

УДК 004.315

Г. Л. ЛЫСЕНКО, С. Е. ТУЖАНСКИЙ, М. М. А. АЛЬБАВАНДИ

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СУММАТОР-УМНОЖИТЕЛЬ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА DMAC

*Винницкий национальный технический университет,
21021, г. Винница, ул. Хмельницкое шоссе 95, Украина
E-mail: lgl@vntu.edu.ua*

Аннотация. Предложена математическая модель итерационного процесса решения СЛАУ, в которой входной массив коэффициентов разбивается на обрабатываемые аппаратные массивы частичных разрядных сумм и соответствующих поразрядных переносов, что позволяет параллельно и одновременно (при оптической реализации) вычислять операторы суммы и сдвига. Предложена архитектура оптоэлектронного матричного сумматора-умножителя для реализации вычислений согласно модели по алгоритму временного суммирования DMAC. Исследована усовершенствованная модель элемента массива SS-VCSEL с внешней оптической эмиссией в резонаторе как базового элемента ПВМС для оптического линейно-алгебраического процессора.

Ключевые слова: СЛАУ, частичные разрядные суммы, оптоэлектронный линейно-алгебраический процессор, пространственно-временной модулятор света, вертикально-излучающие лазеры со связанными резонаторами.

Анотація. Запропоновано математичну модель ітераційного процесу розв'язання СЛАУ, в якій вхідний масив коефіцієнтів розбивається на обробні апаратні масиви часткових розрядних сум і відповідних порозрядних переносів, що дозволяє паралельно і одночасно (при оптичній реалізації) обчислювати оператори суми і зсуву. Запропонована архітектура оптоелектронного матричного суматора-помножувача для реалізації обчислень згідно моделі за алгоритмом часового підсумовування DMAC. Досліджено удосконалену модель елемента масиву SS-VCSEL з зовнішньою оптичною емісією у резонаторі як базового елемента ПЧМС для оптичного лінійно-алгебраїчного процесора.

Ключові слова: СЛАУ, часткові розрядні суми, оптоелектронний лінійно-алгебраїчний процесор, просторово-часовий модулятор світла, вертикально-випромінюючі лазери зі зв'язаними резонаторами.

Abstract. Mathematical model of the iterative process of solving systems of linear equations in which the input coefficient array is divided into machining hardware arrays bit partial sums and the corresponding bitwise shifts, which allows to calculate in parallel the operators of sum and shift. The architecture optoelectronic matrix adder-multiplier for the implementation of calculations according to the model by the algorithm of the interim summation of DMAC is proposed. Improved model element of the array SS-VCSEL with external optical emission in the cavity as a basic element of SLM for optical linear algebraic processor is investigated.

Keywords: SLAE, partial discharge sums, optoelectronic linear-algebraic processor, space-time light modulator, vertically-emitting lasers with coupled resonators

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время увеличивается потребность в использовании высокопроизводительной вычислительной техники для фундаментальных и прикладных научных исследований. Для решения сложных вычислительных задач применяются суперкомпьютеры, компьютерные и многопроцессорные системы с массовым параллелизмом, в том числе на однородных вычислительных средах [1—3].

Основным препятствием для развития параллельных вычислительных систем являются технологические ограничения в распараллеливании процессов ввода и вывода обрабатываемых данных при использовании электронной элементной базы. Повышение быстродействия в них достигается за счет уменьшения геометрических размеров структурных элементов (приводит к уменьшению времени распространения сигнала), оптимизации параметров соединений и топологии, а также за счет использования новых эффектов [2—5].

Многие сложные вычислительные задачи формализуются методами линейной алгебры с помощью представления в виде систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большого порядка. Регулярная структура задач линейной алгебры позволяет организовать параллельные вычисления на многопроцессорных системах. Современная электроника обеспечивает при этом требуемую функциональность, однако теряет эффективность при значительном увеличении размерности СЛАУ.

С развитием фотонных технологий появился ряд новых элементов и структур с параллельными вводом/выводом, передачей и обработкой информации. К ним относятся управляемые массивы вертикальных лазеров с соединенными полостями СС-VCSEL, быстродействующие пространственно-временные модуляторы света (ПВМС), когерентные матричные фотоприемные устройства, волоконные брэгговские решетки и другие элементы.

Ряд прикладных исследований в области многофункциональной оптоэлектроники и оптоэлектронных вычислительных устройств выполняется в рамках научной школы д. т. н., профессора В. П. Кожемяко в Винницком национальном техническом университете [4—7].

Таким образом, разработка специализированных арифметических сопроцессоров для решения СЛАУ большой размерности с возможностью организации параллельного вычислительного процесса, созданных на основе новых фотонных и оптоэлектронных технологий, является актуальной задачей современной вычислительной техники.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИТЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ СЛАУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТИЧНЫХ F-РАЗРЯДНЫХ СУММ

Представим СЛАУ большой размерности в виде:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}, \quad (1)$$

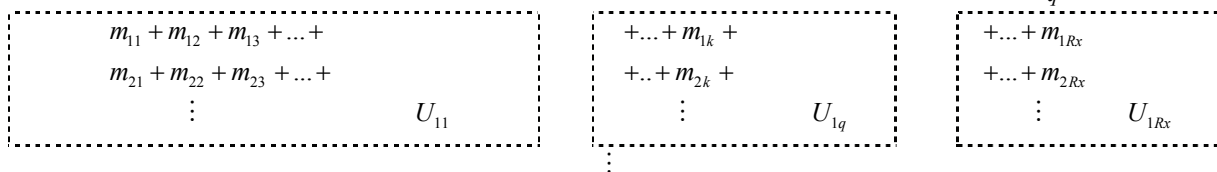
где m — количество уравнений, n — количество переменных, x_1, x_2, \dots, x_n — неизвестные, при этом коэффициенты $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{mn}$ и свободные члены b_1, b_2, \dots, b_m — известны.

Операция вычисления суммы произведений в СЛАУ выполняется путем суммирования полученных поэлементных произведений $m_{ji} = a_{ji} \cdot x_i$ таким образом, что сумма M_q

$$\begin{cases} m_{11} + m_{12} + m_{13} + \dots + m_{1n} = M_1 \\ m_{21} + m_{22} + m_{23} + \dots + m_{2n} = M_2 \\ \vdots \\ m_{q1} + m_{q2} + m_{q3} + \dots + m_{qn} = M_q \\ \vdots \\ m_{n1} + m_{n2} + m_{n3} + \dots + m_{nn} = M_n \end{cases}. \quad (2)$$

может формироваться несколькими путями [4—6].

Допустим, что с помощью u аппаратных массивов $r_x \times r_y$ параллельно (и одновременно в оптической реализации) вычисляется u частичных сумм разрядностью d для получения M_q .



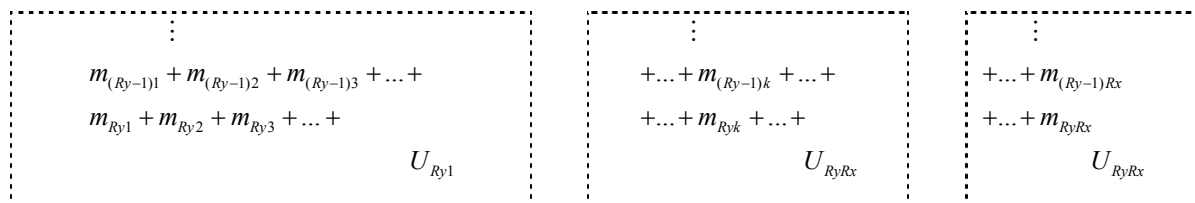


Рис. 1. Разбиение на аппаратные обрабатываемые массивы

Будем считать, что $D = (n-1)(L_a + L_x)$ — двоичная разрядность результата M_q ($d \leq D$, $r_x, r_y \leq n$), а L_a и L_x — разрядность коэффициентов a и переменных x , R_x — количество разбиений СЛАУ на блоки размером $r_x \times r_y$ по x , R_y — количество разбиений СЛАУ на блоки размером $r_x \times r_y$ по y . При этом $R_x \geq \lceil n/r_x \rceil$, $R_y \geq \lceil n/r_y \rceil$ (для $\lceil x \rceil$ выбирается наименьшее целое число $z \geq x$).

Таким образом, разбиение на аппаратные массивы размерностью $r_x \times r_y$ будет иметь следующий вид, представленный на рис. 1. В результате такого разбиения q -я строка СЛАУ вычисляется как $q = \lceil q/r_y \rceil + k$, где k может принимать значения $k = 0, 1 \dots r_y - 1$.

Реализация операции произведения в массиве $r_x \times r_y$ осуществляется путем поразрядного произведения каждого из разрядов $a^0, a^1, a^2 \dots a^d$ на соответствующий разряд $x^0, x^1, x^2 \dots x^d$. Таким образом, формируются промежуточные разряды произведения с соответствующими двоичными весами, которые затем суммируются.

При числе разрядов a и x , равном d , количество разрядов n частичных сумм.

В аппаратном массиве u за время $d \cdot \tau$ получены промежуточные частичные суммы и переносы:

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} S_{11}^{0 \div (d-1)} & S_{12}^{0 \div (d-1)} & S_{13}^{0 \div (d-1)} & \dots & S_{1(r_x/2)}^{0 \div (d-1)} \\ S_{21}^{0 \div (d-1)} & S_{22}^{0 \div (d-1)} & S_{23}^{0 \div (d-1)} & \dots & S_{2(r_x/2)}^{0 \div (d-1)} \\ & & \vdots & & \\ S_{(r_y-1)1}^{0 \div (d-1)} & S_{(r_y-1)2}^{0 \div (d-1)} & S_{(r_y-1)3}^{0 \div (d-1)} & \dots & S_{(r_y-1)(r_x/2)}^{0 \div (d-1)} \\ S_{(r_y)1}^{0 \div (d-1)} & S_{(r_y)2}^{0 \div (d-1)} & S_{(r_y)3}^{0 \div (d-1)} & \dots & S_{(r_y)(r_x/2)}^{0 \div (d-1)} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} C_{11}^{d-1} & C_{12}^{d-1} & C_{13}^{d-1} & \dots & C_{1(r_x/2)}^{d-1} \\ C_{21}^{d-1} & C_{22}^{d-1} & C_{23}^{d-1} & \dots & C_{2(r_x/2)}^{d-1} \\ & & \vdots & & \\ C_{(r_y-1)1}^{d-1} & C_{(r_y-1)2}^{d-1} & C_{(r_y-1)3}^{d-1} & \dots & C_{(r_y-1)(r_x/2)}^{d-1} \\ C_{(r_y)1}^{d-1} & C_{(r_y)2}^{d-1} & C_{(r_y)3}^{d-1} & \dots & C_{(r_y)(r_x/2)}^{d-1} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $0 \div (d-1)$ указывает на сформированные d разрядов частичных сумм S_{pi} и одноразрядные переносы C_{pi}^{d-1} в старший разряд.

Таким образом, предложен математический аппарат для решения СЛАУ итерационным методом частичных поразрядных сумм, который позволяет разделять входной массив коэффициентов на аппаратные массивы с параллельным и одновременным (в случае оптической аппаратной реализации) вычислением операторов суммы и сдвига.

АРХИТЕКТУРА ОПТОЭЛЕКТРОННОГО МАТРИЧНОГО СУММАТОРА-УМНОЖИТЕЛЯ

Базовая архитектура оптоэлектронного матричного сумматора-умножителя (ОМСУ) как одного из вариантов реализации оптического линейно-алгебраического процессора [8] представлена на рис. 2.

ОМСУ состоит из матрицы модифицированных вертикальных лазерных диодов со связанными резонаторами (СС-VCSEL массив с оптическими управляющими каналами, в котором каждый из элементов выполняет функцию генератора параллельного лазерного пучка и локального ПВМС), матрицы интегрированных с АЦП фотоприёмников (МФП), матриц специализированных масок дифракционных структур (ДС) и цифрового устройства управления.

Ввод данных в оптическую часть процессора, вывод данных из оптической части процессора с последующим преобразованием к требуемому виду и обмен информацией с внешними устройствами обеспечивает устройство управления и преобразования данных.

Массив СС-VCSEL с оптическими управляющими входами каждого из лазерных элементов предназначен для ввода в процессор значений элементов исходных матрицы и вектора (разрядов их кодовых представлений). Результаты вычисления в процессоре снимаются с МФП, составляющих массив фотоприёмных устройств с интегрированными АЦП. Дифракционные элементы выполняют функции оптических масок. Расположенные в определенных местах пространства дифракционные решетки позволяют формировать результаты вычислений разрядных частичных сумм, переносов и результатов умножения, которые получаются в результате конструктивной или деструктивной интерференции [9] в локальных областях, соответствующих элементам массивов S_w , C_u и M_q аппаратных матриц u . Информативным параметром является интенсивность излучения.

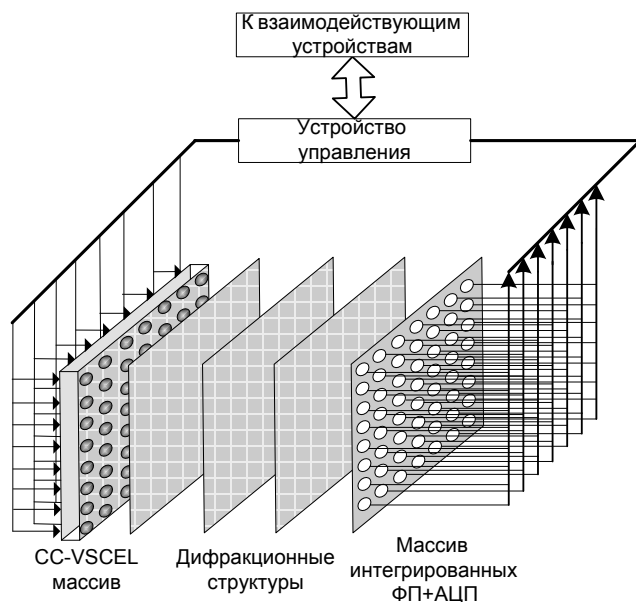


Рис. 2. Обобщенная структурная схема ОМСУ

Выполнение операции векторно-матричного перемножения с помощью ОМСУ рассмотренной архитектуры может осуществляться по различным алгоритмам. Предлагается для реализации параллельный алгоритм, основанный на совмещении во времени операций согласно классическому определению произведения двух матриц.

АЛГОРИТМ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНОГО ПЕРЕМНОЖЕНИЯ DMAC

Алгоритм линейно-алгебраического спецпроцессора должен обеспечивать возможность представления данных в различных формах с перераспределением вычислительных операций между оптической и электронной частями процессора, а также возможность выбора элементной базы.

Предлагаемый для ОМСУ алгоритм DMAC (*Digital Multiplication via Analog Convolution*) состоит в формировании дискретной свёртки последовательностей цифр, представляющих перемножаемые числа в некоторой системе счисления. Полученная последовательность интерпретируется как запись результата умножения в смешанном коде.

Применение алгоритма DMAC позволяет за счёт цифрового представления величин на входе системы, увеличения времени обработки и некоторого усложнения постобработки результата повысить точность вычислений, упростить сопряжение с цифровыми электронными средствами, а также даёт возможность обрабатывать знакопеременные числа (в дополнительном коде) [7].

Цикл вычислений по алгоритму DMAC начинается с загрузки в ПВМС элементов вектора-столбца x , вводимых в ПВМС параллельным кодом. После того, как все элементы вектора заполнили апертуру ПВМС, начинается ввод элементов строки матрицы. Ввод элементов строки матрицы будем

производить с помощью фазовосвязанных лазеров из массива СС-VCSEL в последовательном коде, начиная с младшего разряда. Единице соответствует световой импульс длительности T , нулю — пауза такой же длительности.

Длительность такта работы оптоэлектронного линейного алгебраического процессора (ОЭЛАП) равна

$$T = \frac{1}{f_{\text{такт}}}, \quad (5)$$

где $f_{\text{такт}}$ — тактовая частота.

Максимальная реализованная частота модуляции современных СС-VCSEL $f_{\text{мод}} = 40$ ГГц [11], что позволяет получить время переключения ПВМС на СС-VCSEL $T = 25$ псек.

При вводе в оптическую часть процессора младшего разряда двоичного представления для элементов первой строки матрицы $\mathbf{A} = (a_{11}^0, a_{12}^0, a_{13}^0, \dots, a_{1n}^0)$ оптический сигнал на l -м фотоприёмнике:

$$R_{\text{ФП}} = \sum_{N=1}^n a_{1N}^0 \cdot x_n^1, \quad l=1, 2, \dots, s-1, \quad (6)$$

где суммирование осуществляется по N строкам ПВМС с помощью системы управления (N соответствует номеру столбца матрицы \mathbf{A} и номеру элемента вектора \mathbf{x}); s — разрядность элементов вектора \mathbf{x} (и, соответственно, количество ФП).

Далее производится ввод следующих разрядов двоичного представления элементов для первой строки матрицы \mathbf{A} . При вводе в массив ПВМС i -го разряда двоичного представления элементов первой строки матрицы \mathbf{A} на l -м фотоприёмнике регистрируется сигнал

$$R_{\text{ФП}}^i = \sum_{N=1}^n a_{1N}^i \cdot x_N^l, \quad l=1, 2, \dots, s-1; \quad i=0, 1, \dots, r-1, \quad (7)$$

где r — разрядность элементов матрицы \mathbf{A} .

Учитывая, что разряды двоичного представления элементов матрицы \mathbf{A} вводятся в оптическую часть ОМСУ последовательно с младшего разряда (каждому разряду соответствует свой временной интервал длительности T) можно записать

$$R_{\text{ФП}}((k-1)T < t < kT) = R_{\text{ФП}}(k) = \sum_{N=1}^n a_{1N}^{k-1} \cdot x_N^l, \quad l=1, 2, \dots, s-1; \quad k=1, 2, \dots, r, \quad (8)$$

где k — номер такта вычислений (при вводе разрядов двоичного представления элементов первой строки матрицы \mathbf{A} справедливо $k = i + 1$); t — время.

После ввода разрядов двоичного представления элементов первой строки матрицы \mathbf{A} необходимо сформировать паузу длительностью ν тактов для подстройки параметров ОЭЛАП.

Аналогично вводятся и все остальные элементы строк матрицы — значение сигнала, принимаемого l -м фотоприёмником на k -м такте работы процессора; Z — номер текущей вводимой строки матрицы \mathbf{A} ; $Z = Ent\left(\frac{k}{r+\nu}\right) + 1$ (Ent — операция нахождения целой части числа).

Полученные на каждом такте сигналы фотоприёмников с помощью быстродействующих АЦП преобразуются в цифровой код и поддаются временному и пространственному весовому суммированию.

Временное весовое суммирование заключается в нахождении взвешенной суммы (с весовые коэффициентами $1, 2, 4, \dots, 2^{l-1}$), получаемых последовательно во времени с интервалом T результатов аналого-цифрового преобразования сигналов, принимаемых элементами ФПУ на каждом такте работы процессора. Так, результат временного весового суммирования при вводе в оптическую часть ОЭЛАП разрядов двоичного представления элементов строки Z матрицы \mathbf{A}

$$R_{\text{ВВС}(z)/\text{ФП}}(k) = \sum_{i=1}^r 2^{i-1} \cdot R_{\text{ФП}}(k) = \sum_{i=1}^r 2^{i-1} \cdot \sum_{N=1}^n a_{ZN}^{k-1} \cdot x_N^l, \quad l=1, 2, \dots, s-1. \quad (9)$$

Пространственное весовое суммирование закл) результатов временного весового суммирования со всех со всех элементов, составляющих ФПУ:

$$R_{\text{ПВС}(z)} \sum_{i=1}^s 2^{l-1} \cdot R_{\text{ВВС}(z)/\text{ФП}} = \sum_{i=1}^s 2^{i-1} \cdot \sum_{l=1}^r 2^{l-1} \cdot \sum_{N=1}^n a_{ZN}^{k-1} x_N^l. \quad (10)$$

Результат пространственного весового суммирования и есть искомое значение элемента Z вектора-столбца b :

$$b_z = \sum_{l=1}^s 2^{l-1} \cdot \sum_{i=1}^r 2^{i-1} \cdot \sum_{N=1}^n a_{ZN}^{k-1} x_N^l. \quad (11)$$

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО СС-VCSEL КАК ЭЛЕМЕНТА МАССИВА ДЛЯ ПВМС

Применение лазерных массивов в качестве ПВМС для ОМСУ и ОЭЛАП предъявляет к лазерам определенные требования — достаточную временную когерентность, сохранение поляризации лазерных мод (отсутствие перескоков мод), низкий пороговый ток, высокие частоты модуляции и др.

Наиболее полным образом этим требованиям удовлетворяют массивы на основе VCSEL [7-10].

Рассмотрим формирование базового элемента параллельного массива данных для ОМСУ в виде излучателя фазовосвязанного когерентного поляризованного излучения, реализуемого в виде VCSEL с соединенными полостями резонатора (СС-VCSEL).

Возьмем за основу модель элемента СС-VCSEL, состоящую из двойной гетероструктуры, и имеющей две полости, которая предложена в работах [1—5]. Модифицируем её, добавив в нее внешний оптический пучок, например, для введения внешних данных (рис. 3). Структура состоит из двух полостей — верхней n - p и нижней p - n , к которым приложены напряжения U_1 и U_2 от источников, соответственно. Полости ограничены диэлектрическими распределенными брегговскими зеркалами (РБЗ) и разделены общим зеркалом, коэффициент отражения которого можно контролировать в процесс выращивания. Расстройка двух полостей вызывает различные режимы работы в полостях. В общем случае, оптические поля распределены по обеим полостям и, соответственно они влияют друг на друга в каждой полости, через многие факторы, в том числе и через коэффициенты усиления в них. Пунктиром в каждой полости показан непосредственно p - n переход с встроеными квантовыми точками в нем.

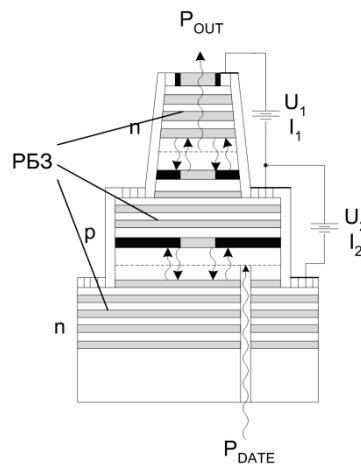


Рис. 3. Схема модифицированного СС-VCSEL с внешним оптическим входом

Вначале рассмотрим модель скоростного уравнения для отдельного лазерного диода с оптическим входом на основе модели резервуаров носителей и фотонов (рис. 4).

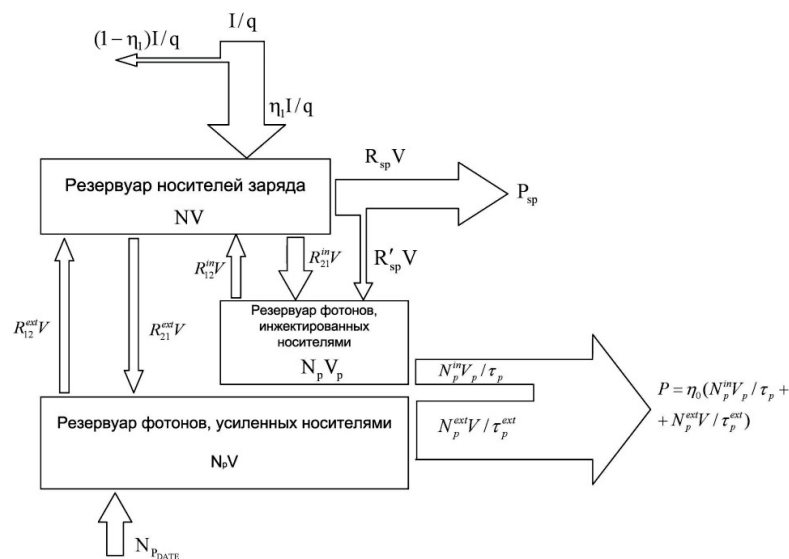


Рис. 4. Модель резервуара фотонов активной зоны VCSEL

На рис. 4 приняты обозначения: I/q — скорость инжекции носителей в лазере; η_{inj} — эффективность инжекции носителей I/q , которые достигают активной зоны; $R_{nr}V$ — скорость не излучающей рекомбинации; $R_{sp}V$ — скорость спонтанной рекомбинации; $R_{sp}'V$ — скорость спонтанной рекомбинации в соответствующую моду или $\beta_{sp}R_{sp}V$, с коэффициентом спонтанной эмиссии β_{sp} ; $R_{21}^{in}V$ — скорость рекомбинации носителей стимулированной эмиссии, которая создает соответствующую скорость генерирования фотонов в фотонном резервуаре; R_lV — скорость вытекания носителей из активной зоны посредством боковой диффузии и/или термоионной эмиссии; $R_{21}^{in}V + \beta_{sp}R_{sp}V$ — скорости стимулированной и спонтанной эмиссии в моду, которые обеспечивают необходимую скорость генерирования фотонов в фотонном резервуаре; $R_{12}^{in}V$ — скорость обеднения стимулированных фотонов из фотонного резервуара за счет поглощения в активной области; $N_p^{in}V_p/\tau_p$ — скорость, с которой фотоны покидают фотонную полость (τ_p — время жизни фотона); $R_{21}^{ext}V$ — скорость рекомбинации носителей стимулированной эмиссии, которая связана с усилением внешней эмиссии фотонов в соответствующую моду в фотонном резервуаре; $R_{12}^{ext}V$ — скорость обеднения усиленных фотонов за счет поглощения в активной области; $N_p^{ext}V/\tau_p^{ext}$ — скорость, с которой фотоны внешней эмиссии покидают активную область (τ_p^{ext} — время жизни фотона внешней эмиссии в активной области).

Через выходное зеркало проходит часть фотонов $\eta_0 \left(N_p^{ext}V/\tau_p^{ext} + N_p^{in}V_p/\tau_p \right)$, которая формирует полезную выходную мощность (η_0 — коэффициент оптической экстракции лазера).

Запишем скоростное уравнение для лазера:

$$\frac{dN}{dt} = G_{gen} - R_{rec}, \quad (12)$$

где G_{gen} — скорость инжекции электронов в активной зоне, а R_{rec} — скорость рекомбинации электронов на единицу объема в активной зоне.

Так как в активную зону в секунду инжектируется $\frac{\eta_i I}{q}$ электронов то $G_{gen} = \frac{\eta_i I}{qV}$, где V — объем активной зоны, а так как у нас лазер на квантовых ямах, то это будет объем квантовых ям.

Рекомбинация состоит из спонтанной рекомбинации со скоростью R_{sp} , неизлучающей рекомбинации со скоростью R_{nr} , утечки носителя, если поперечные и/или боковые потенциальные барьеры не достаточно высоки со скоростью R_l и стимулированной рекомбинации, зависящей от плотности фотонов, скорость которой R_{st} . Таким образом, общая скорость рекомбинации может быть записана:

$$R_{rec} = R_{sp} + R_{nr} + R_l + R_{st}. \quad (13)$$

Все процессы нестимулированного распада можно описать через время жизни носителя τ согласно $N/\tau = R_{sp} + R_{nr} + R_l$.

Поэтому скорость рекомбинации $R_{rec} = \frac{N}{\tau} + R_{st}$.

Скоростные уравнения носителей в первом приближении примут вид:

$$\begin{aligned} R_{st} &= R_{21}^{in}V + R_{21}^{ext}V, \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{\eta_i I}{qV} - \frac{N}{\tau} - R_{st}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для создания модели скоростных уравнений СС-VCSEL воспользуемся моделью фотонных резервуаров, представленной на рис. 5 [6—8], для чего в каждой полости выделим резервуар носителей, с количеством носителей — N_i ($i = 1, 2$; 1 — верхняя, 2 = нижняя полости), и резервуар фотонов с количеством фотонов в двух модах (S и L) — N_{ph}^S и N_{ph}^L , соответственно. Также в каждой из полостей присутствует внешняя оптическая волна с количеством фотонов в каждой полости N_i^{ext} .

В двух фотонных емкостях, число фотонов в модах S и L изменяется следующим образом: стимулированная и спонтанная эмиссия обеспечивают эмиссию фотонов со скоростью $R_{em,i} + \beta_{sp,i}R_{sp,i}$ в то время, как абсорбция в активной зоне истощает фотоны со скоростью $R_{abs,i}$. Все другие фотоны либо покидают полость через зеркала или поглощаются внутри. Ансамбль фотонов распадается со скоростью $N_{p,i}^{S,L,ext} / \tau_p^{S,L,ext}$, где $N_{p,i}^{S,L,ext}$ — число фотонов в полости i в моде S или L , а $\tau_p^{S,L,ext}$ — время жизни фотона в моде « S », « L » или во внешней оптической волне.

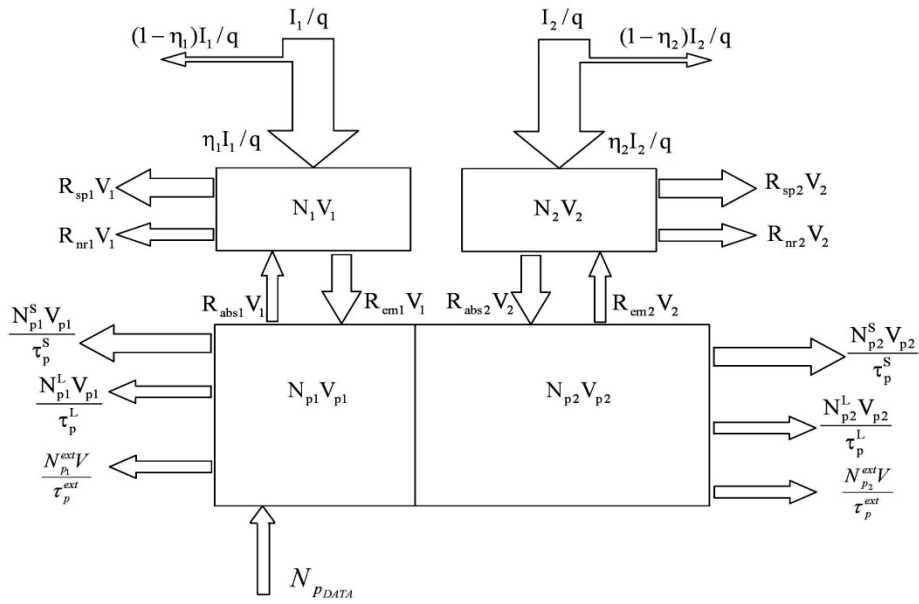


Рис. 5. Модель фотонных резервуаров СС-VCSEL

Таким образом,

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\eta_1 I_1}{q} - (R_{em,1} - R_{abs,1}) \cdot V_1 - (R_{sp,1} + R_{nr,1}) \cdot V_1, \quad (15)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{\eta_2 I_2}{q} - (R_{em,2} - R_{abs,2}) \cdot V_2 - (R_{sp,2} + R_{nr,2}) \cdot V_2. \quad (16)$$

Скоростные уравнения для фотонов в модах коротких, длинных и внешней оптической волн имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (N_{p,1}^S + N_{p,2}^S) &= \frac{dN_p^S}{dt} = \left[(R_{em,1}^S - R_{abs,1}^S) \cdot V_1 + (R_{em,2}^S - R_{abs,2}^S) \cdot V_2 \right] + \\ &+ (\beta_{sp,1}^S R_{sp,1} V_1 + \beta_{sp,2}^S R_{sp,2} V_2) - \frac{N_p^S}{\tau_p^S}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (N_{p,1}^L + N_{p,2}^L) &= \frac{dN_p^L}{dt} = \left[(R_{em,1}^L - R_{abs,1}^L) \cdot V_1 + (R_{em,2}^L - R_{abs,2}^L) \cdot V_2 \right] + \\ &+ (\beta_{sp,1}^L R_{sp,1} V_1 + \beta_{sp,2}^L R_{sp,2} V_2) - \frac{N_p^L}{\tau_p^L}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^{ext} + N_{p,2}^{ext}) = \frac{dN_p^{ext}}{dt} = \left[(R_{em,1}^{ext} - R_{abs,1}^{ext}) \cdot V_1 + (R_{em,2}^{ext} - R_{abs,2}^{ext}) \cdot V_2 \right] - \frac{N_p^{ext}}{\tau_p^{ext}}, \quad (19)$$

где представлено общее число фотонов $N_p^{S,L,ext}$ в моде S , L или во внешней оптической пучке. Изменение плотности носителя в полости i из-за стимулированной эмиссии и стимулированной абсорбции представлено [10].

$$R_{em,i} - R_{abs,i} = \frac{2\xi_i^S v_g^S}{V_{p,i}} N_{p,i}^S g_i^S + \frac{2\xi_i^L v_g^L}{V_{p,i}} N_{p,i}^L g_i^L + \frac{2\xi_i^{ext} v_g^{ext}}{V_i} N_{p,i}^{ext} g_i^{ext}, \quad (20)$$

где $i=1,2$, $g_i^{S,L,ext}$ — коэффициенты усиления мод S , L и внешней оптической волны в полости i , $v_g^{S,L,ext}$ — групповая скорость, соответствующая фотонам в каждой моде, а $V_{p,i}$ — объем фотонной полости i , коэффициент 2 учитывает то, что один фотон пересекает активную зону 2 раза в течении своего кругового движения. Параметр $\xi_i^{S,L,ext}$ означает коэффициент усиления стоячей волны, который зависит от размещения квантовых ям по отношению к распределению поля; величина $\xi_i^{S,L,ext}$ изменяется в промежутке от 0 (квантовые ямы размещены в узле поля) до 2 (квантовые ямы размещены в максимуме поля).

Рассмотрим скоростное уравнение с внешней оптической волной.

Скоростные уравнения для носителей и фотонов рассмотрим в стабильных режимах. Дифференцирование начинаем отдельно для носителей и фотонов, приравняв производные по времени к нулю в уравнениях (17)–(19). Вначале рассмотрим случай, когда внешняя оптическая волна присутствует в полостях, например, включение (перевод из «0» в «1») внешней оптической волны :

$$\begin{aligned} \frac{\eta_1 I_1}{q} &= \left(\frac{2\xi_1^S v_g^S}{V_{p,1}} \cdot N_{p,1}^S \cdot g_1^S + \frac{2\xi_1^L v_g^L}{V_{p,1}} \cdot N_{p,1}^L \cdot g_1^L + \frac{2\xi_1^{ext} v_g^{ext}}{V_1} \cdot N_{p,1}^{ext} \cdot g_1^{ext} \right) \cdot V_1 + \\ &+ (R_{sp,1} + R_{nr,1}) \cdot V_1, \\ \frac{\eta_2 I_2}{q} &= \left(\frac{2\xi_2^S v_g^S}{V_{p,2}} \cdot N_{p,2}^S \cdot g_2^S + \frac{2\xi_2^L v_g^L}{V_{p,2}} \cdot N_{p,2}^L \cdot g_2^L + \frac{2\xi_2^{ext} v_g^{ext}}{V_2} \cdot N_{p,2}^{ext} \cdot g_2^{ext} \right) \cdot V_2 + \\ &+ (R_{sp,2} + R_{nr,2}) \cdot V_2 \end{aligned} \quad (21)$$

Количество фотонов в модах S , L и внешней оптической волне, имеющих в полости представлено коэффициентом ограничения $\Gamma_i^{S,L,ext}$, получить которые можно, используя модель сосредоточенного зеркала или вычислить методом переходной матрицы. Эти коэффициенты соответствуют условиям нормализации для каждой моды [28]:

$$\begin{aligned} \Gamma_1^S + \Gamma_2^S &= 1, \\ \Gamma_1^L + \Gamma_2^L &= 1, \\ \Gamma_1^{ext} + \Gamma_2^{ext} &= 1. \end{aligned} \quad (22)$$

Ограничение моды в верхней полости 1 и моды в нижней полости 2 описано единичным независимым коэффициентом ограничения. Мы вводим шесть коэффициентов в уравнениях (15) и (16).

$$\frac{\eta_1 I_1}{q} = \left(\frac{2\xi_1^S v_g^S}{V_{p,1}} \cdot \Gamma_1^S \cdot N_p^S \cdot g_1^S + \frac{2\xi_1^L v_g^L}{V_{p,1}} \cdot \Gamma_1^L \cdot N_p^L \cdot g_1^L + \frac{2\xi_1^{ext} v_g^{ext}}{V_1} \cdot \Gamma_1^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_1^{ext} \right) \cdot V_1 + (R_{sp,1} + R_{nr,1}) \cdot V_1, \quad (23)$$

$$\frac{\eta_2 I_2}{q} = \left(\frac{2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot N_p^S \cdot g_2^S + \frac{2\xi_2^L v_g^L}{V_{p,2}} \cdot \Gamma_2^L \cdot N_p^L \cdot g_2^L +}{+\frac{2\xi_2^{ext} v_g^{ext}}{V_2} \cdot \Gamma_2^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_2^{ext}} \right) \cdot V_2 + (R_{sp,2} + R_{nr,2}) \cdot V_2. \quad (24)$$

Скорость спонтанной эмиссии вместе со скоростью неизлучательной рекомбинации в полости i пропорциональны общей плотности носителя в полости $i - \frac{N_i}{V_i}$, при этом коэффициент пропорциональности является временем существования носителя τ_e (предполагается, что он одинаков в обеих полостях). Тогда

$$(R_{sp,i} + R_{nr,i}) = \frac{N_i}{V_i \tau_e}, \quad (25)$$

для $i = 1, 2$.

Скоростные уравнения для носителей преобразуются к виду:

$$\frac{\eta_1 I_1}{q} = \left(\frac{2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot N_p^S \cdot g_1^S + \frac{2\xi_1^L v_g^L}{V_{p,1}} \cdot \Gamma_1^L \cdot N_p^L \cdot g_1^L +}{+\frac{2\xi_1^{ext} v_g^{ext}}{V_1} \cdot \Gamma_1^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_1^{ext}} \right) \cdot V_1 + \frac{N_1}{\tau_e}, \quad (26)$$

$$\frac{\eta_2 I_2}{q} = \left(\frac{2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot N_p^S \cdot g_2^S + \frac{2\xi_2^L v_g^L}{V_{ph,2}} \cdot \Gamma_2^L \cdot N_p^L \cdot g_2^L +}{+\frac{2\xi_2^{ext} v_g^{ext}}{V_2} \cdot \Gamma_2^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_2^{ext}} \right) \cdot V_2 + \frac{N_2}{\tau_e}. \quad (27)$$

Запишем объем активной зоны как $V_i = S_i l_i$, где S_i — площадь, l_i — ширина активной зоны; $l_i = n_i e$, с n_i — число квантовых ям в полости i , а e — ширина одной квантовой ямы. Предполагается, что поперечная зона структуры постоянна, т. е. $S_1 = S_2 = S$. Объем оптической моды в полости i представлен $V_{p,i} = S_i L_i$, длины полости $L_1 = L_2 = L$ считаем равными для двух полостей. Уравнения (26)—(27) преобразуются к виду:

$$\frac{\eta_1 I_1}{q} = 2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^S \cdot g_1^S + 2\xi_1^L v_g^L \cdot \Gamma_1^L \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^L \cdot g_1^L +$$

$$+ 2\xi_1^{ext} v_g^{ext} \cdot \Gamma_1^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_1^{ext} + \frac{N_1}{\tau_e}, \quad (28)$$

$$\frac{\eta_2 I_2}{q} = 2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^S \cdot g_2^S + 2\xi_2^L v_g^L \cdot \Gamma_2^L \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^L \cdot g_2^L +$$

$$+ 2\xi_2^{ext} v_g^{ext} \cdot \Gamma_2^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_2^{ext} + \frac{N_2}{\tau_e}. \quad (29)$$

Скоростные уравнения для фотонов в моде «S», «L» и внешней оптической волны т. е. уравнения (17)—(19), переписываются используя уравнение (20) без учета спонтанной эмиссии в интересующей нас моде:

$$\left(\frac{2\xi_1^S v_g^S}{V_{p,1}} \cdot N_{p,1}^S \cdot g_1^S V_1 + \frac{2\xi_2^S v_g^S}{V_{p,2}} \cdot N_{p,2}^S \cdot g_2^S V_2 \right) - \frac{N_p^S}{\tau_p} = 0, \quad (30)$$

$$\left(\frac{2\xi_1^L v_g^L}{V_{p,1}} \cdot N_{p,1}^L \cdot g_1^L V_1 + \frac{2\xi_2^L v_g^L}{V_{p,2}} \cdot N_{p,2}^L \cdot g_2^L V_2 \right) - \frac{N_p^L}{\tau_p} = 0, \quad (31)$$

$$2\xi_1^{ext} \cdot v_g^{ext} \cdot N_{p,1}^{ext} \cdot g_1^{ext} V_1 + 2\xi_2^{ext} \cdot v_g^{ext} \cdot N_{p,2}^{ext} \cdot g_2^{ext} V_2 - \frac{N_p^{ext}}{\tau_p^{ext}} = 0. \quad (32)$$

Вводя объем активной зоны V_i и объем оптической моды $V_{p,i}$ получим:

$$\left(2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^S \cdot g_1^S + 2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^S \cdot g_2^S \right) - \frac{N_p^S}{\tau_p^S} = 0, \quad (33)$$

$$\left(2\xi_1^L v_g^L \cdot \Gamma_1^L \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^L \cdot g_1^L + 2\xi_2^L v_g^L \cdot \Gamma_2^L \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^L \cdot g_2^L \right) - \frac{N_p^L}{\tau_p^L} = 0, \quad (34)$$

$$2\xi_1^{ext} \cdot v_g^{ext} \cdot \Gamma_1^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_1^{ext} + 2\xi_2^{ext} \cdot v_g^{ext} \cdot \Gamma_2^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_2^{ext} - \frac{N_p^{ext}}{\tau_p^{ext}} = 0. \quad (35)$$

Скоростные уравнения для носителей и фотонов (пороговые уравнения для двух оптических мод) переписываются в компактной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\eta_1 I_1}{q} = & 2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^S \cdot g_1^S + 2\xi_1^L v_g^L \cdot \Gamma_1^L \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^L \cdot g_1^L + \\ & + 2\xi_1^{ext} v_g^{ext} \cdot \Gamma_1^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_1^{ext} + \frac{N_1}{\tau_e}, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\eta_2 I_2}{q} = & 2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^S \cdot g_2^S + 2\xi_2^L v_g^L \cdot \Gamma_2^L \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^L \cdot g_2^L + \\ & + 2\xi_2^{ext} v_g^{ext} \cdot \Gamma_2^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot g_2^{ext} + \frac{N_2}{\tau_e}, \end{aligned} \quad (37)$$

$$N_p^S \cdot \left(2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot \frac{l_1}{L} \cdot g_1^S + 2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot \frac{l_2}{L} \cdot g_2^S - \frac{1}{\tau_p^S} \right) = 0, \quad (38)$$

$$N_p^L \cdot \left(2\xi_1^L v_g^L \cdot \Gamma_1^L \cdot \frac{l_1}{L} \cdot g_1^L + 2\xi_2^L v_g^L \cdot \Gamma_2^L \cdot \frac{l_2}{L} \cdot g_2^L - \frac{1}{\tau_p^L} \right) = 0, \quad (39)$$

$$N_p^{ext} \cdot \left(2\xi_1^{ext} \cdot v_g^{ext} \cdot \Gamma_1^{ext} \cdot g_1^{ext} + 2\xi_2^{ext} \cdot v_g^{ext} \cdot \Gamma_2^{ext} \cdot g_2^{ext} - \frac{1}{\tau_p^{ext}} \right) = 0. \quad (40)$$

Во втором случае, когда происходит переключение входного оптического сигнала из «1» в «0», т. е. внешняя оптическая волна отсутствует в полостях, уравнения скоростей для носителей и фотонов (пороговые уравнения для двух оптических мод) будут записаны:

$$\frac{\eta_1 I_1}{q} = 2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^S \cdot g_1^S + 2\xi_1^L v_g^L \cdot \Gamma_1^L \cdot \frac{l_1}{L} \cdot N_p^L \cdot g_1^L + \frac{N_1}{\tau_e}, \quad (41)$$

$$\frac{\eta_2 I_2}{q} = 2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^S \cdot g_2^S + 2\xi_2^L v_g^L \cdot \Gamma_2^L \cdot \frac{l_2}{L} \cdot N_p^L \cdot g_2^L + \frac{N_2}{\tau_e}, \quad (42)$$

$$N_p^S \cdot \left(2\xi_1^S v_g^S \cdot \Gamma_1^S \cdot \frac{l_1}{L} \cdot g_1^S + 2\xi_2^S v_g^S \cdot \Gamma_2^S \cdot \frac{l_2}{L} \cdot g_2^S - \frac{1}{\tau_p^S} \right) = 0, \quad (43)$$

$$N_p^L \cdot \left(2\xi_1^L v_g^L \cdot \Gamma_1^L \cdot \frac{l_1}{L} \cdot g_1^L + 2\xi_2^L v_g^L \cdot \Gamma_2^L \cdot \frac{l_2}{L} \cdot g_2^L - \frac{1}{\tau_p^L} \right) = 0. \quad (44)$$

Таким образом, на основании полученных уравнений, представляется возможным проанализировать работу СС-VCSEL в любом из режимов с учетом его входных параметров.

Последние четыре уравнения являются частным случаем уравнений (36)—(40). Этот частный случай описан в [10].

Возможны такие режимы работы СС-VCSEL:

1. Одна мода ниже порогового значения, число фотонов во внешней оптической моде N_p^{ext} .
2. Пороговая генерация одной моды, число фотонов во внешней оптической моде N_p^{ext} .
3. Одна мода выше порогового значения, число фотонов во внешней оптической моде N_p^{ext} .
4. Точка «двойного порога» — обе моды начинают генерировать одновременно.
5. Пороговая генерация одной моды в то время, как другая мода остается ниже порога.
6. Пороговая генерация одной моды, если другая мода выше порогового значения.
7. Одна мода выше порогового значения, а другая мода — ниже.
8. Обе моды выше порогового значения.

Для каждого режима можно установить зависимость для выполнения условий генерации.

Если входные параметры СС-VCSEL определяются числом фотонов во внешней оптической моде N_p^{ext} и инжекционными токами I_1 и I_2 на уровне пороговой генерации мод, то уравнения, описывающие точку «двойного порога» будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\eta_1 I_1}{q} = A_1^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot G_0^{ext} \cdot \ln \frac{n_1 + n_0^{ext}}{n_{1,tr} + n_0^{ext}} + \frac{N_1}{\tau_e} \\ \frac{\eta_2 I_2}{q} = A_2^{ext} \cdot N_p^{ext} \cdot G_0^{ext} \cdot \ln \frac{n_2 + n_0^{ext}}{n_{2,tr} + n_0^{ext}} + \frac{N_2}{\tau_e} \\ A_1^S \cdot G_0^S \cdot \ln \frac{n_1 + n_0^S}{n_{1,tr} + n_0^S} + A_2^S \cdot G_0^S \cdot \ln \frac{n_2 + n_0^S}{n_{1,tr} + n_0^S} - \frac{1}{\tau_p^S} = 0 \\ A_1^L \cdot G_0^L \cdot \ln \frac{n_1 + n_0^L}{n_{2,tr} + n_0^L} + A_2^L \cdot G_0^L \cdot \ln \frac{n_2 + n_0^L}{n_{2,tr} + n_0^L} - \frac{1}{\tau_p^L} = 0 \\ A_1^{ext} \cdot G_0^{ext} \cdot \ln \frac{n_1 + n_0^{ext}}{n_{1,tr} + n_0^{ext}} + A_2^{ext} \cdot G_0^{ext} \cdot \ln \frac{n_2 + n_0^{ext}}{n_{2,tr} + n_0^{ext}} - \frac{1}{\tau_p^{ext}} = 0 \end{array} \right. \quad (45)$$

С помощью системы уравнений (45) определяется число носителей двойного порога — $N_{1,0}$, $N_{2,0}$ и коэффициенты усиления для двойного порога — $g_{1,0}^{S,L}$, $g_{2,0}^{S,L}$ в зависимости от входной пары параметров. В этой точке число фотонов в каждой моде равно нулю $N_p^S = N_p^L = 0$.

Отметим, что точка «двойного порога» (начало режима, когда моды S и L начинают генерировать одновременно) является особенно важным режимом работы СС-VCSEL.

В этом режиме появляется возможность получения интерференции S и L мод в определенных участках пространства на выходе аппаратных лазерных массивов с оптическим управлением переключения мод (за счет внешней эмиссии фотонов в дополнительном оптическом канале структуры модифицированного СС-VCSEL). Низкий пороговый ток накачки S и L мод лазеров (~1 мА) позволяет реализовать массивы СС-VCSEL с большим количеством элементов ($N > 1000$), а высокие частоты модуляции (~40 ГГц) обеспечивают высокоскоростное управление интерференционной картиной [8—10]. Кроме того, последние исследования СС-VCSEL продемонстрировали теоретическую возможность электрооптической модуляции поляризационных мод интегральной структуры с граничной частотой ~390 ГГц [11, 12].

В результате синхронной интерференции S и L мод элементов лазерного массива возможно параллельное выполнение на оптическом уровне логических операций, результаты каждой из которых формируются одновременно на множестве апертур одной из соответствующих дифракционных масок

(количество масок ограничивается длиной когерентности СС-VCSEL). Механизм формирования интерференции для получения базовых фотонных логических элементов рассмотрен в работе [6].

Таким образом, с помощью аппаратных массивов таких модифицированных СС-VCSEL возможно параллельное выполнение в оптическом виде операций ОМСУ для нахождения частичных сумм и переносов согласно описанной выше модели по алгоритму DMAC. Это позволит значительно повысить быстродействие ОМСУ для решения СЛАУ большой размерности.

ВЫВОДЫ

В работе предложена математическая модель для усовершенствования процесса решения СЛАУ большой размерности. За счет разбиения входного массива коэффициентов на обрабатываемые аппаратные массивы для параллельного формирования частичных разрядных сумм и поразрядных переносов с последующим суммированием результатов, что представляется возможным при оптической реализации блока ПВМС в ОЭЛАП. Усовершенствована архитектура оптоэлектронного матричного сумматора-умножителя для организации вычислений по алгоритму временного суммирования DMAC, базовым блоком для осуществления пространственно-временной модуляции света в котором является массив модифицированных СС-VCSEL с внешним оптическим управлением. Получены скоростные уравнения элемента СС-VCSEL с внешней фотонной эмиссией в оптическом резонаторе для основных режимов его работы, в частности режима двойного порога лазерных мод. Таким образом, предложенная структура ПВМС из массива модифицированных СС-VCSEL для ОМСУ позволит значительно повысить производительность вычислительного процесса в части его оптической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исихара С. Оптические компьютеры : Новая эра науки. — М. : Наука, 1992. — 96 с.
2. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. — М. : Высшая школа, 1988. — 237 с.
3. Кожемяко В. П. Основы теории и схемотехники оптоэлектронных элементов и устройств логико-временного типа: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.05. — К., 1988. — 519 с.
4. Лысенко Г. Л., Аль Равашдех Медин, Кобзаренко Р. Л. Оптический вычислительный модуль оптического компьютера / Г. Л. Лысенко, М. Аль Равашдех, Р. Л. Кобзаренко // Вісник ВПІ — 2003. — № 6. — С. 360—364.
5. Лисенко Г. Л. Оптоелектронні напівпровідникові транспаранти для швидкодійних спеціалізованих обчислювачів : монографія / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська. — Вінниця : ВНТУ, 2015. — 140 с.
6. Лысенко Г. Л. Фотонные Логические элементы на основе фазово-синхронизированных массивов СС-VCSEL / Г. Л. Лысенко, С. Е. Тужанский, М. Альравшдех // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2013. — № 2(26). — С. 42—47.
7. Koyama Fumio. Recent Advances of VCSEL Photonics // Journal of Lightwave Technology. — 2006, Vol. 24, No. 12, pp. 4502—4515.
8. Brunner M. Continuous-Wave Dual-Wavelength Lasing in a Two-Section Vertical-Cavity Laser / M. Brunner, K. Gulden, R. Hovel [et al.] / IEEE Phot. Techn. Lett. — 2000. — No. 12, pp. 1316—1325.
9. Логгинов А. С. Двухчастотные лазеры со связанными вертикальными резонаторами / А. С. Логгинов, А. Г. Ржанов, Д. В. Скоров // Квантовая электроника. — 2006. — Т. 36, № 6. — С. 520—526.
10. Badilita V. Control of Polarization Switching in Vertical Coupled-Cavities Surface Emitting Lasers / V. Badilita, J.-F. Carlin, M. Ilegems [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. — 2004, No. 16, pp. 365—367.
11. Zujewski M. Coupled-cavity surface-emitting lasers: spectral and polarization threshold characteristics and electrooptic switching/ M. Zujewski, H. Thienpont, K. Panajotov // Optics Express. — 2010. Vol. 18, No.26, pp. 525—533.
12. Zujewski M. Traveling wave electro-optically modulated coupled-cavity surface emitting lasers / M. Zujewski, H. Thienpont, K. Panajotov // Proc. of SPIE. — 2013. Vol. 8639, pp. 3901—3912.

SPISOK LITERATURY

1. Isikhara S. Opticheskiye komp'yutery: Novaya era nauki. — М. : Nauka, 1992. — 96 с.
2. Akayev A. A., Mayorov S. A. Opticheskiye metody obrabotki informatsii. — М. : Vysshaya shkola, 1988. — 237 s.
3. Kozhemyako V. P. Osnovy teorii i skhemotekhniki optoelektronnykh elementov i ustroystv

- logiko—vremennogo tipa: Dis... d—ra tekhn. nauk: 05.13.05. — K., 1988. — 519 s.
4. Lysenko G. L., Al' Ravashdekh Medin, Kobzarenko R. L. Opticheskiy vychislitel'nyy modul' opticheskogo komp'yutera / G. L. Lysenko, M. Al' Ravashdekh, R. L. Kobzarenko // *Visnik VPI* — 2003. — № 6. — S. 360—364.
 5. Lisenko G. L. Optoyelektronni napivprovídnikovi transparanti dlya shvidkodíynikh spetsíalfzovanikh obchislyuvachiv : monografiya / G. L. Lisenko, Í. V. Myalkivs'ka. — Vínitsya : VNTU, 2015. — 140 s.
 6. Lysenko G. L. Fotonnyye Logicheskiye elementy na osnove fazovo-sinkhronizirovannykh massivov SS-VCSEL / G. L. Lysenko, S. Ye. Tuzhanskiy, M. Al'ravshdekh // *Optiko-yelektronni ínformatsíyno-yenergetichni tekhnologii*. — 2013. — № 2(26). — S. 42—47.
 7. Koyama Fumio. Recent Advances of VCSEL Photonics // *Journal of Lightwave Technology*. — 2006, Vol. 24, No. 12, pp. 4502—4515.
 8. Brunner M. Continuous-Wave Dual-Wavelength Lasing in a Two-Section Vertical-Cavity Laser / M. Brunner, K. Gulden, R. Hovel [et al.] // *IEEE Phot. Techn. Lett.* — 2000. — No. 12, pp. 1316—1325.
 9. Logginov A. S. Dvukhchastotnyye lazery so svyazannymi vertikal'nymi rezonatorami / A. S. Logginov, A. G. Rzhanov, D. V. Skorov // *Kvantovaya elektronika*. — 2006. — T. 36, № 6. — С. 520—526.
 10. Badilita V. Control of Polarization Switching in Vertical Coupled-Cavities Surface Emitting Lasers / V. Badilita, J.—F. Carlin, M. Plegems [et al] // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2004, No. 16, pp. 365—367.
 11. Zujewski M. Coupled-cavity surface-emitting lasers: spectral and polarization threshold characteristics and electrooptic switching/ M. Zujewski, H. Thienpont, K. Panajotov // *Optics Express*. — 2010. Vol. 18, No.26, pp. 525—533.
 12. Zujewski M. Traveling wave electro-optically modulated coupled-cavity surface emitting lasers / M. Zujewski, H. Thienpont, K. Panajotov // *Proc. of SPIE*. — 2013. Vol. 8639, pp. 3901—3912

Надійшла до редакції 21.12.2016 р.

ЛЫСЕНКО ГЕННАДИЙ ЛЕОНИДОВИЧ — к. т. н., профессор, профессор кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, E-mail: lg1@vntu.edu.ua

ТУЖАНСКИЙ СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ — к. т. н., доцент, доцент кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, E-mail: slavat@vntu.edu.ua

МЕДИН МОХАМЕД А. АЛЬРАВАШДИ — соискатель кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, E-mail: Medin.Mohamed@gmail.com