

Исследование влияния фактора Генри на динамику широкоапертурного VCSEL

Е.А. Ярунова
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
Самарский филиал Физического
института им. П.Н. Лебедева РАН
Самара, Россия
liza.yarunova@mail.ru

А. А. Кренц
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
Самарский филиал Физического
института им. П.Н. Лебедева РАН
Самара, Россия
krenz86@mail.ru

Н. Е. Молевич
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
Самарский филиал Физического
института им. П.Н. Лебедева РАН
Самара, Россия
nonna.molevich@mail.ru

Аннотация — В данной работе анализируется модель, описывающая широкоапертурный лазер с вертикальным резонатором (VCSEL). Проведен линейный анализ устойчивости, и получены дисперсионные кривые для рассматриваемых параметров системы. Также построены области неустойчивости для различных значений фактора Генри, которые согласуются с дисперсионными кривыми. Исследуется стабилизирующий эффект оптической инжекции.

Ключевые слова — VCSEL, фактор Генри, оптическая инжекция

1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL) активно используются для высокоскоростной передачи данных [1]. Для повышения выходной мощности используется широкая апертура, что может приводить к пространственно-временным неустойчивостям [2]. Кроме того, для полупроводниковых лазеров необходимо учитывать влияние коэффициента увеличения ширины линии α (фактор Генри), который определяет зависимость показателя преломления от плотности носителей в полупроводнике. Внешняя оптическая инжекция может использоваться как метод стабилизации лазерного излучения, поэтому представляет интерес изучить, как данный метод проявляет себя в системе с фактором Генри [3].

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОДНОРОДНОЕ СТАЦИОНАРНОЕ РЕШЕНИЕ

Динамика широкоапертурного полупроводникового лазера с вертикальным резонатором (VCSEL) может быть описана моделью, которая представлена в работе [4].

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = -(1 + \eta + i\theta)E + E_{inj} - 2Ci\theta(N-1)E + iA_{\perp}E, \\ \frac{\partial N}{\partial t} = -\gamma \left[N + \beta N - I_p + |E|^2(N-1) \right] + \gamma dA_{\perp}N, \end{cases} \quad (1)$$

где E, N - безразмерные огибающие электрического поля и инверсии населённости соответственно. E_{inj} - огибающая электрического поля, инжектируемого в резонатор. Подробное описание системы приведено в работе [4]. В данной статье рассматривается система, которая представляет собой излучающий лазер с усилением, возникающим за счет свободных носителей (с инверсией населенности, вызванной

инжектированным током). Нами рассматривается активная конфигурация устройства, из чего следует, что $\Theta = \alpha + i$, где α - фактор Генри. В соответствии со сказанным выше, установим следующие параметры системы $\beta = 0, \eta = 0, \theta = -1,5, \alpha = -5, C = 0,45, I = 4, d = 0,052, \gamma = 10$ [4]. Стационарное однородное решение системы уравнений будет иметь вид:

$$|E_{inj}|^2 = |E_0|^2 \left[(\theta + 2C\alpha(N_0 - 1))^2 + (1 - 2C(N_0 - 1))^2 \right], \quad (2)$$

$$N_0 = \frac{I + |E_0|^2}{|E_0|^2 + 1}. \quad (3)$$

3. ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ

Линейная устойчивость однородного решения анализируется путем изучения реакции системы на малые возмущения вблизи стационарных значений. Допустим, что

$$\begin{cases} E = E_0 + \delta E_0 \exp(\lambda t + i(q_x x + q_y y)), \\ E^* = E_0^* + \delta E_0^* \exp(\lambda t + i(q_x x + q_y y)), \\ N = N_0 + \delta N_0 \exp(\lambda t + i(q_x x + q_y y)), \end{cases} \quad (4)$$

где $\delta E_0, \delta N_0$ малые возмущения соответствующих величин. Подставляя выражения (4) в систему (1), получим следующее характеристическое уравнение:

$$\lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0. \quad (5)$$

Наибольший интерес представляет свободный член характеристического уравнения (5), так как он позволяет определить границу неустойчивых волновых чисел из условия $\lambda = 0$. Это точка, в которой дисперсионная кривая пересекает ось, и она соответствует максимальному неустойчивому волновому числу. И по критерию Рауса-Гурвица область неустойчивости определяется условием $a_3 < 0$. Тогда пространство неустойчивых волновых чисел можно графически определить на плоскости $(|E_0|, q)$, которая изображена на рис. 1(а).

Пересечение области неустойчивости с осью $q = 0$, если такое имеется, соответствует тем значения $|E_0|$, для

которых однородное стационарное решение неустойчиво к возмущению плоской волны. Эта область закрашена на рис. 1(а) серым цветом. Оставшиеся не закрашенные области (ограниченные сплошной кривой) определяются двумя предельными значениями $|E_s^+|$ и $|E_s^-|$, которые так же отмечены на кривой однородного стационарного решения рис. 1(б). Соответственно, неустойчивая область решений показана на рис. 1(б) сплошной кривой, а стабильная - пунктирной. Определяя графически предельные значения $|E_s^\pm|$, можно определить пороговое значение инжекции $|E_{inj}|$, необходимое для стабилизации лазерного излучения.

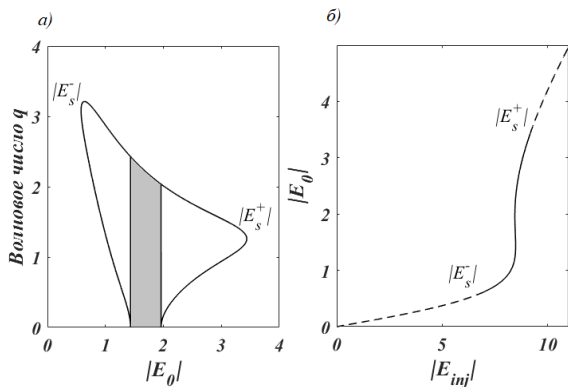


Рис. 1. а) Область неустойчивости в плоскости $(|E_0|, q)$, б) Стационарная кривая с устойчивой и неустойчивой областями

Как уже было сказано, пересечение области неустойчивости с осью $q=0$ определяет те стационарные значения, которые неустойчивы к возмущениям плоской волны. Учитывая это, можно получить области неустойчивости при варьировании параметров системы. Например, на рис. 2 серым цветом показаны области неустойчивости в плоскости $(\alpha, |E_0|)$.

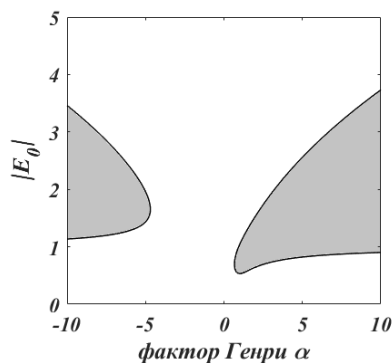


Рис. 2. Области неустойчивости плоской волны, показанные серым цветом в пространстве параметров $(\alpha, |E_0|)$

Мы можем подтвердить полученные результаты, взяв решение, удовлетворяющее неявному стационарному выражению (2), и получить дисперсионные кривые на рис. 3(а,б). На рис. 3(а) показаны дисперсионные кривые, которые соответствуют неустойчивости, при этом использовалось стационарное значение $|E_0|=2,04$ и

соответствующее ему значение инжекции $|E_{inj}| \approx 8$ из области неустойчивости, показанное сплошной кривой на рис. 1(б). На рис. 3(б) показано, когда дисперсионные кривые соответствуют устойчивому случаю, при выборе $|E_0|=5,16$ и $|E_{inj}| \approx 11$.

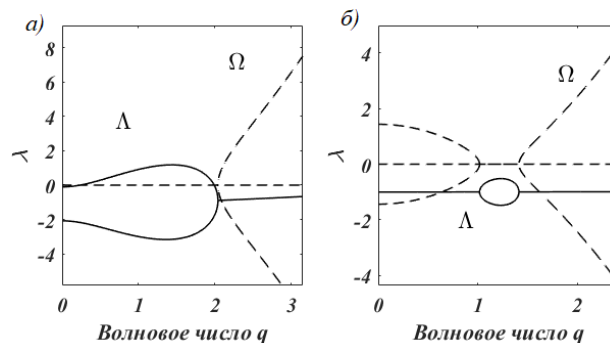


Рис. 3. Дисперсионные кривые для случая а) $|E_0|=2,04$ б) $|E_0|=5,16$.

Действительные части корней показаны сплошными кривыми, а мнимые-пунктирными

В первом случае существует положительная реальная часть корня характеристического уравнения, что соответствует неустойчивости, во втором же случае все инкременты отрицательные, что говорит о стабилизации излучения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматриваются вопросы стабилизации динамики широкоапертурного лазера с помощью внешнего оптического излучения. Получено, что подавление неустойчивых мод возможно только для стационарных значений, из верхней ветви однородного стационарного решения, при этом стационарные значения нижней ветви попадают в неустойчивость Хопфа, которая будет исследована в дальнейшем. Рост фактора Генри и накачки увеличивает пороговое значение инжекции, необходимое для стабилизации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание по теме 0023-2019-0003, FSSS-2020-0014).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liu, A. Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing / A. Liu, P. Wolf, J.A. Lott, D. Bimberg // Photonics Res. – 2019. – Vol. 7(2). – P.121–36.
- [2] Pakhomov, A.V. Intrinsic performance-limiting instabilities in two-level class-B broad-area lasers / A.V. Pakhomov, N.E. Molevich, A.A. Krents, D.A. Anchikov // Opt. Commun. – 2016. – Vol. 372. – P. 14–21.
- [3] Yarusova, E.A. Spatiotemporal Dynamics of Broad-Area Lasers with the Pump Modulation and Injection of External Optical Radiation / E.A. Yarusova, A.A. Krents, N.E. Molevich // Radiophys Quantum El. – 2021. – Vol. 64(4). – P. 290–299.
- [4] Spinelli, L. Spatial solitons in semiconductor microcavities / L. Spinelli, G. Tissoni, M. Brambilla, F. Prati, L. Lugiato // Phys Rev A. – 1998. – Vol. 58. – P. 2542–2559.