

УДК 621.373.8

### ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ФЛУКТУАЦИЙ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО ИЗЛУЧАЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Л. И. БУРОВ<sup>1)</sup>, А. С. ГОРБАЦЕВИЧ<sup>1)</sup>, П. М. ЛОБАЦЕВИЧ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

На основе статистического моделирования проведен численный анализ влияния различных факторов (флуктуации интенсивности спонтанного испускания, концентрации неравновесных носителей, плотности инжекционного тока) на статистические характеристики выходного излучения поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров в области поляризационной неустойчивости. В этой области эффект флуктуаций проявляется максимальным образом, что позволяет сделать обоснованные выводы об относительном влиянии различных параметров. В теории полупроводниковых лазеров принято считать, что доминирующим источником флуктуаций служат флуктуации интенсивности спонтанного испускания, а всеми остальными источниками можно пренебречь. Анализ данных результатов статистического моделирования показывает, что такое утверждение излишне жесткое и данный источник не является доминирующим. Более того, как показали результаты моделирования, основной вклад определяется флуктуациями концентрации неравновесных носителей, которые могут быть связаны не только с флуктуациями спонтанного испускания. Именно учет флуктуаций концентрации носителей, которые приводят к флуктуациям коэффициента усиления, позволяет получить весь набор зависимостей, которые наблюдаются

---

#### Образец цитирования:

Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобацевич ПМ. Влияние различных источников флуктуаций на статистические характеристики выходного излучения поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;3:12–21. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-12-21>

#### For citation:

Burov LI, Gorbachevich AS, Labatsevich PM. The influence various sources of fluctuation on the statistical parameters of the vertical cavity surface emitting lasers output radiation. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;3:12–21. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-12-21>

---

#### Авторы:

**Леонид Иванович Буров** – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры общей физики физического факультета.

**Александр Сергеевич Горбачевич** – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры общей физики физического факультета.

**Павел Михайлович Лобацевич** – магистрант кафедры общей физики физического факультета. Научный руководитель – Л. И. Буров.

#### Authors:

**Leonid I. Burov**, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of general physics, faculty of physics.

[burov@bsu.by](mailto:burov@bsu.by)

**Alexander S. Gorbachevich**, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of general physics, faculty of physics.

[alex.gorbachevich@gmail.com](mailto:alex.gorbachevich@gmail.com)

**Pavel M. Labatsevich**, master's degree student at the department of general physics, faculty of physics.

[pavel.labatsevich@mail.ru](mailto:pavel.labatsevich@mail.ru)

экспериментально. Такой результат нельзя непосредственно связать с особенностями принятой модели, тем более что в ней спонтанное излучение рассматривается как существенный фактор и, если бы его влияние было действительно доминирующим, это обязательно сказалось бы на результатах статистического моделирования. Поэтому полученные данные позволяют усомниться в главенствующей роли флуктуаций интенсивности спонтанного излучения в процессе формирования статистических характеристик выходного излучения и принять во внимание флуктуации концентрации неравновесных носителей.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер; поляризация; флуктуации.

## THE INFLUENCE VARIOUS SOURCES OF FLUCTUATION ON THE STATISTICAL PARAMETERS OF THE VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASERS OUTPUT RADIATION

*L. I. BUROV<sup>a</sup>, A. S. GORBATSEVICH<sup>a</sup>, P. M. LABATSEVICH<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

*Corresponding author: P. M. Labatsevich (pavel.lobatsevich@mail.ru)*

Based on statistical modeling, a numerical analysis of the effects exerted by different factors (fluctuations of the spontaneous emission intensity, nonequilibrium carrier concentration, injection current density) on the statistical characteristics of radiation at the output of surface emitting semiconductor lasers in the region of polarization instability has been performed. In this region the effect of fluctuations is maximal, offering the possibility for substantiated conclusions about relative effects of the parameters. In a theory of semiconductor lasers it is thought that the intensity fluctuations of spontaneous emission represent the dominant source of fluctuations, whereas all other sources may be neglected. As demonstrated by the results of conducted statistical modeling, this statement is too rigorous; moreover, such a source is not dominant. Taking into consideration fluctuations of the carrier concentration, which result in fluctuations of the amplification factor, we can derive a complete set of the relationships observed experimentally. This result cannot be associated with features our model because in our theory spontaneous emission is a significant factor. If the influence of spontaneous emission would be the dominant factor, it would affect the simulation results. The obtained data make it possible to doubt the key role of the spontaneous emission intensity fluctuations in the process of statistical characteristics formation for the output radiation and to take into account fluctuations of the nonequilibrium carrier concentration.

**Keywords:** semiconductor laser; polarization; fluctuations.

### Введение

Эффект переключения поляризации (ПП) в поверхностно излучающих полупроводниковых лазерах (VCSEL), связанный с резким переключением выходного излучения с одной линейной поляризации на ортогональную при плавном изменении инжекционного тока, хорошо известен [1] и широко используется как для исследования внутренней динамики полупроводниковых лазеров, так и в разнообразных прикладных сферах. Более того, область ПП является областью сильной неустойчивости, в которой флуктуации играют существенную роль в определении режимов работы лазера и характеристик его выходного излучения [2]. Поэтому важным представляется вопрос об источниках флуктуаций и их относительном вкладе в окончательные эффекты. Для полупроводниковых лазеров выделяют три основных источника: флуктуации спонтанного излучения, концентрации плотности неравновесных носителей и плотности инжекционного тока. Однако начиная с классических работ Ч. Генри [3] общепринятым считается, что вся статистика в полупроводниковых лазерах определяется флуктуациями спонтанного излучения. В то же время именно для VCSEL в области ПП обнаружено, что подобная доминанта не позволяет объяснить получающиеся зависимости [4].

Если более детально рассмотреть статистическую природу спонтанного излучения, то она проявляется в двух аспектах. Во-первых, сам процесс спонтанного излучения носит случайный характер, что в первую очередь отражается на ориентации поляризации испускаемого кванта. Однако доминирующий подход к описанию основан на методе поляризационных мод (МПМ), в котором используются только две ортогональные базовые поляризации с разложением любой иной поляризации по базовым. С точки зрения статистики это означает определенное усреднение и, следовательно, снижение эффективности воздействия данного механизма. Во-вторых, имеет место случайное распределение актов

испускания по объему активной среды. Однако в рамках точечных моделей, которые используются в подавляющем большинстве случаев, происходит усреднение по объему резонатора, что нивелирует данный эффект, если только нет иных механизмов флуктуации плотности неравновесных носителей. Интересным является и тот факт, что в наиболее популярном варианте МПМ (model SFM) в его исходной формулировке [5] спонтанное излучение вообще отсутствует и лишь позднее появляется в качестве чисто ленжевеновских членов в соответствующих уравнениях, которые по своей сути есть подгоночные параметры.

Таким образом, вышесказанное указывает на то, что нет достаточных физических оснований считать спонтанное излучение доминирующим фактором, определяющим статистические характеристики полупроводниковых лазеров вообще и VCSEL в частности. Необходимо исследовать весь набор источников и определить роль каждого из факторов в формировании окончательного результата, что и является основной целью данной работы. Область ПП выбрана именно для получения наиболее существенных эффектов.

### Теоретическая модель

В качестве базовой служит модель, которая последовательно развивалась авторами и показала прекрасную работоспособность применительно к описанию поляризационных эффектов в VCSEL [6; 7]. Более того, эта модель использует представление поляризованного излучения в виде некогерентного набора большого числа линейно-поляризованных компонент с разной ориентацией вектора поляризации (метод поляризационных компонент, МПК), что позволяет детально учесть статистический характер спонтанного испускания. Что касается двух оставшихся источников флуктуаций, то собственные флуктуации инжекционного тока обычно малы и для выяснения влияния такого фактора применяют внешний источник флуктуаций, а в случае флуктуаций концентрации неравновесных носителей заряда  $N$  их можно моделировать за счет флуктуаций плотности инжекционного тока [8; 9]. Это связано с тем, что изменения  $N$  порождают соответствующие изменения коэффициента усиления, которые можно моделировать путем вариации плотности инжекционного тока. Подобное допущение позволяет использовать простую точечную модель лазера.

Итак, применим модель, детально описанную в работе [7], с параметрами, представленными в общем виде. Тогда систему уравнений для ориентационной компоненты плотности фотонов  $S(\psi)$  в резонаторе и концентрации неравновесных носителей заряда  $N$  можно записать как

$$\begin{aligned} \frac{dS(\psi)}{dt} &= \Gamma\beta \frac{N}{\pi\tau_N} - v(\Gamma G(\psi) - \rho(\psi) - k_R(\psi))S(\psi), \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{j}{ed} - v \int G(\psi)S(\psi)d\psi - \frac{N}{\tau_N}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\psi$  – угол, определяющий ориентацию вектора поляризации компоненты плотности фотонов  $S(\psi)$  относительно выделенной оси;  $\Gamma$  – фактор оптического ограничения;  $\beta$  – доля фотонов спонтанного излучения, попадающая в моду генерации;  $\tau_N$  – время жизни неравновесных носителей заряда;  $v$  – скорость света в активном слое;  $j$  – плотность инжекционного тока;  $e$  – заряд электрона;  $d$  – толщина активного слоя;  $G(\psi)$ ,  $\rho(\psi)$ ,  $k_R(\psi)$  – ориентационные компоненты коэффициентов усиления, внутренних потерь и потерь на зеркалах резонатора соответственно, которые имеют вид [7]

$$\begin{aligned} G(\psi) &= g_0(N - N_{tr}) \left( 1 + k_0 \left( 1 - \frac{j}{j_{ps}} \right) \cos 2\psi \right), \\ \rho(\psi) &= \rho_0 \left( 1 + k_1 \left( 1 - \frac{j}{j_{ps1}} \right) \cos 2(\psi - \psi_0) \right), \\ k_R(\psi) &= \ln \frac{1}{R_{10}R_{20}} - k_2 \cos 2\psi, \end{aligned}$$

здесь  $N_{tr}$  – концентрация прозрачности;  $j_{ps}$  – значение плотности инжекционного тока, соответствующее точке поляризационного переключения;  $j_{ps1}$  – плотность тока инжекции, соответствующая нулевой анизотропии коэффициента потерь;  $\psi_0$  – разность фаз между направлением максимальной анизотропии коэффициента потерь и коэффициента усиления;  $R_{10}$ ,  $R_{20}$  – средние по ориентации значения коэффициентов отражения зеркал.

Детальное определение всех функций и параметров приведено в работе [7], мы же остановимся на дополнениях к сформулированной системе уравнений, связанных с введением в рассмотрение флуктуаций.

Статистичность спонтанного испускания заключается в том, что фотон может попадать в компоненту произвольной поляризации. Вторым фактором влияния спонтанного испускания является то, что суммарное количество фотонов в каждый момент времени может быть различным. Но второй фактор оказывает существенно меньшее влияние, так как количество испущенных фотонов (выше порога) является значительной величиной, на которой такие флуктуации практически незаметны. Поэтому в уравнениях (1) мы заменим члены, определяющие вклад спонтанного излучения, следующим образом:

$$L(\psi) = L_{S(N)}(1 + f_\psi(\epsilon)),$$

где  $L_S = \Gamma\beta \frac{N}{\pi\tau_N}$ ,  $L_N = \frac{N}{\tau_N}$ ;  $f_\psi(\epsilon)$  – функция нормального распределения случайной величины с заданными средним значением и дисперсией. При сохранении полного числа фотонов среднее значение должно быть нулевым, однако и для него можно выбрать нормальное распределение, так что полное число фотонов будет меняться для разных реализаций.

Поскольку вторым фактором является статистичность распределения плотности инжекционного тока, то выбор функции становится тривиальным:

$$J(\psi) = J_0(1 + \epsilon(\psi)),$$

где  $\epsilon(\psi)$  – случайная функция, конкретный вид которой будет описан ниже.

Численные решения строились с использованием значений величин, характерных для полупроводниковых структур типа GaAs, которые обычно обеспечивают генерацию в области 850–950 нм. Сама процедура численного расчета проводилась следующим образом. Для выбранного набора параметров рассчитывалась ватт-амперная характеристика (ВАХ) лазера без учета флуктуаций параметра  $L(\psi)$ . По данным ВАХ находилась примерная величина порогового тока – значение, с которого начинается резкий рост выходной интенсивности. Затем рассчитывалась зависимость степени поляризации выходного излучения от тока инжекции, причем параметры анизотропии компонент коэффициента усиления подбирались таким образом, чтобы точка ПП (значение инжекционного тока, при котором степень поляризации выходного излучения равна нулю) составляла примерно 150 % от порогового тока. На практике, как правило, это обеспечивает одномодовый режим VCSEL.

Режим работы был выбран квазистационарным, т. е. сначала ток достигал рабочего значения, а потом «включались» флуктуации интенсивности спонтанного испускания. Флуктуационное ориентационное распределение интенсивности спонтанного испускания изменялось через 10 нс. Для каждого распределения снимались основные характеристики лазерного излучения. Таким образом для каждого численного эксперимента получали данные, состоящие из  $10^5$  точек. На основе этих данных строились гистограммы, по набору которых выявлялись основные закономерности. При численном моделировании основными параметрами выступали величины рабочего тока  $j$ , анизотропии коэффициента усиления  $K_0$ , вклада спонтанного испускания в моду генерации  $\beta$  и дисперсия случайной величины  $\sigma$ .

## Результаты численного моделирования

Первоначально моделировалась ситуация с доминантой одного из источников флуктуаций, поскольку это позволяет проверить корректность исходной модели на основе заложенных физических явлений, результат которых можно качественно предсказать. С другой стороны, необходимо определить области параметров системы, в которых влияние данного источника флуктуаций является наиболее существенным, что важно при анализе поведения системы с участием обоих источников флуктуаций.

Естественным представляется первоначальный выбор спонтанного испускания как основного источника флуктуаций, поскольку это одна из основных гипотез, подлежащих проверке. Логичным является и выбор значения инжекционного тока вблизи точки ПП (значение тока, при котором степень поляризации выходного излучения равна нулю), поскольку именно в этой области флуктуации спонтанного излучения как процесса, запускающего процесс генерации, должны оказывать наибольшее влияние. Следует отметить, что положение точки ПП зависит от динамики процесса включения тока инжекции [10] и, хотя эта зависимость весьма слабая для квазистационарных режимов, говорить о точном определении точки ПП не совсем корректно. Для нашей серии модельных расчетов исходя из параметров режимов работы системы значение точки ПП принято равным 2,1 мА.

Отметим, что функции распределения выходной интенсивности близки к нормальным, но обладают аномально низкой (по сравнению с наблюдаемыми экспериментально) величиной дисперсии, в то время как для степени поляризации имеет место вполне приемлемая картина (рис. 1), вертикальные оси

представляют количество  $N$  реализаций данного значения интенсивности или степени поляризации, нормированное на максимальное число реализаций  $N_{\max}$ . Этот результат не является неожиданным, поскольку еще в [11] было показано, что малая дисперсия распределений связана с достаточно большим числом поляризационных компонент. В этом случае даже высокая величина дисперсии распределения в отдельной компоненте нивелируется вследствие большого числа статистически независимых компонент. Более того, проведенные расчеты подтвердили вывод [11] о том, что дисперсия распределений резко возрастает при уменьшении числа компонент (ниже 10) и достигает максимума для двух компонент, что отвечает случаю МПМ, причем ее значения примерно соответствуют тому диапазону, который получается при прямом использовании МПМ. На основе полученных результатов было выбрано число компонент, равное 70. Оно достаточно велико, чтобы выявить тонкие эффекты, если таковые будут наблюдаться, и в то же время не создает существенных проблем в численных расчетах.

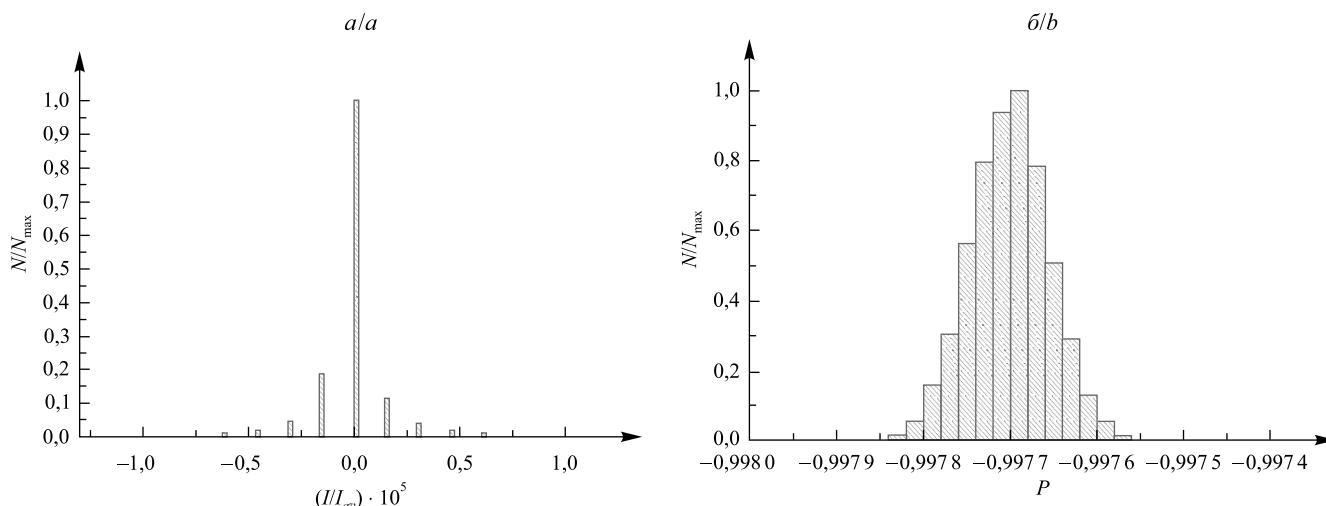


Рис. 1. Гистограммы распределения относительной интенсивности (а) и степени поляризации (б) при  $K_0 = -0.01$ ,  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 1.90$  мА,  $\sigma = 0.2$

Fig. 1. The relative intensity (a) and polarization degree (b) distribution histograms with the value of parameters  $K_0 = -0.01$ ,  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 1.90$  mA,  $\sigma = 0.2$

Полученные anomalно низкие значения дисперсий для распределений интенсивности выходного излучения могут поставить вопрос о корректности используемой модели. Однако гистограммы распределения степени поляризации не только дают значения дисперсии, близкие к наблюдаемым, но и демонстрируют зависимости, легко укладывающиеся в механизмы формирования поляризованного излучения. Например, на рис. 2 для сравнения приведены гистограммы величин тока вблизи точки ПП (см. рис. 2, а) и на краю области ПП (см. рис. 2, б). Во втором случае дисперсия более чем на порядок ниже, что и должно наблюдаться не только из-за механизма формирования, но и по простой логике процесса (точка ПП – точка максимальной неустойчивости).

Влияние спонтанного излучения на функции распределения степени поляризации легко проследить по величине вклада этого процесса  $\beta$  в моду генерации (рис. 3). При увеличении  $\beta$  распределение сдвигается в область меньших значений и сопровождается ростом дисперсии. Такое поведение вполне понятно: поскольку спонтанное излучение в полупроводниковых лазерах слабо поляризовано, то увеличение его вклада ведет к деполяризации лазерного излучения.

Совершенно обратный эффект, как и следовало ожидать, несет рост анизотропии коэффициента усиления – сужение распределения и сдвиг среднего значения в сторону максимальных значений (рис. 4).

Флуктуации спонтанного излучения, казалось бы, вполне закономерным образом проявляются в функциях распределения поляризации, однако это не совсем так. Действительно, даже при наличии 100 % флуктуаций гистограммы степени поляризации имеют вид нормального распределения с повышенной дисперсией при моделировании вблизи точки ПП (рис. 5). Увеличение дисперсии флуктуаций спонтанного испускания приводит к росту дисперсии гистограммы степени поляризации и смещению среднего значения степени поляризации (это вполне согласуется с идеологией, описанной выше), но такое уширение гистограмм для степени поляризации не согласуется с тем, что обычно наблюдается экспериментально. При больших флуктуациях система статистически изменяется (перескакивает) между состояниями с предельными значениями степени поляризации (polarization hopping [8]). С точки зрения функции распределения это переход от нормального распределения к функции с двумя максимумами в области предельных величин, причем при значениях значительно меньших, чем для зависимостей, приведенных на рис. 5.



Таким образом, можно окончательно утверждать, что флуктуации спонтанного излучения влияют на параметры лазерной системы, но не могут рассматриваться как определяющий фактор [12]. Поэтому перейдем ко второму источнику флуктуаций, связанному с поведением плотности неравновесных носителей, которое будем моделировать через флуктуации инжекционного тока.

Вернемся к выбору случайной функции  $\varepsilon(\psi)$ , поскольку существенным вопросом остается зависимость этой функции от угла  $\psi$ . Действительно, нужна физическая причина, которая позволила бы считать распределение плотности тока отличающимся от аксиально-симметричного относительно оси резонатора VCSEL. Фактически эта проблема прямо связана с ориентационной анизотропией коэффициента усиления VCSEL, которая непосредственно (феноменологически) заложена в МПК. Анализ указанной проблемы детально проведен в [6], а здесь лишь отметим, что эта анизотропия может меняться за счет нагрева при протекании тока. Поэтому нарушение аксиальной симметрии в распределении тока может сопровождаться изменением анизотропии коэффициента усиления. Кроме того, для

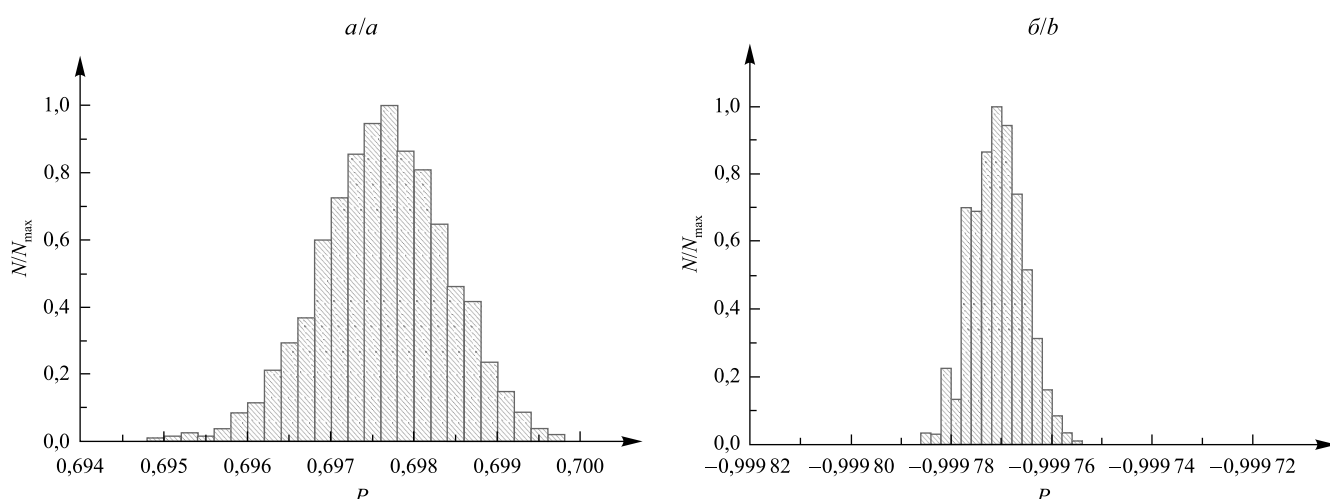


Рис. 2. Гистограммы распределения степени поляризации при  $\beta = 10^{-4}$ ,  $K_0 = -0.1$ ,  $\sigma = 0.2$  для различных значений рабочего тока  $j$ : а – 2,1001 мА; б – 1,90 мА

Fig. 2. The polarization degree distribution histograms with other parameters equal  $\beta = 10^{-4}$ ,  $K_0 = -0.1$ ,  $\sigma = 0.2$  for different value of injection current  $j$ : а – 2.1001 mA; б – 1.90 mA

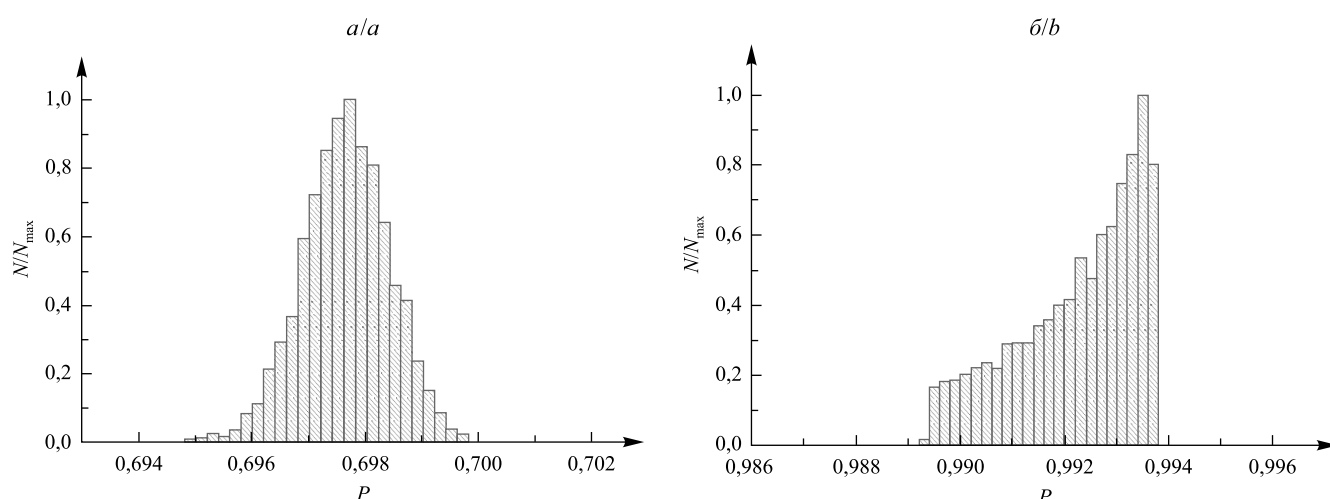


Рис. 3. Гистограммы распределения степени поляризации при  $K_0 = -0.1$ ,  $j = 2.1001$  мА,  $\sigma = 0.2$  для различных значений спонтанного испускания  $\beta$ : а –  $10^{-4}$ ; б –  $10^{-6}$

Fig. 3. The polarization degree distribution histograms with other parameters equal  $K_0 = -0.1$ ,  $j = 2.1001$  mA,  $\sigma = 0.2$  for different value of spontaneous emission  $\beta$ : а –  $10^{-4}$ ; б –  $10^{-6}$

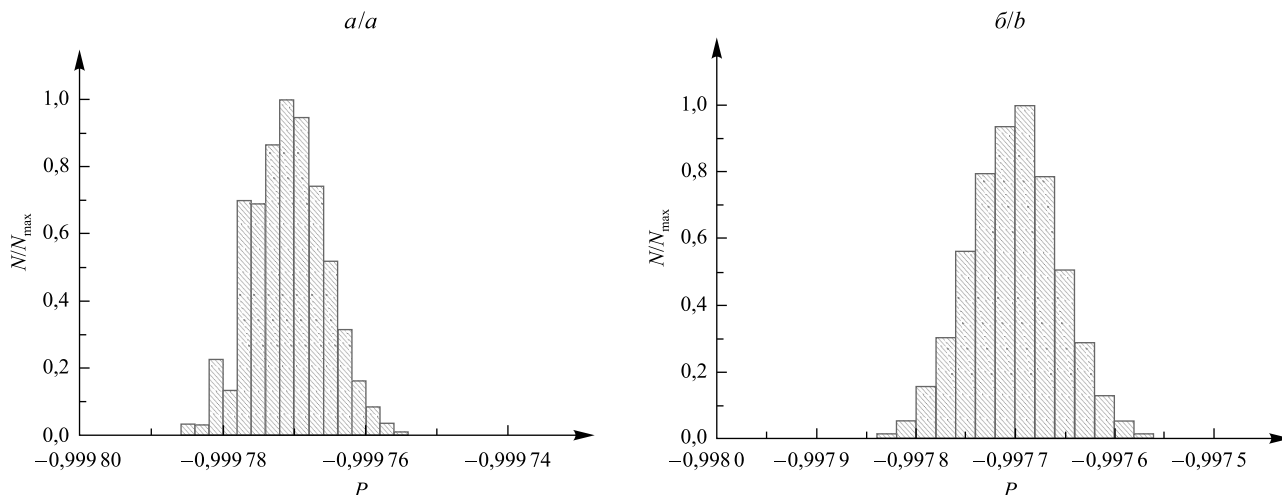


Рис. 4. Гистограммы распределения степени поляризации при  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 1,90$  мА,  $\sigma = 0,2$  для различных значений анизотропии коэффициента усиления:  $K_0 = -0,1$  (а) и  $K_0 = -0,01$  (б)  
Fig. 4. The polarization degree distribution histograms with other parameters equal  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 1,90$  mA,  $\sigma = 0,2$  for different value of gain anisotropy:  $K_0 = -0,1$  (a) and  $K_0 = -0,01$  (b)

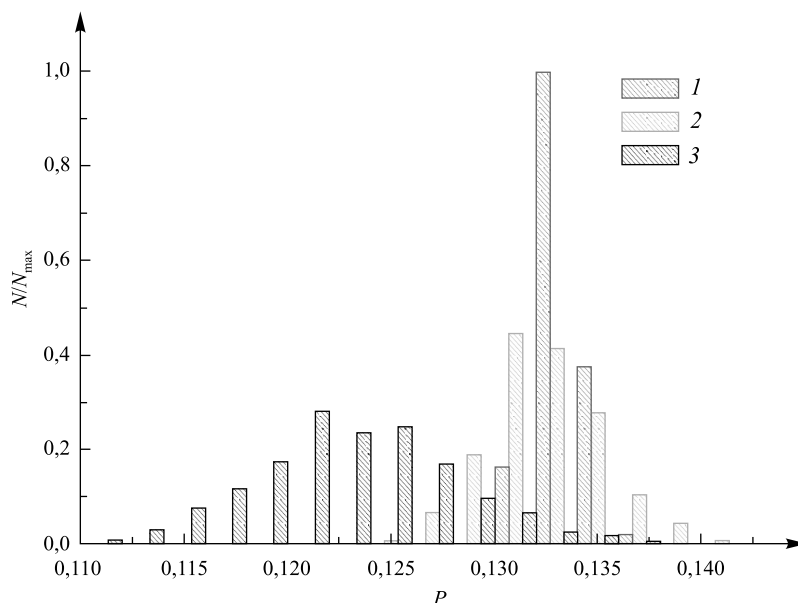


Рис. 5. Гистограммы распределения степени поляризации при  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 2,1001$  мА,  $K_0 = -0,01$  для различных величин дисперсии флуктуаций спонтанного испускания:  $\sigma = 0,2$  (1);  $\sigma = 0,5$  (2);  $\sigma = 1$  (3)  
Fig. 5. The polarization degree distribution histograms with other parameters equal  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 2,1001$  mA,  $K_0 = -0,01$  for different value of spontaneous emission dispersion:  $\sigma = 0,2$  (1);  $\sigma = 0,5$  (2);  $\sigma = 1$  (3)

улучшения проводимости структур VCSEL области брэгговских отражателей обычно допируют дополнительными примесями, увеличивая электронную или дырочную проводимость этих областей [13]. Другими словами, распределение плотности инжекционного тока вполне может терять аксиальную симметрию вследствие целого ряда причин. Однако необходимо подчеркнуть, что флуктуации плотности тока несут нагрузку в большей степени как модельный фактор. Поэтому и его флуктуации мы можем рассматривать гораздо большими, чем это определяется чисто физическими факторами. Более того, численные оценки показывают, что изменению инжекционного тока на 20 % соответствуют изменения плотности неравновесных носителей, не превышающие 2 %. Это принципиально соответствует

общей теории полупроводниковых лазеров, в которой в области выше порога концентрация неравновесных носителей остается практически постоянной. Поэтому будем определять случайную функцию  $\varepsilon(\psi)$  с помощью оператора

$$\varepsilon(\psi) = \text{rnd\_gauss}(\psi, 0, \sigma),$$

задающего распределение Гаусса с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma$ .

Отметим еще раз тот факт (а он чрезвычайно важен при дальнейшем анализе), что при численном решении точные значения инжекционного тока, соответствующего точке ПП, получить сложно, поэтому запись в тексте «в точке ПП» нужно понимать как «вблизи точки ПП», что может явно проявляться в расчете поляризационных характеристик.

Среди полученных результатов сразу же отметим следующий: функции распределения интенсивности имеют существенно большие значения дисперсии, сопоставимые с наблюдаемыми экспериментально, а функции распределения степени поляризации для точек, смещенных относительно точки ПП, имеют характерную асимметрию (рис. 6).

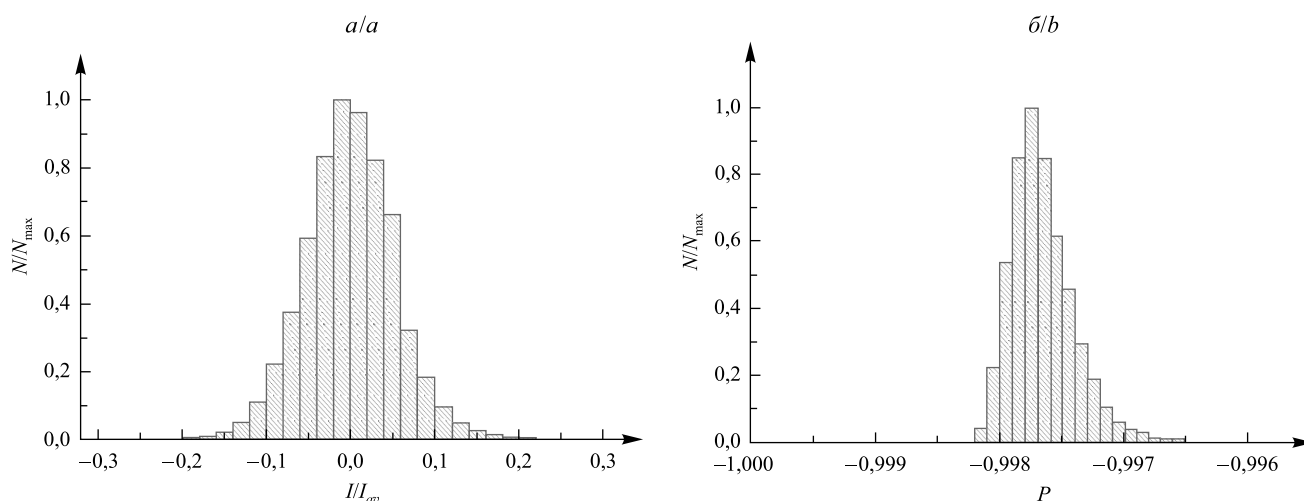


Рис. 6. Гистограммы распределения относительной интенсивности (а) и степени поляризации (б) при  $K_0 = -0.01$ ,  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 1.9$  мА,  $\sigma = 0.2$   
 Fig. 6. The relative intensity (a) and polarization degree (b) distribution histograms with the value of parameters  $K_0 = -0.01$ ,  $\beta = 10^{-4}$ ,  $j = 1.9$  мА,  $\sigma = 0.2$

Влияние вклада спонтанного излучения в моду генерации и степени анизотропии коэффициента усиления аналогично предыдущему случаю, но эффект выражен гораздо сильнее. А вот сдвиг значений инжекционного тока дает весьма характерные результаты (рис. 7). Функции распределения интенсивности остаются симметричными с почти неизменной дисперсией. Однако гистограмма степени поляризации при смещении тока в точку ПП меняет характер распределения. При значении тока на краю области ПП гистограмма сохраняет вид нормального распределения. Если рабочий ток находится вблизи точки ПП, то гистограмма расплывается и образует два максимума, которые соответствуют предельным значениям степени поляризации  $-1$  и  $+1$ . Данный факт наблюдается в экспериментальных работах, что является весомым аргументом в пользу теории, согласно которой основным источником флуктуаций служат флуктуации спонтанного испускания и плотности инжекционного тока. Это говорит о том, что флуктуаций тока на уровне 20 % достаточно для того, чтобы перевести систему в одно из предельных состояний.

Отметим, что закономерности, установленные при флуктуациях спонтанного испускания, полностью проявляются и при наличии флуктуаций плотности инжекционного тока и концентрации неравновесных носителей. Следовательно, данные закономерности служат фундаментальными для нашей феноменологической модели.

Ранее было продемонстрировано, что при 100 % флуктуациях спонтанного испускания функция распределения в точке ПП имеет вид нормального распределения (см. рис. 5), в то время как при наличии 20 % флуктуаций плотности инжекционного тока для степени поляризации наблюдается формирование двух максимумов. Необходимо уточнить, при какой величине флуктуаций плотности инжекционного тока начинается изменение формы функции распределения.

Гистограммы распределения степени поляризации показывают, что вблизи точки ПП (см. рис. 7, а) при наличии флуктуаций плотности инжекционного тока около 8 % начинают формироваться два максимума.



Это свидетельствует о том, что флуктуации плотности инжекционного тока являются очень существенным источником флуктуаций. Одновременно стоит отметить, что на краю области переключения поляризации при наличии шумов на уровне 20 % нормальное распределение степени поляризации переходит в функцию с двумя максимумами (см. рис. 7, б). На основе полученных данных приходим к выводу, что флуктуации плотности инжекционного тока лежат в пределах от 8 до 20 %. Экспериментальные оценки реальных шумов плотности инжекционного тока с учетом шумов концентрации неравновесных носителей тока попадают в указанный диапазон, что говорит о согласованности опытных данных и результатов моделирования.

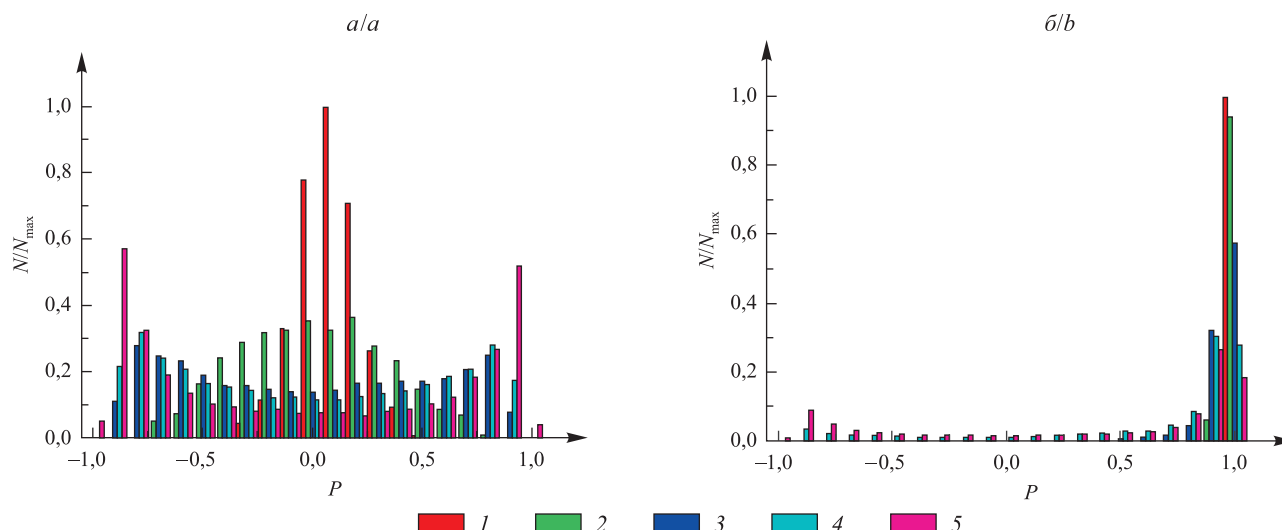


Рис. 7. Гистограммы степени поляризации вблизи точки ПП (а) и на краю области ПП (б) при различной величине дисперсии флуктуаций плотности инжекционного тока:  
1 – 0,001; 2 – 0,003; 3 – 0,008; 4 – 0,01; 5 – 0,02

Fig. 7. The polarization degree histograms at the PS point (a) and at the point shifted relative to the current PS point (b) for different value of injection current dispersion:  
1 – 0.001; 2 – 0.003; 3 – 0.008; 4 – 0.01; 5 – 0.02

Моделирование с учетом обоих источников флуктуаций показывает, что зависимости очень близки к тем, которые получены при наличии только флуктуаций инжекционного тока. Поэтому результаты этих расчетов в статье не приводятся.

## Заключение

Аномально малая величина дисперсии гистограммы распределения интенсивности и форма функции распределения степени поляризации при наличии флуктуаций спонтанного испускания указывают на тот факт, что данный источник шумов, как основной источник статистичности, является некорректным. В то же время дисперсия гистограммы распределения интенсивности, формирование двух максимумов в области поляризационной неустойчивости для гистограммы степени поляризации даже при малых флуктуациях плотности тока приводят к выводу, что именно плотность инжекционного тока и концентрации неравновесных носителей являются основными источниками шумов в VCSEL-лазерах.

Нельзя исключать, что при определенных условиях вклад спонтанного излучения в формирование статистических характеристик окажется более существенным, особенно при нестационарных процессах. Это может быть целью дальнейших исследований.

## Библиографические ссылки

1. Panajotov K, Prati F. Polarization Dynamics of VCSELs. *VCSELs*. 2013;166:181–231. DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0\_6.
2. Zamorra-Munt J, Masoller C. Exploiting noise and polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers for fast pulse generation and logic operations. In: Ludge K, editor. *Nonlinear laser dynamics: from quantum dots to cryptography*. Berlin: Wiley-VCH; 2012. p. 35–56. DOI: 10.1002/9783527639823.ch2.
3. Henry CH. Theory of the linewidth of semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982;18(2):259–264. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071522.
4. Valle A, Sciamanna M, Panajotov K. Irregular pulsating polarization dynamics in gain-switched vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2008;44(2):136–143. DOI: 10.1109/JQE.2007.910707.

5. San Miguel M, Feng Q, Moloney JV. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers. *Physical Review A*. 1995;52(2):1728–1739. DOI: 10.1103/physreva.52.1728.
6. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Наведенный дихроизм усиления в поверхностно излучающих полупроводниковых лазерах. *Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. 2016;3:63–70.
7. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Влияние ориентационной анизотропии параметров поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров на возможность получения поляризационных переключений. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;1:51–57.
8. Willemsen MB, Khalid MUF, van Exter MP, Woerdman JP. Polarization switching of a vertical-cavity semiconductor laser as a Kramers hopping problem. *Physical Review Letters*. 1999;82(24):4815–4818. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.4815.
9. Willemsen MB, van Exter MP, Woerdman JP. Anatomy of a polarization switch of a vertical-cavity semiconductor laser. *Physical Review Letters*. 2000;84(19):4337–4340. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4337.
10. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Переходные процессы при поляризационных переключениях в поверхностно излучающих полупроводниковых лазерах. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;2:17–24.
11. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Роль флуктуаций плотности неравновесных носителей и инжекционного тока в формировании статистических характеристик поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров. В: *Полупроводниковые лазеры и системы на их основе. 10-й Белорусско-Российский семинар; 26–29 мая 2015 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Ковчег; 2015. с. 88–90.
12. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Роль спонтанного испускания в формировании поляризованного излучения VCSEL. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2017;2:50–56.
13. Goeman S, Boons S, Dhoedt B, Vandeputte K, Caekebeke K, Van Daele P, et al. First demonstration of highly reflective and highly polarization selective diffraction gratings (GIRO-Gratings) for long-wavelength VCSEL's. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1998;10(9):1205–1207. DOI: 10.1109/68.705591.

## References

1. Panajotov K, Prati F. Polarization Dynamics of VCSELs. *VCSELs*. 2013;166:181–231. DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0\_6.
2. Zamorra-Munt J, Masoller C. Exploiting noise and polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers for fast pulse generation and logic operations. In: Ludge K, editor. *Nonlinear laser dynamics: from quantum dots to cryptography*. Berlin: Wiley-VCH; 2012. p. 35–56. DOI: 10.1002/9783527639823.ch2.
3. Henry CH. Theory of the linewidth of semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982;18(2):259–264. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071522.
4. Valle A, Sciamanna M, Panajotov K. Irregular pulsating polarization dynamics in gain-switched vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2008;44(2):136–143. DOI: 10.1109/JQE.2007.910707.
5. San Miguel M, Feng Q, Moloney JV. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers. *Physical Review A*. 1995;52(2):1728–1739. DOI: 10.1103/physreva.52.1728.
6. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. The induced amplification dichroism in surface-emitting semiconductor lasers. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*. 2016;3:63–70. Russian.
7. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. The effect of the orientational anisotropy of VCSEL parameters on the possibility to implement polarization switching. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;1:51–57. Russian.
8. Willemsen MB, Khalid MUF, van Exter MP, Woerdman JP. Polarization switching of a vertical-cavity semiconductor laser as a Kramers hopping problem. *Physical Review Letters*. 1999;82(24):4815–4818. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.4815.
9. Willemsen MB, van Exter MP, Woerdman JP. Anatomy of a polarization switch of a vertical-cavity semiconductor laser. *Physical Review Letters*. 2000;84(19):4337–4340. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4337.
10. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Polarization switching transients in surface-emitting semiconductor lasers. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;2:17–24. Russian.
11. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. [Affect of carrier and injection current noise on statistical parameters of surface-emitting semiconductor lasers]. In: *Poluprovodnikovye lazery i sistemy na ikh osnove. 10-i Belorussko-Rossiiskii seminar; 26–29 maya 2015 g.; Minsk, Belarus* [Semiconductor lasers and systems. 10<sup>th</sup> Belarusian-Russian workshop; 2015 May 26–29; Minsk, Belarus]. Minsk: Kovcheg; 2015. p. 88–90. Russian.
12. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. The effect of spontaneous emission on the VCSEL laser output polarization. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2017;2:50–56. Russian.
13. Goeman S, Boons S, Dhoedt B, Vandeputte K, Caekebeke K, Van Daele P, et al. First demonstration of highly reflective and highly polarization selective diffraction gratings (GIRO-Gratings) for long-wavelength VCSEL's. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1998;10(9):1205–1207. DOI: 10.1109/68.705591.

Статья поступила в редколлегию 25.07.2019.  
Received by editorial board 25.07.2019.