

КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ НАНОЛАЗЕРІВ

Мачехін Ю.П., Курський Ю.С., Гнатенко О.С., Пуляєв Ю.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки
61166, Харків, пр. Науки, каф. фотоніки і лазерної інженерії
тел. (057) 702-14-84, факс (057) 702-11-13

E-mail: yurii.kurskyi@nure.ua

The paper presents an overview of the problem of management and stabilization of the nanolasers radiation characteristics. It is shown that the main factors, hindering the practical using of nanolasers, are the unresolved questions of stabilization and control of the emission parameters: the stability of radiation characteristics, coherence, focusing a beam, joint work of the nanolasers ensemble, noises, and so on. It's described the project "The Management of Nanolasers Characteristics". In the frame of the project it's planed to study the radiation parameters of nanolasers (frequency, phase, power, polarization, geometry of the beam) and to develop the principles of stability and management of their. The main idea of the project is based on a control of nanolaser radiation frequency with the different material that influence on a mode of the laser generation. For the control nanolasers radiation frequency it is necessary to identify the mechanisms of influence on the radiation frequency. The project foresees to use a photonic crystal as a management environment.

Вступ

Нанолазерна інженерія є одним із напрямків нанофотоніки, що інтенсивно розвивається останнє десятиріччя провідними науковими центрами світу. Перші публікації про створення лазерів нано-розмірів датуються 2007 роком (М.Хіл, Технічний університет Ейндровена, Нідерланди). У статті [1] було описано перший металонапівпровідниковий нанолазер із імпульсним режимом випромінювання. Завдяки своїй колоноподібній конструкції лазер Хіла отримав назву «goldfinger».

У 2011 році С. Дінг із колегами запропонували нанолазер, що працював у постійному режимі випромінювання за кімнатної температури [2]. Лазер мав розміри $0.34 \times 3 \times 1.53$ мкм, електричне накачування, довжину хвилі випромінювання $\lambda = 1554$ нм, ширину лінії випромінювання 4 нм, добротність дорівнювалася 400. Але лазер мав великі енергетичні втрати. У 2012 році авторам вдалося зменшити втрати за рахунок збільшення товщини оболонки із нітриту кремнію до 30 нм [3]. Новий лазер мав розміри $1.15 \times 1.39 \times 1.7$ мкм та ширину лінії випромінювання 0,54 нм.

У роботі М. Хаявихан [4] представлено коаксіальний нанолазер із оптичним накачуванням. Група під керівництвом С. Фейман (Університет Каліфорнії в Сан-Дієго) розробила дві конструкції: із 100 нм ядром та оточенням 100 нм та із 175 нм ядром та 75 нм оболонкою.

Наноласери на сьогодні є перспективним напрямком нанофотоніки. Вирішується питання застосування нанолазерів в якості інструментів нанороботів медичного призначення, інструментів створення нових оптичних стандартів частоти, приладів вимірювання часу. Наноласери будуть використані для створення елементів квантового комп'ютера. Основним фактором, що гальмує широке практичне використання нанолазерів є невирішене питання стабілізації та керування параметрами випромінювання: стабільність характеристик випромінювання; когерентність, фокусування пучка, сумісна робота ансамблю нанолазерів, боротьба із шумами та ін.

Питання створення нанолазерів із високим ступенем стабільності параметрів випромінювання є актуальним завданням сучасної нанофотоніки.

Основна частина

Поруч із публікаціями про нові конструкції та матеріали для нанолазерів з'являються роботи щодо глибокого дослідження причин нестабільності характеристик випромінювання та шумів. У статті П. Гінзбурга та А. Заяц [5] автори розробили теоретичні основи для опису активних плазмонних структур і, зокрема, ширини лінії

посилення та додаткового розширення ліній внаслідок шуму резонатора. Дослідниками Chang Yeong Jeong и Sangin Kim запропоновано новий механізм вибору режиму роботи резонатору, який може бути прийнятий до реалізації оптичною накачкою нанолазера з широким діапазоном перестроювання довжини хвилі.

Аналіз публікацій вказує на початковий етап дослідження питання стабілізації та керування параметрами випромінювання. Наприклад, крім стабілізації частоти невіршеними залишаються питання стабілізації потужності, фази та поляризації, проблема монохроматичності випромінювання нанолазерів також залишається відкритою.

Лабораторією Фотоніка кафедри фотоніки та лазерної інженерії ХНУРЕ виконується проект «Керування параметрами нанолазерів». Метою проекту є дослідження параметрів випромінювання нанолазерів, а саме: частоти, фази, потужності, поляризації, геометрії пучка випромінювання з подальшим розроблянням принципів забезпечення їхньої стабільності та керування ними.

Теоретичні основи лазерів складаються з трьох незалежних складових: теорія відкритих резонаторів, теорія активних середовищ, теорія накачування лазерного активного елемента. Кожного разу, як розробляється новий тип лазера, розробляється нова теорія складові якої принципово змінюється. Зменшення розмірів резонатора лазера до наноодномірного розміра ставить задачу розрахунку спектральних властивостей випромінювання в умовах, коли довжина резонатора набагато менша за довжину хвилі випромінювання. З цієї причини вирішення питання створення нанолазерів із високим ступенем стабільності параметрів випромінювання є актуальним завданням сучасної нанофотоніки, оскільки майбутнє лазерів у вимірювальних задачах безпосередньо пов'язане не тільки з частотними характеристиками, а й із нанорозмірами лазера.

Керування частотою випромінювання нанолазерів вперше було реалізовано в конструкції рідинного нанолазера (Teri Odom), однак точного опису реалізованої конструкції в періодичній літературі немає. Основна ідея проекту базується на можливості керування частотою випромінювання нанолазера за допомогою різноманітних матеріальних середовищ, які впливають на режим генерації лазера.

Пріоритетним напрямком із цього комплексного завдання є стабілізація частоти та керування нею. Тому, одна з задач проекту полягає у встановленні та дослідженні механізму керування частотою випромінювання. Друга задача пов'язана з аналізом умов стабілізації частоти лазерного випромінювання за частотним репером.

Основна ідея проекту базується на можливості керування частотою випромінювання нанолазера за допомогою різноманітних матеріальних середовищ, які впливають на режим генерації лазера. Для керування частотою випромінювання нанолазерів необхідно виявити механізм чи механізми впливу на частоту випромінювання. У проекті передбачено використовувати фотонний кристал в якості керуючого середовища. Відомо, що в цих середовищах можна здійснювати зміну частоти лазера. Авторами було досліджено питання стабілізації частоти чіп-лазерів за допомогою фотонно-кристалічної комірки із молекулами йоду. Подібну фотонно-кристалічну структуру буде досліджено щодо можливості стабілізації частоти нанолазерів.

Дослідження будуть виконані у два етапи. На першому етапі планується виконати дослідження нанолазерів різних конструкцій з метою виявлення фізичних процесів та факторів, що впливають на частоту випромінювання та стабільність частоти нанолазерів. Буде досліджена фізика формування та властивості плазмонів, активних середовищ, питань оптичного та електричного накачування лазерного активного елемента, фізика розповсюдження лазерного випромінювання. Кожного разу, як розробляється новий тип лазера, розробляється нова теорія складової, яка принципово змінюється. Зменшення розмірів резонатора лазера до наноодномірного розміра ставить задачу розрахунку спектральних властивостей випромінювання в умовах, коли довжина резонатора набагато менша за довжину хвилі випромінювання. Будуть досліджені фактори впливу на стабільність частоти випромінювання.

На другому етапі будуть запропоновані принципи та реальні механізми стабілізації та керування частотою нанолазерів. Досягти мети планується як шляхом вдосконалення існуючих конструкцій так і пропонуванням нових схем із використанням фотонних кристалів. Будуть спроектовані фотонні кристали із заданими властивостями. Розроблятиметься механізм керування частотою та стабільністю параметрів випромінювання із задіянням фотонно-кристалічних конструкцій нанорозмірів. Буде запропонована модель нанолазерів із можливістю керування параметрами випромінювання та досягнення стабілізації частоти за час усереднення 0,001-0,1 с.

Успішна реалізація проекту створення нанолазерів із високим ступенем стабільності параметрів випромінювання дозволить: створити теорію нанолазерів із високою стабільністю та керуваністю параметрів випромінювання; сприяти розвитку нанофотонної техніки, створенню фотонних інструментів для оснащення нанороботів та інструментів керування нано-об'єктами; розвитку нанометрології, створенню стандартів частоти на основі випромінювання нанолазерів; розвитку сучасної вітчизняної школи нано-фотоніки світового рівня.

Висновки

Виконано огляд проблеми створення та стабілізації характеристик випромінювання нанолазерів. Показано, що основним фактором, що гальмує широке практичне використання нанолазерів є невирішене питання стабілізації та керування параметрами випромінювання: стабільність характеристик випромінювання; когерентність, фокусування пучка, сумісна робота ансамблю нанолазерів, боротьба із шумами та ін. Описано проект «Керування параметрами нанолазерів». Метою проекту є дослідження параметрів випромінювання нанолазерів, а саме: частоти, фази, потужності, поляризації, геометрії пучка випромінювання з подальшим розроблянням принципів забезпечення їхньої стабільності та керування ними. Основна ідея проекту базується на можливості керування частотою випромінювання нанолазера за допомогою різноманітних матеріальних середовищ, які впливають на режим генерації лазера. Для керування частотою випромінювання нанолазерів необхідно виявити механізм чи механізми впливу на частоту випромінювання. У проекті передбачено використовувати фотонний кристал в якості керуючого середовища.

Список літератури:

1. M. Hill. Lasing in metallic-coated nanocavities. *Nature Photon.*, 1, 589, 2007.
2. K. Ding et al., Room-temperature continuous wave lasing in deep-subwavelength metallic cavities under electrical injection, *Phys. Rev. B*, 85, 041301(R) (2012); doi:10.1103/PhysRevB.85.041301.
3. K. Ding et al., Record Performance of a CW Metallic Subwavelength-Cavity Laser at Room Temperature, *CLEO 2012 Tech. Dig.*, paper CTh4M.3.
4. M. Khajavikhan et al., "Thresholdless nanoscale coaxial lasers," *Nature*, 482, 204 (Feb. 9, 2012); doi:1RI40.
5. P. Ginzburg, A.V. Zayats Linewidth enhancement in spasers and plasmonic nanolasers» 28 January 2013 / Vol. 21, No. 2 / *Optics express* 2147.