

МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 53.01

ДИНАМІКА РЕЛАКСАЦІЇ ЗБУДЖЕНЬ У МЕЗОСКОПІЧНИХ КЛАСТЕРАХ ПІД ЧАС НАДВИПРОМІНЮВАЛЬНОГО РОЗПАДУ

Л. Демків, Т. Демків

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна
tdemkiv@gmail.com*

Для дослідження динаміки формування імпульсу надвипромінювання в системі з високою густиною збуджених частинок – диполів, які впливають один на одного завдяки взаємодії дипольного моменту з сумарним електромагнітним полем ряду сусідніх диполів, використано апарат матриці густини та напівкласичний підхід. Урахування диполь-дипольної взаємодії на мікрорівні дає змогу пояснювати нові експериментальні факти в оптиці наночастинок. Досліджено вплив параметрів однієї частинки в системі, яка утворює мезоскопічний кластер, на динаміку релаксації збуджень системи.

Ключові слова: надвипромінювання, взаємодія диполів.

Для підвищення швидкодії пристроїв сучасна електроніка щораз частіше створює та використовує імпульси піко- та фемтосекундного діапазону. Під час утворення таких імпульсів важливе значення має когерентне колективне випромінювання диполів, відоме як явище надвипромінювання – колективне спонтанне випромінювання багатьох збуджених випромінювальних центрів, зумовлене кореляцією дипольних моментів переходу завдяки взаємодії через електромагнітне поле. Надвипромінювання виявляється як одночасний перехід усіх випромінювальних центрів в основний стан за час, який обернено пропорційний до кількості випромінювальних центрів N . Інтенсивність випроміненої електромагнітної хвилі пропорційна до N^2 . Форму лінії випромінювання описує гіперболічний косинус.

Ефекти надвипромінювання (спонтанного когерентного випромінювання) та суперлюмінесценції (вимушеного когерентного випромінювання) використовують для пояснення та передбачення даних різноманітних експериментів. У [1] запропоновано використовувати когерентну взаємодію дипольних моментів для реалізації квантової логіки. Експериментальні результати зменшення часу життя екситонів [2] у квантових точках порівняно з об'ємними матеріалами пояснюють реалізацією явища надвипромінювання завдяки збільшенню сили осцилятора переходу та їхньої когерентної взаємодії. У [3] реалізовано діод для створення фемтосекундних імпульсів електромагнітного випромінювання.

У [4] запропоновано феноменологічну модель, що описує формування в активній області гетероструктури надвипромінювальних доменів (макродиполів). Однак

реалізація явища надвипромінювання у напівпровідникових структурах за кімнатної температури потребує екстремально високої концентрації електрон-діркових пар. Це є однією з невирішених проблем створення напівпровідникових пристроїв, які працюють на явищі надвипромінювання.

Ми дослідили динаміку релаксаційних процесів під час когерентної електродипольної взаємодії системи диполів, яка реалізується завдяки взаємодії дипольного моменту з сумарним електромагнітним полем ряду сусідніх диполів. Зміну в часі напруженості електричного поля $\vec{E}_{nk}(t)$, створюваної n -м диполем з дипольним моментом $\vec{d}_n(t)$ у точці простору, у якій міститься диполь k , визначають за формулою [5]

$$\vec{E}_{nk}(t) = - \left[\frac{\vec{d}_n(\tilde{t})}{r_{nk}^3} + \frac{\dot{\vec{d}}_n(\tilde{t})}{cr_{nk}^2} + \frac{\ddot{\vec{d}}_n(\tilde{t})}{c^2 r_{nk}} \right], \quad (1)$$

де дипольні моменти беруть у відставальний момент часу $\tilde{t} = t - r_{nk}/c$, r_{nk} – відстань між диполями n і k .

Когерентні процеси, які розглядаємо, значно менш тривалі, ніж характерні часи релаксації в системі. Тому для k -го диполя, який взаємодіє з електромагнітним полем, запишемо рівняння матриці густини $\rho^{(k)}$ у вигляді

$$i\hbar \frac{\partial \hat{\rho}^{(k)}}{\partial t} = [\hat{H}^{(k)}, \hat{\rho}^{(k)}], \quad (2)$$

де $\hat{H}^{(k)} = \hat{H}_0^{(k)} - \hat{d}_{(k)} \vec{E}_{(k)}$, $\hat{d}_{(k)}$ – оператор дипольного моменту; $\vec{E}_{(k)}$ – сумарна напруженість електромагнітного поля в точці простору, де міститься k -й диполь; $\hat{H}_0^{(k)}$ – гамільтоніан. Уважаємо, що діагональні елементи дипольного моменту дорівнюють нулю, а недіагональні елементи – однаковими і дійсними ($d_{12} = d_{21} = d$). Діагональні елементи матриці густини визначають імовірності перебування частинки на відповідному енергетичному рівні. Частинка перебуває в суперпозиційному стані й має осцилюючий дипольний момент, який визначений недіагональними елементами матриці густини.

Для кожної з дворівневих систем з одним дипольно-дозволенним переходом із частотою ω_{21} , яка взаємодіє з сумарним електромагнітним полем сусідніх диполів, отримано систему диференціальних рівнянь для елементів матриці густини:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{11}^k(t)}{dt} &= -i \frac{dE_{(k)}}{\hbar} (\rho_{12}^k(t) - \rho_{21}^k(t)), \\ \frac{d\rho_{22}^k(t)}{dt} &= i \frac{dE_{(k)}}{\hbar} (\rho_{12}^k(t) - \rho_{21}^k(t)), \\ \frac{d\rho_{21}^k(t)}{dt} &= -\omega_{21} \rho_{21}^k + i \frac{dE_{(k)}}{\hbar} (\rho_{11}^k(t) - \rho_{22}^k(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

У резонансному наближенні в ході розгляду повільно змінних складових поля $\vec{E}_{nk}(t)$ для повільно змінних недіагональних елементів матриці густини, записаних у вигляді $a_k(t) + ib_k(t)$, та різниці заселеностей рівнів $z_k(t) = \frac{1}{2}(\rho_{22}^k(t) - \rho_{11}^k(t))$ з (3) отримуємо систему трьох диференціальних рівнянь для змінних $a_k(t), b_k(t), z_k(t)$. За допомогою цих рівнянь можна оцінити ймовірність існування диполя та його осцилюючий дипольний момент:

$$\begin{aligned} \frac{da_k(t)}{dt} &= -\sum_{n \neq k} W_{nk} b_n(t) z_k(t) + \sum_n G_{nk} a_n(t) z_k(t), \\ \frac{db_k(t)}{dt} &= \sum_{n \neq k} W_{nk} a_n(t) z_k(t) + \sum_n G_{nk} b_n(t) z_k(t), \\ \frac{dz_k(t)}{dt} &= -\sum_{n \neq k} W_{nk} (b_n(t) a_k(t) - b_k(t) a_n(t)) - \sum_n G_{nk} (a_n(t) a_k(t) + b_n(t) b_k(t)). \end{aligned} \quad (4)$$

Коефіцієнти G_{nk} характеризують радіаційний розпад збуджень системи; W_{nk} – когерентний обмін збудженнями між частинками. Інтенсивність надвипромінювання системи осцилюючих диполів зумовлена впливом поля випромінювального диполя на всі інші випромінювачі системи. Саме такий вплив, визначений коефіцієнтом W_{nk} , здатний створити когерентний процес випромінювання. В ході отримання системи рівнянь (4) для коефіцієнтів G_{nk} та W_{nk} записано аналітичні вирази, за допомогою яких можна оцінити числові значення коефіцієнтів. Числові значення коефіцієнтів G_{nk} та W_{nk} залежать від дипольного моменту переходу, частоти переходу, геометричних параметрів, які визначають положення диполів у просторі, та косинуса кута між вектором поширення електромагнітного випромінювання диполя й вектором дипольного моменту сусідніх диполів. На рис. 1 для випадку ланцюжка диполів, розміщених на відстані r , зображено залежність коефіцієнтів G_{nk} та W_{nk} для сусідніх диполів від r .

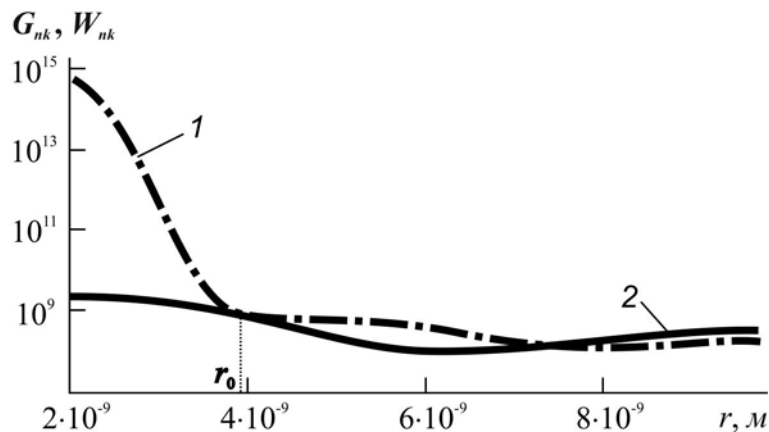


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів G_{nk} та W_{nk} для сусідніх диполів від відстані між ними.

Ефект самонаведення кореляцій диполів можливий у випадку, коли час цього процесу менший від часу поздовжньої та поперечної релаксації і відстань між осциляторами менша від довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Наприклад, коли радіаційна константа спонтанного випромінювання $G_{kk} = 10^9$, отримуємо для G_{nk} та W_{nk} значення коефіцієнтів 10^n , де $n = 9-15$ залежно від дипольного моменту переходу та довжини хвилі електромагнітного випромінювання (див. рис. 1). Як бачимо, за малої відстані між диполями зростає числове значення W_{nk} (крива 1). Максимальне значення W_{nk} тим більше, чим більший дипольний момент переходу, а положення точки r_0 відповідає величині порядку $1/4$ довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

Для кількості диполів $N \sim 10$ систему $3N$ диференціальних рівнянь розв'язували за допомогою системи комп'ютерної математики Maple. Використовували числові методи для звичайних і жорстких систем диференціальних рівнянь, контролювали помилки й аналізували збіжність і стійкість методів для різних параметрів системи. Якщо параметри G_{nk} та W_{nk} відрізняються не більше ніж на порядок, то отримуємо стійкі розв'язки системи. Числові результати розв'язку системи (4) для різниці заселеності рівнів відповідають таким, які характерні у випадку реалізації явища надвипромінювання (рис. 2, крива 1). На рис. 2 (вставка) показано відповідну залежність інтенсивності випромінювання від часу. На відміну від спонтанного розпаду, урахування зазначеної вище взаємодії приводить до формування імпульсу надвипромінювання. Числові значення параметрів G_{nk} визначають час радіаційного розпаду. Значне збільшення числового значення параметра W_{nk} за малих r (див. рис. 1) приводить до збільшення часу формування імпульсу та швидкості випромінювання. Коефіцієнти G_{nk} та W_{nk} залежать від геометричного положення диполів. Чим більше диполів взаємно взаємодіють, тим коротший імпульс надвипромінювання.

У системах з малою кількістю частинок – мезоскопічних кластерах – суттєво зростає роль флуктуацій [6]. Це так званий мезоскопічний ефект, коли зміна параметрів однієї частинки змінює загальні властивості системи. Досліджено вплив параметрів одного диполя на динаміку релаксації системи диполів, що взаємодіють, а саме: досліджено параметри, за яких відбувається деформація форми кривої 1 у криві 2 та 3.

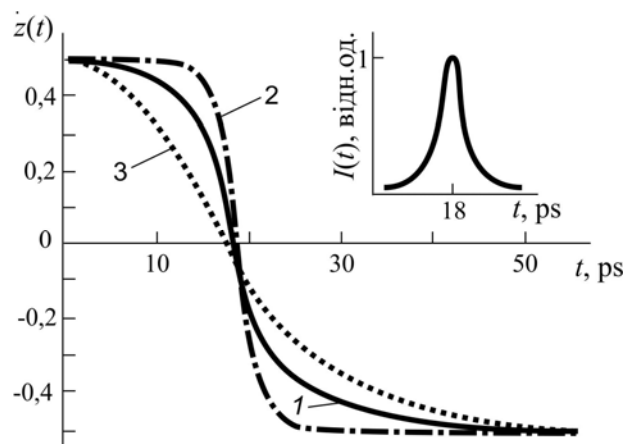


Рис. 2. Кінетика заселеності рівнів $z(t)$

Зменшення радіаційної константи спонтанного випромінювання G_{kk} однієї k -ї частинки збільшує час формування імпульсу та швидкість релаксації мезоскопічної системи (крива 2). Це зумовлено зростанням ролі когерентних процесів у системі під час релаксації. І навпаки, збільшення G_{kk} однієї k -ї частинки, тобто зменшення часу її радіаційної спонтанної релаксації (наприклад, завдяки поверхневим рівням обмеженої поверхні), приводить до зменшення інтенсивності випромінювання та збільшення його тривалості (крива 3). Такий результат добре узгоджується з тим, що інтенсивність випромінювання під час когерентних процесів пропорційна до N^2 .

1. *Гадомский О.Н.* Когерентная передача квантовой информации между кубитами, селективно взаимодействующими с внешним оптическим излучением / О.Н. Гадомский, Ю.Я. Харитонов // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: сб. статей IX Междунар. молодежной науч. школы. – Казань: КГУ, 2005. – С. 73–76.
2. *Zhang X.H.* Excitonradiative lifetime in ZnO quantum dots embedded in SiO_x matrix/ X.H. Zhang, S.J. Chua, A.M. Yong, S.Y. Chow// Appl. Phys. Letters. – 2006. – Vol. 88. – 221903.
3. *Xia M.* Superradiant emission from a tapered QD semiconductor diode emitter / M. Xia, R.V. Penty, I.H. White // Quantum dot meeting University of Cambridge. – 2010. – P. 17.
4. *Карачинский Л.Я.* Механизм сверхизлучения Дике в полупроводниковых гетероструктурах / Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, Г.Г. Згеря // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 7. – С. 872–876.
5. *Гавриленко Е.А.* Волны поляризации при сверхизлучательном распаде локализованных излучений в линейной цепочке атомов / Е.А. Гавриленко, А.И. Зайцев // Теор. физика. – 2008. – Т. 9. – С. 93–97.
6. *Купчак И.М.* Характеристики экситонов и экситонная фотолюминесценция структур с кремниевыми квантовыми точками / И.М. Купчак, Д.В. Корбутяк, Ю.В. Крюченко и др. // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. Вып. 1. – С. 103–107.

DYNAMICS OF RELAXATION EXCITATIONS IN MESOSCOPIC CLUSTER DURING SUPERRADIATION DECAY

L. Demkiv, T. Demkiv

*Ivan Franko National University of L'viv,
50 Dragomanov St., UA-79005 Lviv, Ukraine
tdemkiv@gmail.com*

The apparatus density matrix and semiclassical approach are used to study the dynamics of superradiation pulse formation in a system with a high density of excited particles – dipoles which affect each other by interacting dipole moment with the total electromagnetic field of a number of neighboring dipoles. Consideration of dipole-dipole interaction at the micro level allows to explain new experimental facts in optics nanoparticles. The influence of system parameters, which forms a mesoscopic cluster, and single particle parameters on the dynamics of the relaxation was investigated.

Key words: superradiations, dipole interaction.

**ДИНАМИКА СВЕРХИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ВОЗБУЖДЕНИЙ В
МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ КЛАСТЕРАХ**

Л. Демкив, Т. Демкив

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. Драгоманова, 50, 79005 Львов, Украина
tdemkiv@gmail.com*

Использовано аппарат матрицы плотности и полуклассический подход для исследования динамики формирования импульса сверхизлучения в системе с высокой плотностью возбужденных частиц – диполей, которые влияют друг на друга за счет взаимодействия дипольного момента с суммарным электромагнитным полем ряда соседних диполей. Учет диполь-дипольного взаимодействия на микроуровне позволяет объяснять новые экспериментальные факты в оптике наночастиц. Исследовано влияние параметров системы, которая образует мезоскопический кластер, и параметров одной частицы на динамику релаксации возбуждений.

Ключевые слова: сверхизлучение, взаимодействие диполей.

Стаття надійшла до редколегії 23.12.2012

Прийнята до друку 16.01.2013