систем викликана тим, що у системах екситон-поляритонів можливе явище бозеконденсації. При цьому когерентні властивості поляритонів у окремих речовинах (GaN та ZnO) зберігаються навіть при температурі 300 К. Крім того, у деяких випадках поляритони можна розглядати як рідину, у якій можуть виникати вихори та явище надплинності.

1. Модель солітонів у мікрорезонаторі з квантовими ямами

Із роботи [2] можна взяти модель, що описує еволюцію поля у резонаторі. Розглядається задача у двох вимірах, оскільки товщина системи квантових ям на порядок менше за довжину хвилі світла.

$$\partial_t E^\pm - i\nabla_\perp^2 E^\pm + (\gamma_c - i\Delta)E^\pm = i\Psi^\pm + E_p^\pm, \quad (1)$$

$$\partial_t \Psi^\pm + (\gamma_0 - i\Delta)\Psi^\pm + i(|\Psi^\pm|^2 + \alpha|\Psi^\mp|^2) = iE^\pm. \quad (2)$$

Тут E та Ψ позначають середні значення операторів народження або знищення фотонів та екситонів, відповідно. Величина коефіцієнту дифракції фотонної компоненти береться рівною 1 та залежить від параметрів резонатора. В загальному випадку існує аналогічний параметр для екситонів, який залежить від їх ефективної маси (у цій моделі дифракцією екситонів нехтують). Величини γ_c та γ_0 описують обернений час життя фотонів у резонаторі та час релаксації екситонів, відповідно. Частота Δ рівна різниці між частотою накачування та частотою екситонного резонансу у найнижчій точці. Величина E_p описує амплітуду хвилі накачування і складається з двох кругових поляризацій. Тобто накачування може мати кругову поляризацію, лінійну або еліптичну. Параметр α описує співвідношення між енергією притягання та відштовхування екситонів з однаковими та різними напрямками спіну. У скалярному випадку (лінійна поляризація накачування та розподілу частинок) він виключається із рівняння.

2. Однорідний розв'язок рівняння

Система із рівнянь (1) та (2) має однорідний, сталий у часі розв'язок. Для випадку лінійної поляризації при сталих інших параметрах було знайдено залежність комплексних величин E та Ψ від амплітуди накачування E_p . Ця залежність є неоднозначною, якщо розглядати лише модуль величини Ψ . Тому на рис. 1 показана обернена залежність.

^avictor314@mail.ru

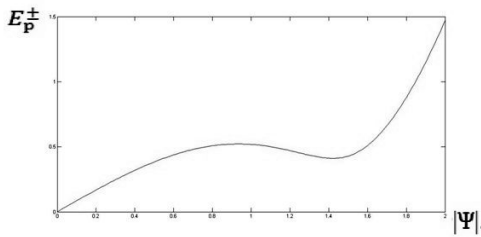


Рис. 1. Залежність амплітуди накачування від отриманої амплітуди поля Ψ

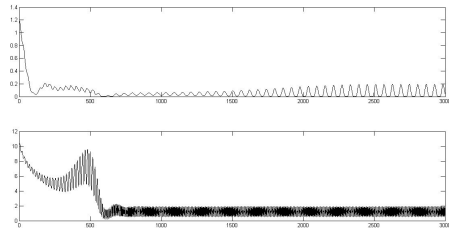


Рис. 2. Інтенсивність 2 кругових поляризацій E

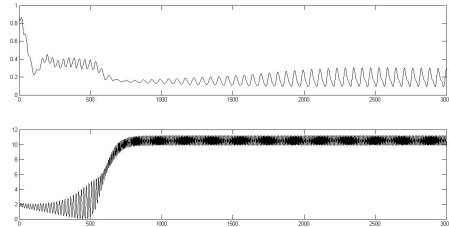


Рис. 3. Інтенсивність 2 кругових поляризацій Ψ

Завдяки цій неоднозначності виникає явище бістабільності. Воно полягає у тому, що при певному значенні накачування початковий розподіл поля прямує до різних точок стабільності із різних областей. У даному випадку значення комплексних величин E та Ψ буде задаватися через модуль величини Ψ .

3. Бістабільність

У резонаторі можна створити такий розподіл поля, який буде мати переважання однієї поляризації над іншою (при лінійній поляризації накачування). Для моделювання амплітуда екситонної компоненти першої поляризації мала значення близько 0.94, а другої – близько 1.44. Це відповідає двом екстремумам графіка, зображеного на рис. 1. А значення амплітуди накачування бралось середнім між цими двома точками – 0.4665. Тобто ці значення відповідають частині кривої, у якій відбувається гістерезис.

На рис. 2 зображено графіки еволюції у часі двох компонент поля E , а на рис. 3 – двох екситонних компонент Ψ . Із отриманих залежностей видно, що навіть при лінійній поляризації накачування можливе розділення двох поляризацій за інтенсивністю. Це відповідає еліптичній поляризації випромінювання.

Бістабільність призводить до можливості існування солітонів. У роботі [2] показано приклад одновимірних темних солітонів (рис. 4). Ці солітони існують на лінійно поляризованому фоні і можуть мати різні значення інтенсивності у двох кругових поляризаціях. Аналітичні розв'язки типу одновимірних солітонів були також знайдені у роботі [3].

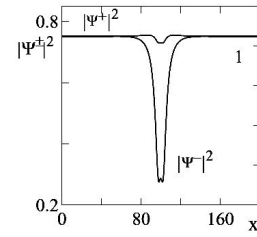


Рис. 4. Інтенсивність екситонів у одновимірному солітоні.

Як видно із рис. 2 та 3, таке розділення може дати відмінні на порядок величини. Саме така бістабільність може компенсувати дифракцію та зберегти форму солітона. А з іншого боку, наявність дифракції не дає інтенсивності солітона досягти занадто великого значення.

4. Модифікації моделі

Одна із модифікацій моделі із рівнянь (1) та (2) була використана у роботі [4]. Вона описує випадок лінійної поляризації:

$$\partial_t E - i\nabla_{\perp}^2 E + (\gamma - i(\Omega_p + \Delta))E^{\pm} = i\Psi + E_p, \quad (3)$$

$$\partial_t \Psi - id\nabla_{\perp}^2 \Psi + (\gamma - i\Omega_p)\Psi + i|\Psi|^2 = iE. \quad (4)$$

У цій моделі враховується параболічна дисперсія екситонів, що описується коефіцієнтом d . Його значення знаходиться в діапазоні між 10^{-5} та 10^{-4} . Величина Ω_p залишається різницею між частотою накачування та частотою екситонного резонансу. Також враховується, що частота резонатора є меншою на величину Δ .

Наявність різниці між цими трьома частотами призводить до того, що розв'язки перестають бути постійними у часі. В результаті стабільні солітони переходять у так звані «брізері», форма яких коливається у часі разом із коливанням фону. При цьому максимум інтенсивності солітона росте при зростанні як амплітуди накачування, так і частоти Ω_p .

Висновки

У даній роботі запропоновано умови створення екситон-поляритонних солітонів. Розглянуто типові моделі еволюції поля у резонаторі. Знайдено умови існування бістабільності, у тому числі – існування двох кругових поляризацій із різною інтенсивністю. Це є умовою для існування солітонів із еліптичною (майже круговою) поляризацією поля.

Перелік використаних джерел

1. Lagoudakis K. G., Ostadnickyy T., Kavokin A. V. at all. Science. – 2009. – Vol. 326. – № 5955. – p. 974–976.
2. Werner A., Egorov O. A. and Lederer F. Phys. Rev. B. – 2012. – N 85. – 115315.
3. Flayac H., Solnyshkov D. and Malpuech G. Phys. Rev. B. – 2011. – N 83. – 193305.
4. Egorov O. A. and Lederer F. Phys. Rev. B. – 2013. – N 87. – 115315.