

УДК 681.7.08

Г.Л. ЛИСЕНКО, Д.С. КОСТЮЧЕНКО

ЛАЗЕРИ ПОВЕРХНЕВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВЕРТИКАЛЬНИМ ОБ'ЄМНИМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ ПОБУДОВИ МАСИВІВ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ПАМ'ЯТІ

*Вінницький державний технічний університет
21021, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна*

Анотація. Розглянуто швидкісні рівняння лазерів поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором та об'єднаною порожниною (CC-VCSEL) з оптичним керуванням. Описано структуру об'єднаного резервуара CC-VCSEL. Розглянуто функціонування лазерів поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором і оптичним та електричним керуванням для побудови масивів оптоелектронної пам'яті.

Аннотация. Рассмотрены скоростные уравнения лазеров поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором и объединенной полостью (CC-VCSEL) с оптическим управлением. Описана структура объединенного резервуара CC-VCSEL. Рассмотрены функционирования лазеров поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором и оптическим и электрическим управлением для построения массивов оптоэлектронной памяти.

Abstract. Speed equations of vertical cavity surface emitting lasers and the coupled cavity (CC-VCSEL) with optical control was considered. The structure of the combined reservoir CC-VCSEL was considered. Functioning of vertical cavity surface emitting lasers and optical and electrical control was considered to build arrays of optoelectronic memory.

Ключові слова: VCSEL, оптоелектронний RS-тригер, CC-VCSEL, електроабсорбційні модулятори світла, квантово-розмірні структури.

ВСТУП

Оптоелектронні системи обробки та зберігання інформації дозволяють паралельно оброблювати великі масиви даних у матричному вигляді. Застосування матричної передачі даних (в т.ч. зображень) дозволяє реалізувати принцип паралелізму оптоелектронних систем. При побудові оптоелектронних систем та компонентів часто виникає потреба у джерелі оптичного сигналу (інформаційного або енергетичного) поданого у вигляді матриці, для забезпечення взаємодії з масивом оптоелектронних пристроїв. У такому випадку ефективно застосовувати матриці лазерів, зокрема матриці лазерів поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором (VCSEL), що характеризуються низьким енергоспоживанням та достатньо високою потужністю [1]. Пропонується використовувати елементи масивів VCSEL великої розмірності в якості джерела оптичного живлення для елементів оптоелектронної пам'яті в якості комірок великорозмірного масиву [2]. На сьогоднішній день існують масиви VCSEL великої потужності розмірністю 100×100 елементів [3]. В якості джерела інформаційного сигналу пропонується використовувати масив VCSEL з об'єднаною порожниною (CC-VCSEL) з оптичним керуванням.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У якості елементарних комірок для побудови масивів асинхронної та синхронної оптоелектронної пам'яті пропонується використовувати асинхронні та синхронні RS-тригери, так як вони є найпростішими оптоелектронними елементами пам'яті [4].

Основними елементами комірок для побудови масивів оптоелектронних тригерів є електроабсорбційні модулятори світла та елементи масиву VCSEL. При побудові елементів оптоелектронної пам'яті використовується керування коефіцієнтом поглинання електроабсорбційних модуляторів світла, що працюють на пропускання вхідного оптичного сигналу. Для керування електроабсорбційними модуляторами у оптоелектронних елементах пам'яті використовується діапазон робочих напруг 0-4 В з значенням логічної одиниці 0-1 В, а логічного нуля – 3-4 В, з використанням довжини хвилі оптичного сигналу живлення 855 нм [2].

В якості джерела постійного оптичного сигналу для масиву оптоелектронної пам'яті

пропонується використовувати 2D масив VCSEL, завдяки високій інтенсивності вихідного променя, зручності виготовлення в інтегральному виконанні та вузьконаправленому та інтенсивному спектру оптичного випромінювання на необхідній довжині хвилі [5].

На відміну від лазерів з торцевим випромінюванням, дзеркала в VCSEL монолітно інтегровані під час вирощування у формі діелектричних дзеркал. Використовуючи даний вид виготовлення легко виготовити прилади з ідентичними секціями вертикальних порожнин, де дві секції розділені дзеркалом, чий коефіцієнт відбиття можна контролювати, щоб інтегрувати дві мікропорожнини із загальним дзеркалом, між ними необхідно лише контролювати процес зростання.

Пропонується використовувати структури на основі CC-VCSEL з оптичним та електричним керуванням, в якості вхідних та вихідних каскадів масивів оптоелектронної пам'яті. Для цих структур характерними є монолітні вирощування з'єданого резонатора, здатність легко змінювати величину з'єднання і здатність виготовляти 2D масиви. Ця монолітна інтеграція з'єднаних резонаторів у межах вертикальної порожнини лазера відкриває нові можливості через здатність розділити взаємодію між порожнинами та можливість оптичного та електричного керування ними.

МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Масиви VCSEL можуть бути використані як потужні джерела випромінювання, завдяки виготовленню великорозмірних двовимірних (2D) масивів з низьким енергоспоживанням, та високою ефективністю випромінювання окремого елемента масиву. VCSEL в якості джерела випромінювання представляють багато переваг, які включають низьку вартість виробництва, надійність, і хороші спектральні показники випромінювання [5].

Крім того, на відміну від торцевих лазерів, VCSEL не страждають від нестабільної роботи при зміні параметрів лазера від температури, отже VCSEL можуть надійно працювати при високих температурах, усуваючи необхідність в охолоджувальній установці в деяких пристроях.

Структуру елемента 2D масиву VCSEL створеного на основі GaAs зображено на рисунку 1.

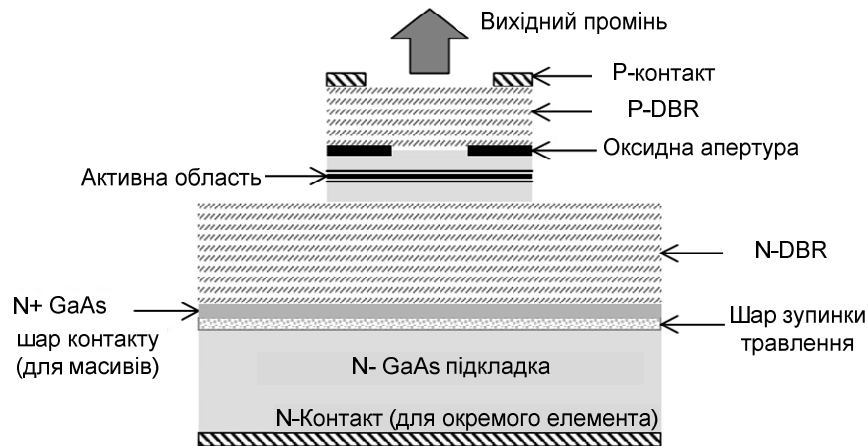


Рис. 1. Структура елемента 2D масиву VCSEL створеного на основі GaAs з активною зоною на InAlGaAs з великою кількістю квантових ям

Для електричного та оптичного обмеження, виборчий процес травлення використовується для створення апертурних отворів поруч з активною областю для підвищення продуктивності [6]. Зростання починається з шару зупинки травлення для полегшення видалення підкладки при обробці масивів в процесі їх виготовлення. Після шару зупинки травлення починається обробка сильно легованого N-GaAs шару, який використовується в якості N-контакту для елемента масиву. Тоді розподілені Брегівські відбивачі (distributed Bragg reflectors - DBR) створені на основі AlGaAs N-типу з високим коефіцієнтом відбиття. Активна область складається з InAlGaAs з великою кількістю квантових ям, з DBR P-типу розміщеними над нею. Шар з високим вмістом алюмінію розташований поряд з першою парою P-DBR для утворення оксидної апертури. Розміщення та конструкція апертури є критичним для мінімізації оптичних втрат і розповсюдження струму [7].

Розглянемо параметри пучка лазерного випромінювання елемента масиву VCSEL, що потрапляє на вхід електроабсорбційного модулятора світла. Використовуватимемо масив VCSEL з вихідною потужністю променя 4.7 мВт та діаметром пучка 5 мкм [3]. При цьому отримаємо площу поперечного

перерізу пучка $1.963 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ та інтенсивність випромінювання $2.394 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$. Для ефективного перемикання електроабсорбційного модулятора на основі керування динамічним коефіцієнтом керування у модуляторах значення статичного коефіцієнта поглинання не повинно перевищувати значень $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$.

Електроабсорбційні модулятори світла при пропусканні оптичного сигналу живлення елемента масиву VCSEL показали найкращі результати при значенні статичного коефіцієнта поглинання не більше 500 см^{-1} а товщини напівпровідникового шару на рівні 20 мкм [2]. Розрахунок проводився за допомогою закону Бугера-Ламберта-Бера для наноструктур при значенні концентрації квантових ям у середовищі модулятора $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ та площі поверхні електроабсорбційного модулятора $2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Результат дослідження на основі експериментальних даних, отриманих з джерела [8]. показав, що при побудові масивів оптоелектронної пам'яті доцільно використовувати діапазон зовнішньої напруги прикладеної до електроабсорбційного модулятора від 0 до 4 В, з значенням логічної одиниці від 0 до 1 В, а значенням логічного нуля від 3 до 4 В із забороненою зоною 1-3 В [2].

В якості вхідного та вихідного каскаду для забезпечення інформаційного сигналу для масиву оптоелектронної пам'яті використовується масив СС-VCSEL з оптичним керуванням [9]. Це дозволяє отримати стабільний вхідний оптичний сигнал з необхідними спектральними характеристиками та потужністю. На рисунку 2 зображено структурну схему резервуара СС-VCSEL, з розділенням мод між порожнинами.

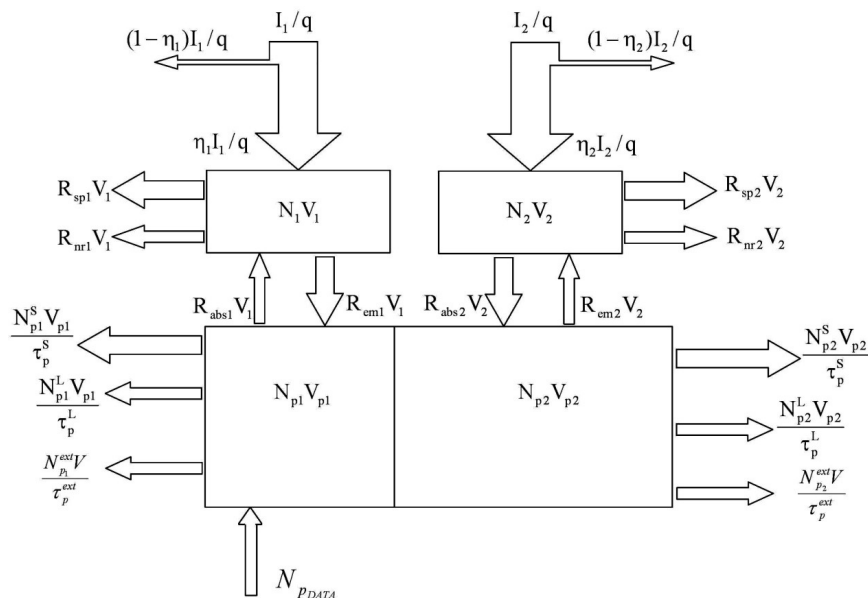


Рис. 2. Модель резервуара елемента масиву СС-VCSEL з оптичним керуванням

Функціонування VCSEL з об'єднаною порожниною описується, починаючи з розробки швидкісного рівняння для числа носіїв, N , і числа фотонів, $N_{ph}^{S,L}$, для двох оптичних мод. Модель резервуара, яка використовується для розробки швидкісного рівняння, показана на рис. 2. Використовується індекс $i = 1, 2$ для позначення порожнини (1 - верхня, більш коротка порожнина, 2 - нижня, більш довга порожнина) та індекс «S» або «L» для позначення короткої або довгої моди. Коротка мода обмежена в короткій верхній ($i = 1$) порожнині, а довга мода обмежена в довгій нижній ($i = 2$) порожнині. Число носіїв, інжекттованих в кожен порожнину лазера, становить I_i/q , але лише частина $\eta_i I_i/q$ досягає активної зони квантової ями i , де η_i позначає ефективність інжекттованих носіїв лазера. Рекомбінація носіїв, що досягли резервуара складається з чотирьох компонентів: не випромінюючої рекомбінації при швидкості R_{nr} , спонтанної рекомбінації при швидкості R_{sp} , при якій певна частина, представлена R_{sp} коефіцієнтом спонтанної емісії, що рекомбінує у потрібній моді β_{sp} , стимульованої рекомбінації при випромінюванні R_{em} , стимульованої абсорбції при прийманні вхідного оптичного сигналу R_{abs} .

Спонтанною рекомбінацією в модах порожнини можна знехтувати. Швидкість рекомбінації буде виражена, на одиницю об'єму, і потім помножена на об'єм V_i активної зони, тобто квантових ям, як зображено на рис. 2. V_{pi} представляє величину оптичних мод в порожнинах. Число фотонів у модах «S» і «L» у двох фотон-ємностях змінюється наступним чином: стимульована і спонтанна емісія забезпечують емісію фотонів зі швидкістю $R_{em} + R_{st} + R_{sp}$ в той час, як абсорбція в активній зоні зменшує кількість фотонів зі швидкістю R_{abs} . Всі інші фотони або залишають порожнину через дзеркала або абсорбуються

всередині [10].

Для оцінки швидкодії роботи масиву СС-VCSEL, та необхідної потужності вхідного оптичного сигналу можна використовувати швидкісні рівняння для VCSEL з об'єднаними порожнинами [11]. Швидкісні рівняння для фотонів в модах коротких, довгих і зовнішньої оптичних хвиль мають вигляд:

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^S + N_{p,2}^S) = \frac{dN_p^S}{dt} = \left[(R_{em,1}^S - R_{abs,1}^S) \cdot V_1 + (R_{em,2}^S - R_{abs,2}^S) \cdot V_2 \right] + (\beta_{sp,1}^S R_{sp,1} V_1 + \beta_{sp,2}^S R_{sp,2} V_2) - \frac{N_p^S}{\tau_p^S};$$

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^L + N_{p,2}^L) = \frac{dN_p^L}{dt} = \left[(R_{em,1}^L - R_{abs,1}^L) \cdot V_1 + (R_{em,2}^L - R_{abs,2}^L) \cdot V_2 \right] + (\beta_{sp,1}^L R_{sp,1} V_1 + \beta_{sp,2}^L R_{sp,2} V_2) - \frac{N_p^L}{\tau_p^L};$$

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^{ext} + N_{p,2}^{ext}) = \frac{dN_p^{ext}}{dt} = \left[(R_{em,1}^{ext} - R_{abs,1}^{ext}) \cdot V_1 + (R_{em,2}^{ext} - R_{abs,2}^{ext}) \cdot V_2 \right] - \frac{N_p^{ext}}{\tau_p^{ext}};$$

де представлено загальне число фотонів $N_p^{S,L,ext}$ в моді «S», «L» або в зовнішньому оптичному пучку. Зміна щільності носіїв в порожнині i через стимульовану емісію та стимульовану абсорбцію здійснюється таким чином:

$$R_{em,i} - R_{abs,i} = \frac{2\xi_i^S v_g^S}{V_{p,i}} N_{p,i}^S g_i^S + \frac{2\xi_i^L v_g^L}{V_{p,i}} N_{p,i}^L g_i^L + \frac{2\xi_i^{ext} v_g^{ext}}{V_i} N_{p,i}^{ext} g_i^{ext}$$

Дане рівняння дійсне для $i=1,2$, де $g_i^{S,L,ext}$ означає коефіцієнти підсилення для мод «S», «L» або для зовнішньої оптичної хвилі в порожнині i , $v_g^{S,L,ext}$ – групова швидкість фотонів у відповідній моді, а $V_{p,i}$ – обсяг фотонної порожнини i , коефіцієнт 2 враховує те, що один фотон перетинає активну зону два рази протягом одного проходу. Параметр $\xi_i^{S,L,ext}$ означає коефіцієнт посилення стоячої хвилі, що залежить від розміщення квантових ям по відношенню до розподілу поля в резонаторі та активній зоні. Величина $\xi_i^{S,L,ext}$ змінюється в проміжку від 0, якщо квантові ями розміщені у вузлі поля, і до 2, якщо квантові ями розміщені в максимумі поля. Коефіцієнти посилення стоячої хвилі є проектними параметрами пристрою, що обчислюються з використанням матриці передачі.

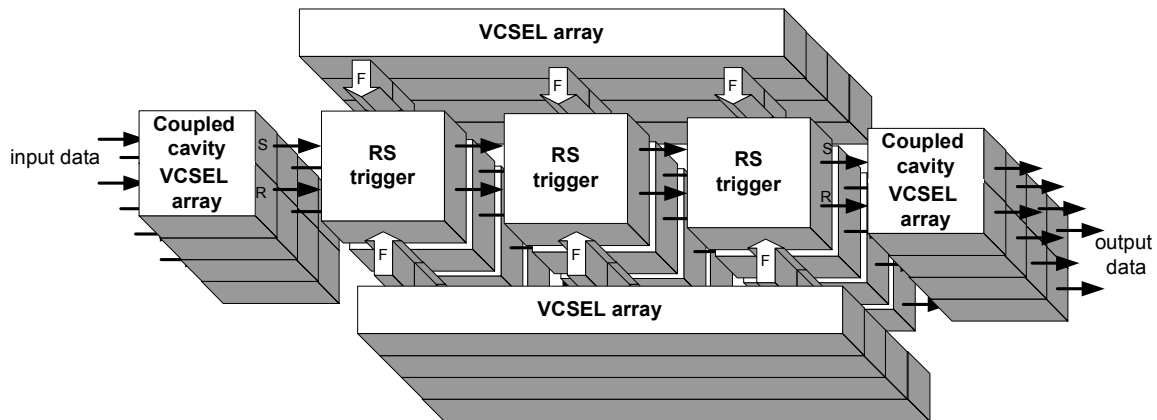


Рис. 3. Структурна схема масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті з використанням масиву VCSEL в якості джерела оптичного живлення

На рисунку 3 зображено спрощену структурну схему масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті на основі оптоелектронного асинхронного RS-тригера [4] з використанням масиву VCSEL в якості джерела оптичного живлення. Горизонтальні сигнали позначають інформаційні сигнали пристрою S та R, а вертикальні – сигнали оптичного живлення F. Для прикладу показано матрицю асинхронних RS-тригерів розміром 3x4 з оптичним живленням. Масиви СС-VCSEL з оптичним та електричним керуванням використовуються в якості вхідних та вихідних каскадів масивів оптоелектронної пам'яті. Така побудова дозволяє отримати стабільний вхідний оптичний сигнал з необхідними спектральними характеристиками та потужністю.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто використання масивів VCSEL в якості джерела оптичних сигналів для побудови масивів оптоелектронної пам'яті, у поєднанні з електроабсорбційними модуляторами світла. Розглянуто структуру VCSEL та основні параметри, що є важливими при інтеграції з оптоелектронною пам'яттю. Описано функціонування та модель резервуара CC-VCSEL з оптичним керуванням та розділенням мод між порожнинами. Розглянуто модель швидкісних рівнянь CC-VCSEL. Наведено спрощену структурну схему масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті на основі оптоелектронного асинхронного RS-тригера з використанням масивів VCSEL. Масиви оптоелектронної пам'яті можуть бути використані в інформаційно-обчислювальних системах для побудови спеціалізованих обчислювальних пристроїв з паралельною обробкою інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. D. Francis, H.-L. Chen, W. Yuen, G. Li, and C. Chang-Hasnain, "Monolithic 2D-VCSEL array with >2 W CW and 5 W pulsed output power," *Electron. Lett.*, 34(22), 2132-2133 (1998).
2. Лисенко Г.Л. Побудова елементів оптоелектронної пам'яті з використанням електроабсорбційних модуляторів світла / Г.Л. Лисенко, Д.С. Костюченко // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. — 2012. — № 1(23). — С. 88—91.
3. Seurin, J.-F., Xu, G., Khalfin, V., Miglo, A., Wynn, J. D., Pradhan, P., Ghosh, C. L., and D'Asaro, L. A., "Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays," *Proc. SPIE* 7229, 722903 (2009).
4. Лисенко Г.Л., Костюченко Д.С., Бурмакіна О.В. Патент на корисну модель «Оптоелектронний асинхронний RS тригер» №62527 Зареєстровано в державному реєстрі патентів на корисні моделі 25.08.2011
5. Tatum, J. A., Clark, A., Guenter, J. K., Hawthorne III, R. A. and Johnson, R. H., "Commercialization of Honeywell's VCSEL technology," *Proc. SPIE*, 3946, 2-13 (2000).
6. Huffaker, D. L., Deppe, D. G., Kumar, K. and Rogers, T. J., "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, 65(1), 97-99 (1994).
7. Hegblom, E. R., Margalit, N. M., Fiore, A. and Coldren, L. A., "High-performance small vertical-cavity lasers: a comparison of measured improvements in optical and current confinement in devices using tapered apertures," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 5(3), 553-560 (1999).
8. Vijit Sabnis. Optically-controlled electroabsorption modulators for future generation optical networks// A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003. P. 166–170.
9. V. Badilita, J. F. Carlin, M. Ilegems, M. Brunner and G. Verschaffelt et al. Control of polarization switching in vertical coupled-cavities surface emitting lasers, in *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 16, num. 2, p. 365-367, 2004.
10. Krassimir P. Panajotov, Mateusz Zujewski, and Hugo Thienpont, "Coupled-cavity surface-emitting lasers: spectral and polarization threshold characteristics and electrooptic switching," *Opt. Express* 18, 27525-27533 (2010).
11. Vlad Badilita, Jean-Francois Carlin, Marc Ilegems and Krassimir Panajotov, "Rate-Equation Model for Coupled-Cavity Surface-Emitting Lasers", *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 40, no. 12, december 2004.

Надійшла до редакції 10.12.2012 р.

ЛИСЕНКО ГЕНАДІЙ ЛЕОНІДОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.

КОСТЮЧЕНКО ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ – магістрант інституту магістратури, аспірантури та докторантури, Вінницький національний технічний університет, Україна.