

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕРТИКАЛЬНО ИЗЛУЧАЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ

Д. А. Анчиков¹, А. А. Кренц^{1,2}, С. В. Крестин², Н. Е. Молевич^{1,2}, А. В. Пахомов^{1,2}

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия,

² Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

Аннотация

В работе рассматривается модель широкоапертурного полупроводникового вертикально излучающего лазера на основе полной системы уравнений Максвелла–Блоха в двумерном приближении на круглой и квадратной апертурах. Приводятся результаты анализа и моделирования динамики лазерного излучения в ближней и дальней зонах в зависимости от отстройки частоты, которую в случае полупроводниковых лазеров можно представить как функцию температуры. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными и теоретическими прогнозами.

Ключевые слова: лазерная динамика, оптические структуры, режим генерации, качество излучения, отстройка частоты.

Цитирование: Анчиков, Д.А. Исследование динамики лазерного излучения в зависимости от температуры в вертикально излучающих полупроводниковых лазерах / Д.А. Анчиков, А.А. Кренц, С.В. Крестин, Н.Е. Молевич, А.В. Пахомов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 721-727. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-721-727.

Введение

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором имеют ряд важных преимуществ по сравнению с полупроводниковыми лазерами классической полосковой геометрии: они обладают низким пороговым значением тока накачки, работают на единственной продольной моде, технологически легко формируются массивы из таких лазеров. Вертикально излучающие полупроводниковые лазеры активно применяются в беспроводных и оптоволоконных оптических системах связи, в оптических запоминающих устройствах, оптических сенсорах. Для применения полупроводниковых вертикально излучающих лазеров (ВИЛ) в таких областях, как обработка материалов, в медицинских приложениях и в качестве источников оптической накачки, необходимо увеличение выходной мощности устройства. Важной конструктивной особенностью ВИЛ является небольшой продольный размер активной среды лазера – порядка оптической длины волны, в связи с этим наиболее эффективным методом увеличения мощности ВИЛ является увеличение его поперечных размеров.

Экспериментально установлено, что поперечные размеры ВИЛ оказывают большое влияние на пространственно-временную динамику лазера и на когерентные свойства его излучения [1]. Как правило, ВИЛ с небольшими поперечными размерами (3×3 мкм) работает на фундаментальной поперечной моде, и характерная мощность излучения составляет порядка нескольких мВт. Увеличение мощности в ВИЛ осуществляется за счёт увеличения поперечного сечения активной области. Для поперечных размеров от 3 до 15 мкм наблюдается генерация нескольких поперечных резонаторных мод. При дальнейшем увеличении поперечных размеров в ближнем поле наблюдаются асимметричные распределения поля, которые не могут быть описаны как суперпозиция конечного числа мод пустого резонатора. Возможно по-

явление нестационарных оптических структур (солитоны [2], оптические вихри [3], спиральные волны [4]) и пространственно-временной хаос.

Для получения высокой выходной мощности необходимо использование высоких инжекционных токов, приводящих к значительному разогреву активной среды лазера. В связи с этим для поддержания постоянной температуры кристалла необходимо применение охлаждающих устройств, что делает вопрос о влиянии температуры активной среды широкоапертурного полупроводникового лазера актуальным как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения.

Проведённые эксперименты показали, что температура кристалла влияет в первую очередь на отстройку частоты генерации от частоты продольной моды [5–10], причём при комнатных температурах и выше отстройка частоты отрицательная, при охлаждении кристалла – отстройка положительная. Сдвиг длины волны при изменении температуры обусловлен совместным влиянием двух факторов: термического расширения активной среды и изменения показателя преломления активной среды с изменением температуры. Для устройств с круглой и квадратной апертурами при высоких температурах наблюдается преимущественно приосевая генерация. Неустойчивость режима приосевой генерации может приводить к появлению в дальнем поле множества дополнительных максимумов, расположенных вблизи центрального наиболее яркого пика. Качественно другое поведение широкоапертурного полупроводникового лазера наблюдается при достаточно сильном охлаждении устройства. В дальнем поле наблюдается множество максимумов, образующих кольцо, причём экспериментально установлено, что радиус кольца пропорционален корню из отстройки. С ростом отстройки, а также на квадратных апертурах более характерным становится наблюдение в дальнем поле четырёх ярко выраженных максимумов.

В настоящей работе показано, что модель Максвелла–Блоха качественно описывает наблюдаемую экспериментально смену режимов генерации от осевой к существенно внеосевой при изменении температуры лазерной среды.

Математическая модель

Двумерная система уравнений Максвелла–Блоха имеет вид:

$$\begin{cases} (\partial E/\partial \tau) = ia\Delta_{\perp} E + \sigma(P - E), \\ (\partial P/\partial \tau) = -(1 + i\delta)P + DE, \\ \frac{\partial D}{\partial \tau} = -\gamma \left[D - r + \frac{1}{2}(E^* P + EP^*) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где E, P – безразмерные комплексные огибающие электрического поля и поляризации соответственно, D – инверсия; $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ – двумерный Лапласиан, x, y – безразмерные поперечные координаты; $\gamma = \gamma_{\parallel} / \gamma_{\perp}$ и $\sigma = \kappa / \gamma_{\perp}$, где κ, γ_{\perp} и γ_{\parallel} – скорости релаксации поля, поляризации и инверсии населённости соответственно; $\delta = (\omega_{21} - \omega) / \gamma_{\perp}$ – отстройка между центром линии усиления и частотой генерации, безразмерная на полуширину линии; $a = c^2 / (2\omega\gamma_{\perp} d^2)$ – дифракционный параметр, где d – характерный пространственный размер в поперечном сечении пучка; r – накачка, нормированная на пороговое значение. В модели предполагается, что лазер работает на единственной продольной моде, активная среда – двухуровневая с однородно уширенной линией.

Система Максвелла–Блоха хорошо подходит для моделирования ВИЛ, поскольку принятые приближения хорошо согласуются с конструкционными особенностями ВИЛ. Продольные размеры активной области составляют порядка единиц мкм, поэтому генерация осуществляется на одной продольной моде. Усиление за проход в таком резонаторе оказывается небольшим. Основные переменные в системе за проход в резонаторе меняются слабо, что позволяет исключить из рассмотрения продольную координату z . Поперечные размеры активной области, как правило, в несколько раз больше продольных, что обеспечивает возбуждение сразу множества поперечных мод.

Метод численного моделирования

Двумерное интегрирование проводилось с помощью псевдоспектрального Фурье-метода с расщеплением на линейный (\hat{D}) и нелинейный (\hat{N}) операторы (split-step Fourier method), которые можно рассматривать независимыми на малом временном промежутке dt [11]:

$$(\partial U/\partial t) = (\hat{D} + \hat{N})U, \quad (2)$$

$$\text{где } U = \begin{pmatrix} E \\ P \\ D \end{pmatrix}, \hat{D} = \begin{pmatrix} ia\Delta_{\perp} - \sigma & \sigma & 0 \\ 0 & -(1 + i\delta) & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma \end{pmatrix},$$

$$\hat{N} = \begin{pmatrix} 0 \\ DE \\ -\gamma/2(EP^* + E^*P) \end{pmatrix}.$$

Использование данного метода даёт значительное преимущество по сравнению с конечно-разностными методами благодаря использованию быстрого преобразования Фурье. Использование симметричной формы экспоненциальных операторов обеспечивает погрешность метода порядка $O(dt^3)$ [11]. Решение системы (2) записывается в следующем виде:

$$U(x, y, t_0 + dt) \cong \exp(dt/2 \cdot \hat{D}) \times \exp \left[\int_{t_0}^{t_0+dt} \hat{N}(t') dt' \right] \cdot \exp(dt/2 \cdot \hat{D}) \cdot U(x, y, t_0). \quad (3)$$

Действие линейного оператора производится в Фурье-пространстве для основных переменных:

$$\begin{aligned} \tilde{U}(x, y, t_0 + dt/2) &= \\ &= F^{-1} \left\{ \exp(dt/2 \cdot \hat{D}_k) \cdot F \{ U(x, y, t) \} \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $F\{.. \}$ и $F^{-1}\{.. \}$ – прямое и обратное Фурье-преобразование соответственно, k – пространственная частота. Сама экспонента будет иметь вид:

$$\exp(dt/2 \cdot \hat{D}_k) = \begin{pmatrix} W & Z \cdot [Q - W] & 0 \\ 0 & Q & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\gamma \cdot dt/2) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $Z = \sigma/(\sigma + iak^2 - 1 - i\delta)$, $W = \exp(-(\sigma + iak^2) \times dt/2)$, $Q = \exp(-(1 + i\delta) \cdot dt/2)$ – вспомогательные выражения.

Нахождение интеграла с нелинейным оператором выполняется приближенно по правилу трапеций на малом временном шаге dt в сходящемся итерационном цикле. Действие экспоненты описано ниже:

$$\begin{aligned} \exp \left[\int_{t_0}^{t_0+dt} \hat{N}(t') dt' \right] \cdot \tilde{U}(x, y, t_0 + dt/2) &\approx \\ &\approx \tilde{U}(x, y, t_0 + dt/2) + dt/2 \times \end{aligned} \quad (6)$$

$$\times \begin{pmatrix} 0 \\ [D_0 E_0 + \tilde{D} \tilde{E}] \\ \gamma \cdot \left(2r - 1/2 [E_0 P_0^* + E_0^* P_0 + \tilde{E} \tilde{P}^* + \tilde{E}^* \tilde{P}] \right) \end{pmatrix},$$

где E_0, P_0, D_0 – величины с известного временного слоя при $t = t_0$, $\tilde{E}, \tilde{P}, \tilde{D}$ – переменные со слоя при $t = t_0 + dt$, в первом приближении равные E_0, P_0, D_0 соответственно. Внутри итерационного процесса также происходит действие второго линейного оператора на второй части временного шага аналогично тому, как это было на первом этапе по формулам (4) и (5). В итоге будут найдены значения E, P, D при $t = t_0 + dt$, которые будут использоваться в качестве $\tilde{E}, \tilde{P}, \tilde{D}$ в (6) на следующем витке итерационного цикла, и т.д.

Критерием остановки итерационного процесса является малая разница (например, $= 10^{-10}$) по норме (L_{∞}) между получаемыми решениями \tilde{E} , \tilde{P} , \tilde{D} в последовательных итерациях.

Параметры в лазерной модели были выбраны близкими к реальным параметрам [9], которые характерны для ВИЛ $\gamma = 10^{-3}$, $\sigma = 10^{-1}$, $r = 1.4$, $a = 10^{-4}$, $\delta = -3..+5$. Моделирование проводилось на двух формах апертур: круглой и квадратной. Форма апертуры задавалась с помощью двумерных пространственных стационарных по времени распределений параметра накачки $r(x, y)$ и параметра потерь в резонаторе $\sigma(x, y)$. По краям расчётной области располагалась поглощающая буферная зона с нулевой накачкой и очень высокими оптическими потерями, а по центру – активная область в заданной форме (круг или квадрат). Вследствие наличия поглощающей буферной зоны за пределами активной области излучение быстро затухает. Поскольку для моделирования структур сама буферная зона является неинформативной, её размер должен быть минимальным, но достаточным для исключения взаимодействия периодов. Таким образом, апертура конечных размеров на расчётной сетке с периодическими граничными условиями моделируется исключительно параметрически. В качестве начального условия было использовано шумовое распределение вблизи состояния отсутствия генерации.

Параметры расчётной сетки были выбраны из соображений обеспечения корректного пространственного и временного разрешения моделируемых структур. При указанном выше наборе параметров возникают структуры с характерными волновыми числами $k \approx 0..200$. Была выбрана пространственная сетка размером 256×256 и шагом $dx = dy = 1/256$. Она позволяет разрешать поперечные структуры с волновыми числами не более $k_{max} = (\pi/dx) = 256\pi \approx 800$, что достаточно для моделирования пространственных неоднородностей при выбранных параметрах. Выбранный шаг по времени $dt = 10^{-2}$ обеспечивает более чем достаточное временное разрешение ($\omega_{max} = 100\pi \approx 300$), поскольку для характерных временных осцилляций при выбранных параметрах $\omega \approx 0..5$.

Результаты моделирования и обсуждение

Результаты численного моделирования распределений стационарной интенсивности в ближней и дальней зоне на прямоугольной и круглой апертурах при $r = 1,5$ приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

При температурах выше $0^{\circ}C$ ($\delta \leq 0$) пороговая накачка для появления лазерной генерации зависит от величины отстройки [12, 13]:

$$r_{thr} = 1 + \delta^2 / (1 + \sigma)^2. \tag{7}$$

Вблизи порога ближнее поле широкоапертурного лазера однородно (рис. 1, 2 $\delta = -0,75$, $r = 1,5$). При уменьшении абсолютной величины отстройки (рис. 1, 2 $\delta = 0..-0,5$) в ближней зоне возникают

достаточно крупные квазистационарные структуры, представляющие собой подвижные яркие пики интенсивности (волны интенсивности или филаменты) (рис. 1, 2 $\delta = 0..-0,5$), появление которых было предсказано в работах [14 – 16]. Излучение в дальней зоне при этом имеет вид небольших размытых пятен вблизи оптической оси резонатора.

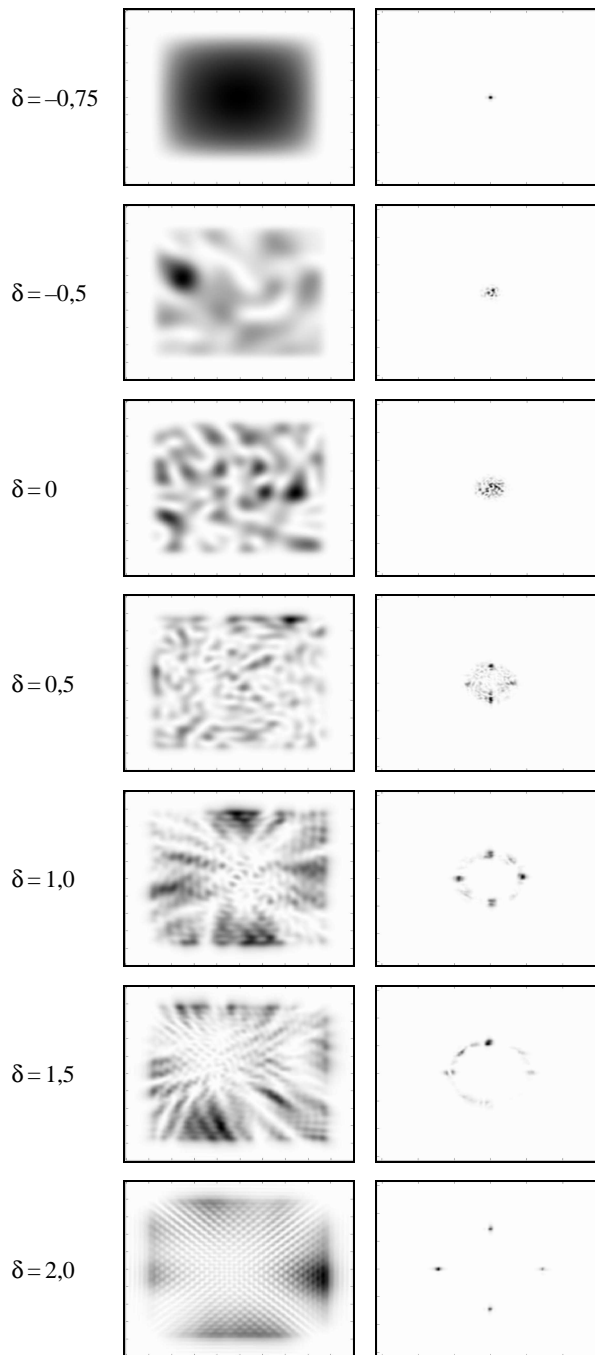


Рис. 1. Распределения интенсивности в ближнем (слева) и дальнем поле (справа) на квадратной апертуре при $r = 1,5$, диапазон температур $+60..-40^{\circ}C$ (сверху вниз)

При положительных отстройках, как показано в [12, 13], система уравнений (1) имеет простейшее решение вида бегущей волны:

$$E(t, \vec{r}) = E_0 \exp(i(\vec{k}_\perp \vec{r} + \Omega t)),$$

$$P(t, \vec{r}) = P_0 \exp(i(\vec{k}_\perp \vec{r} + \Omega t)), \tag{8}$$

$$D(t, \vec{r}) = D_0,$$

где \vec{r} – радиус-вектор в поперечной плоскости,

$$|E_0|^2 = r - 1, D_0 = 1, P_0 = E_0, \Omega = -\delta,$$

$$k_\perp^2 = k_0^2 = \delta/a. \tag{9}$$

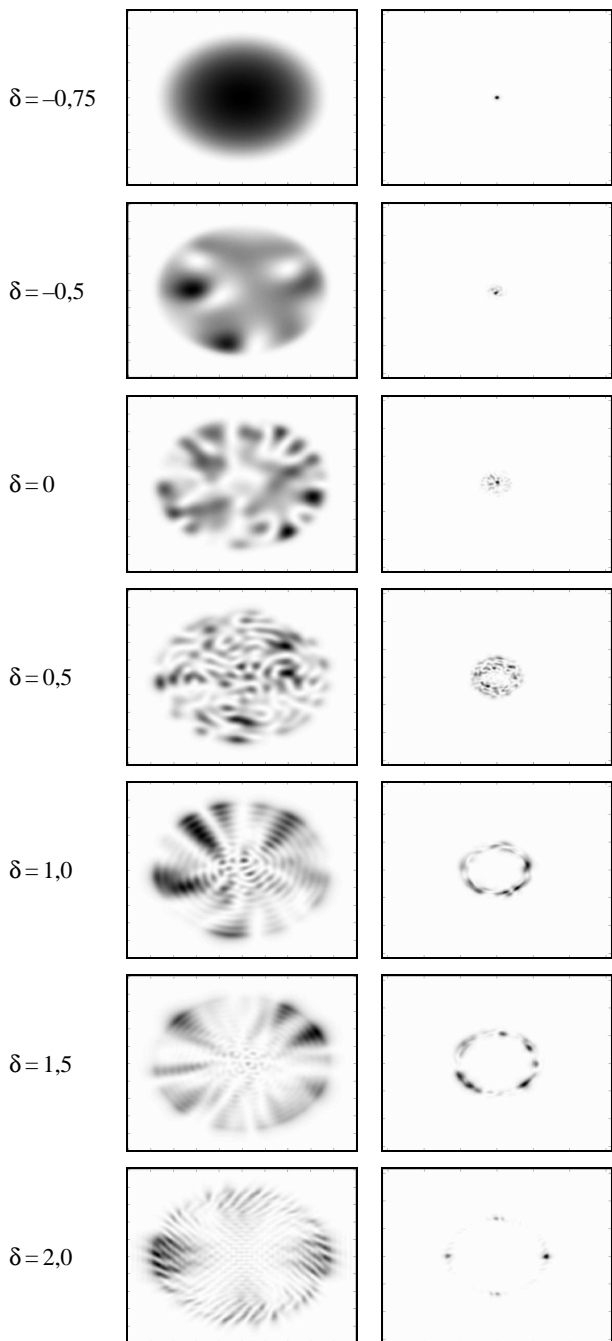


Рис. 2. Распределения интенсивности в ближнем (слева) и дальнем поле (справа) на круглой апертуре при $r = 1,5$, диапазон температур $+60..-40$ °C (сверху вниз)

Физически решение (8, 9) соответствует внеосевой генерации плоской волны под углом к оси резонато-

ра. То есть у волнового вектора электромагнитной волны появляется небольшая (по сравнению с продольной) поперечная составляющая k_\perp . Пороговое условие генерации таких волн не зависит от величины положительной отстройки и соответствует $r_{thr} = 1$.

Проведённое численное моделирование системы (1) подтвердило эволюционную устойчивость подобного внеосевого излучения и формируемых в результате нелинейного взаимодействия этих волн паттернов.

При $0 \leq \delta \leq 1$ (соответствующая температура активной среды лежит в диапазоне $0..-20$ °C [5, 9]) распределение в дальней зоне на круглой апертуре имеет форму кольца, радиус которого меняется в соответствии с (9) (рис. 1, 2 $\delta = 0..1$). С увеличением накачки это кольцо может деформироваться и претерпевать разрывы. При этом в ближней зоне наблюдаются модулированные по пространству нестационарные оптические структуры (roll-patterns).

На прямоугольной апертуре сначала тоже образуется квазистационарное кольцо в дальней зоне, которое затем сменяется стационарным распределением в виде четырёх точек, расположенных по вершинам квадрата, вписанного в это кольцо. Это свидетельствует о преимущественном распространении четырёх поперечных наклонных (внеосевых) волн в резонаторе (рис. 1 $\delta = 0..2$).

При температурах ниже -20 °C ($\delta > 1$) в ближнем поле наблюдаются мелкомасштабные структуры с характерными размерами $\sim k_\perp^{-1}$. Причём при $d \geq 2$ в дальней зоне распределение интенсивности представляет собой четыре пика, расположенных по вершинам квадрата, и на квадратной, и на круглой апертуре.

Кроме наблюдения сценария развития динамики ВИЛ при изменении температуры, аналогично тому, что описан в экспериментальных исследованиях [5-10], было необходимо проверить количественное соответствие характеристик получаемых структур теоретически предсказанным.

На рис. 3 представлена зависимость получаемых в дальней зоне пространственных частот от частотной отстройки. Прерывистой линией проведена теоретическая кривая (9). Маркерами нанесены точки, соответствующие различным накачкам на квадратной и круглой апертурах. Видно, что накачка и форма активной области слабо влияет на характерный пространственный спектр.

Заключение

В работе рассмотрена модель широкоапертурного полупроводникового вертикально излучающего лазера с круглой и квадратной формами апертур на основе полной системы уравнений Максвелла–Блоха в двумерном приближении. Промоделировано, что с помощью принятой модели может быть качественно воспроизведена экспериментально наблюдаемая смена режимов генерации от приосевой к существенно внеосевой при изменении температуры лазерной среды в ВИЛ.

На основе проведённого численного моделирования определена зависимость поперечной составляющей волнового числа от частотной отстройки и параметра накачки.

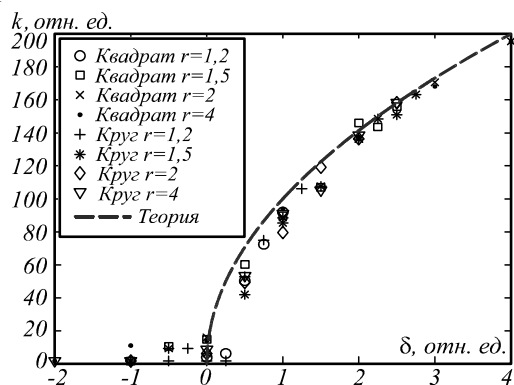


Рис. 3. Зависимость поперечной составляющей волнового числа от частотной отстройки для различных накачек на круглой и квадратной апертурах

Показано, что как для случая круглой апертуры, так и для случая квадратной апертуры при положительных частотных отстройках, которые соответствуют температурам ниже 0°C , и в широком диапазоне накачек выше порога характерно внеосевое излучение. В ближней зоне при таких температурах наблюдаются промодулированные по пространству мелкомасштабные оптические структуры, в дальней зоне – излучение в виде кольца или четырёх ярких точек, лежащих на этом кольце. Радиус кольца увеличивается с отстройкой частоты (на эксперименте это соответствует дальнейшему охлаждению среды) пропорционально корню квадратному от отстройки. Напротив, при отрицательных отстройках (температурах выше 0°C) и накачках вблизи порога наблюдается стационарный квазиоднородный режим излучения. При больших накачках получены нестационарные крупномасштабные оптические структуры. В пространственном спектре это выражается в несколько увеличенной расходимости при общем сохранении приосевого характера излучения.

Полученное качественное соответствие построенных паттернов экспериментально наблюдаемым подтверждает применимость модели Максвелла–Блоха для теоретического исследования закономерностей формирования пространственно-временных структур в широкоапертурных ВИЛ.

Благодарности

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013–2020 гг. и Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект 1451, НИР №ГР 114091840046, грантом РФФИ 14-02-31419 мол_а.

Литература

1. **Hegarty, S.P.** Pattern Formation in the Transverse Section of a Laser with a Large Fresnel Number / S.P. Hegarty, G. Huyet, J.G. McInerney // *Physical Review Letters*. – 1999. – Vol. 8, Issue 7. – P. 1434-1437.

2. **Staliunas, K.** Transverse Patterns in Nonlinear Optical Resonators / K. Staliunas, V.J. Sanchez-Morcillo. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. – P. 426.
3. **Otsuka, K.** Generation of vortex array beams from a thin-slice solid-state laser with shaped wide-aperture laser-diode pumping / K. Otsuka, S.-N. Chu // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34(1). – P. 10-12.
4. **Anchikov, D.A.** Dynamic modes of wide-aperture laser systems above the second lasing threshold / D.A. Anchikov, A.A. Krents, N.E. Molevich, A.V. Pahomov // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2014. – Vol. 41(8). – P. 226-229.
5. **Schulz-Ruhtenberg, M.** Length scales and polarization properties of annular standing waves in circular broad-area vertical-cavity surface-emitting lasers / M. Schulz-Ruhtenberg, Y. Tanguy, R. Jäger // *Applied Physics B*. – 2009. – Vol. 97. – P. 397-403.
6. **Schulz-Ruhtenberg, M.** Transverse patterns and length-scale selection in vertical-cavity surface-emitting lasers with a large square aperture / M. Schulz-Ruhtenberg, I.V. Babushin, N.A. Loiko // *Applied Physics B*. – 2005. – Vol. 8. – P. 945-953.
7. **Gronenborn, S.** Dynamics of the Angular Emission Spectrum of Large-Area VCSELs / S. Gronenborn, H. Moench, M. Müller // *Proceedings of SPIE*. – 2010. – Vol. 7615. – P. 76150I.
8. **Yu, Y.T.** Exploring lasing modes and polarization characteristics in broad-area square-shaped vertical-cavity surface emitting lasers with frequency detuning / Y.T. Yu, P.H. Tuan, C.P. Wen // *Laser Physics Letters*. – 2014. – Vol. 11. – P. 115001.
9. **Masoller, C.** Modeling thermal effects and polarization competition in vertical-cavity surface-emitting lasers / C. Masoller, M.S. Torre // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(26). – P. 21294.
10. **Schulz-Ruhtenberg, M.A.** Experimental analysis of spatial states in broad-area vertical-cavity surface-emitting lasers. – PhD Thesis. – Berlin, 2008.
11. **Агравал, Г.П.** Основы волоконной оптики / Г.П. Агравал; пер. с англ. – М.: Мир, 1996.
12. **Staliunas, K.** Nonlinear pattern formation in active optical systems: shocks, domains of tilted waves, and cross-roll patterns / K. Staliunas, G. Sleky, C.O. Weiss // *Physical Review Letters*. – 1997. – Vol. 79. – P. 2658.
13. **Esteban-Martín, A.** Experimental approach to transverse wave-number selection in cavity nonlinear optics / A. Esteban-Martín, J. Garcia, E. Roldan, V.B. Taranenko, G.J. de Valcarcel, C.O. Weiss // *Physical Review A*. – 2004. – Vol. 69. – P. 033816.
14. **Заикин, А.П.** Периодические автоволновые структуры в широкоапертурном лазере с отстройкой частоты. 2. Распределенная модель / А.П. Заикин, А.А. Кургузкин, Н.Е. Молевич // *Квантовая Электроника*. – 1999. – Т. 27, № 3. – С. 249-252.
15. **Заикин, А.П.** Влияние скорости кросс-релаксации на поперечную динамику излучения широкоапертурного лазера / А.П. Заикин, Н.Е. Молевич // *Квантовая Электроника*. – 2004. – Т. 34, № 8. – С. 731-735.
16. **Анчиков, Д.А.** Пространственно-временные неустойчивости в широкоапертурных лазерах / Д.А. Анчиков, А.А. Кренц, Н.Е. Молевич, А.В. Пахомов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 681-685.

References

- 1] Hegarty SP, Huyet G, McInerney JG. Pattern Formation in the Transverse Section of a Laser with a Large Fresnel Number. *Physical Review Letters* 1999; 8(7): 1434-7.
- 2] Staliunas K, Sanchez-Morcillo VJ. Transverse Patterns in Nonlinear Optical Resonators. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2003.
- 3] Otsuka K, Chu S-N. Generation of vortex array beams from a thin-slice solid-state laser with shaped wide-aperture laser-diode pumping. *Optics Letters* 2009; 34(1): 10-2.

- [4] Anchikov DA., Krents AA., Molevich NE., Pahomov AV. Dynamic modes of wide-aperture laser systems above the second lasing threshold. Bulletin of the Lebedev Physics Institute 2014; 41(8): 226-9.
- [5] Schulz-Ruhtenberg M, Tanguy Y, Jäger R. Length scales and polarization properties of annular standing waves in circular broad-area vertical-cavity surface-emitting lasers. Appl Phys B 2009; 97: 397-403.
- [6] Schulz-Ruhtenberg M, Babushkin IV., Loiko NA. Transverse patterns and length-scale selection in vertical-cavity surface-emitting lasers with a large square aperture. Appl. Phys. B 2005; 81: 945-53.
- [7] Gronenborn S, Moench H, Miller M. Dynamics of the Angular Emission Spectrum of Large-Area VCSELs. Proc of SPIE 2010; 7615: 76150I.
- [8] Yu YT, Tuan PH., Wen CP. Exploring lasing modes and polarization characteristics in broad-area square-shaped vertical-cavity surface emitting lasers with frequency detuning. Laser Phys Lett 2014; 11: 115001.
- [9] Masoller C, Torre MS. Modeling thermal effects and polarization competition in vertical-cavity surface-emitting lasers. Optics Express 2008; 16(26): 21294.
- [10] Schulz-Ruhtenberg M. Experimental analysis of spatial states in broad-area vertical-cavity surface-emitting lasers. PhD Thesis. Berlin; 2008.
- [11] Agrawal GP. Nonlinear fiber optics. – N.Y.: Academic Press; 1989.
- [12] Staliunas K, Slekys G, Weiss CO. Nonlinear pattern formation in active optical systems: shocks, domains of tilted waves, and cross-roll patterns. Phys Rev Lett 1997; 79: 2658.
- [13] Esteban-Martín A, García J, Roldán E, Taranenko VB, de Valcarcel GJ, Weiss CO. Experimental approach to transverse wave-number selection in cavity nonlinear optics. Phys Rev A 2004; 69: 033816.
- [14] Zaikin AP, Kurguzkin AA, Molevich NE. Periodic self-wave structures in a wide-aperture laser with frequency detuning. II. Distributed model. Quantum Electronics 1999; 29(6): 526-9.
- [15] Zaikin AP, Molevich NE. Effect of the cross-relaxation rate on the transverse radiation dynamics of a wide-aperture laser. Quantum Electronics 2004; 34(8): 731-5.
- [16] Anchikov DA, Krents AA, Molevich NE, Pahomov AV. Spatio-temporal instabilities in large aperture lasers. Computer Optics 2014; 38(4): 681-5.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE-INDUCED LASING DYNAMICS IN BROAD-AREA VCSESL

D.A.Anchikov¹, A.A.Krents^{1,2}, S.V.Krestin^{1,2}, N.E.Molevich^{1,2}, A.V.Pakhomov^{1,2}

¹ Samara State Aerospace University, Samara, Russia,

² Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Abstract

In this paper, we investigate a model of wide-aperture vertical-cavity surface-emitting semiconductor VCSESL based on the complete set of two-dimensional Maxwell-Bloch equations on circular and square apertures. The results of numerical simulation in near and far fields are shown in relation to frequency detuning, which can be presented in semiconductor lasers as a function of temperature. The simulation results are compared with the experimental data and theoretical predictions.

Keywords: laser dynamics, optical patterns, lasing modes, beam quality, frequency detuning

Citation: Anchikov DA, Krents AA, Krestin SV, Molevich NE, Pakhomov AV. Investigation of temperature-induced lasing dynamics in broad-area VCSESL. Computer Optics 2015; 39(5): 721-7. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-721-727.

Acknowledgements: The study was partially funded by the RF Ministry of Education and Science under SSAU's Competitiveness Enhancement Program in 2013-2020, the government order to educational and research institutions, project No. 1451, and the RFBR grant 14-02-31419 mol_a.

Сведения об авторах

Анчиков Дмитрий Александрович, 1988 года рождения, в 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Лазерная техника и лазерные технологии». Аспирант кафедры физики в СГАУ. Область научных интересов: динамика лазеров, численное моделирование.

E-mail: swadimaz@mail.ru.

Dmitry Alexandrovich Anchikov (b. 1988) graduated from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2011, specializing in Laser Technology. He is a post-graduate student at Physics department of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. His research interests currently focus on laser dynamics and numerical simulation.

Кренц Антон Анатольевич, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Работает доцентом кафедры физики в СГАУ. Область научных интересов: динамика лазеров, хаос, поперечная нелинейная оптика.

E-mail: krenz86@mail.ru.

Anton Anatolyevich Krents (b. 1986) received his Master's degree in Applied Mathematics and Physics from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2009. He received his Candidate of Sciences degree in Physics and Mathematics in 2012. He works as an Associate Professor at Physics department of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. His research interests currently focus on laser dynamics, chaos and transverse nonlinear optics.

Крестин Сергей Васильевич, 1967 года рождения, в 1991 г. окончил Московский физико-технический институт по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат технических наук с 2004 г. Работает ведущим математиком СФ ФИАН. Область научных интересов – параллельные вычисления.

E-mail: krestin@mail.ru.

Sergey Vasilevich Krestin (b. 1967) graduated from Moscow Institute of Physics and Technology in 1991 on specialty "Applied Mathematics and Physics". He received his PhD in 2004. He works as a leading mathematician of P.N. Lebedev Physical Institute (Samara branch). His research interests are currently focused on parallel calculation.

Молевич Нонна Евгеньевна – родилась в 1959 году, окончила с отличием Высшую школу физиков МИФИ – ФИАН в 1982 году. Является заведующим теоретическим сектором СФ ФИАН и профессором кафедры физики Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов – нелинейная оптика, физика лазеров и нелинейная динамика неравновесных газовых сред. Опубликовала 200 научных работ. Лауреат Губернской премии 2002 года в области науки и техники за цикл работ «Акустика неравновесных сред», Лауреат Премии ФИАН за лучшую научную работу 2011 г.

E-mail: molevich@fian.smr.ru.

Nonna Evgenyevna Molevich (b. 1959) graduated with honors from the Higher Physics School of MIPhI - LPI of the RAS. She is the head of the theoretical sector of P. N. Lebedev Physical Institute (Samara branch) and a professor at Physics department of Samara State Aerospace University (SSAU). Her research interests currently focus on nonlinear optics, physics of lasers and nonlinear dynamics of nonequilibrium media. She is a co-author of 200 scientific papers. She is the recipient of the 2002 Provincial award in Science and Technology for a series of papers in Acoustics of Nonequilibrium Media and the laureate of the 2011 P. N. Lebedev Physical Institute award.

Пахомов Антон Владимирович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и физика». Аспирант кафедры физики в СГАУ. Область научных интересов: динамика лазеров, нелинейная оптика.

E-mail: pahomov_91@mail.ru.

Anton Vladimirovich Pakhomov (b. 1991) received his Master's degree in Applied Mathematics and Physics from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2014. He is a post-graduate student at Physics department of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. His research interests currently focus on laser dynamics and nonlinear optics.

*Поступила в редакцию 25 октября 2015 г.
Окончательный вариант – 24 ноября 2015 г.*