

УДК 621.373.8

РОЛЬ СПОНТАННОГО ИСПУСКАНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ VCSEL

Л. И. БУРОВ¹⁾, А. С. ГОРБАЦЕВИЧ¹⁾, П. М. ЛОБАЦЕВИЧ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В рамках разработанного ранее подхода к описанию формирования поляризованного излучения в поверхностно излучающих полупроводниковых лазерах проведено исследование влияния вклада спонтанного излучения в моду генерации (параметр β) на характер поляризационных переключений. Расчеты показали, что в области значений $\beta \sim 10^{-5}$ – 10^{-6} наблюдается хорошее согласование с результатами эксперимента. В этом случае возможными вариациями β при изменении инжекционного тока можно пренебречь.

Ключевые слова: поляризационное переключение; поверхностно излучающий лазер; наведенный дихроизм усиления; параметр вклада спонтанного излучения в моду генерации.

Образец цитирования:

Буров Л. И., Горбацевич А. С., Лобацевич П. М. Роль спонтанного испускания в формировании поляризованного излучения VCSEL // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 2. С. 50–56.

For citation:

Burov L. I., Gorbatsevich A. S., Lobatsevich P. M. The effect of spontaneous emission on the VCSEL laser output polarization. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 2. P. 50–56 (in Russ.).

Авторы:

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

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

Павел Михайлович Лобацевич – магистрант кафедры общей физики физического факультета.

Authors:

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

burov@bsu.by

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

alex.gorbatsevich@gmail.com

Pavel Lobatsevich, master's degree student at the department of general physics, faculty of physics.

pavel.lobatsevich@mail.ru

THE EFFECT OF SPONTANEOUS EMISSION
ON THE VCSEL LASER OUTPUT POLARIZATIONL. I. BUROV^a, A. S. GORBATSEVICH^a, P. M. LOBATSEVICH^a^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

Corresponding author: burov@bsu.by

Based on the earlier developed approach, a study of the spontaneous emission effect (β factor) on polarization switching has been performed to describe the formation of polarized radiation in surface-emitting semiconductor lasers (VCSEL). As shown by the results of simulation, a good agreement with the experimental data is observed in the range $\beta \sim 10^{-5}$ – 10^{-6} . In this case one can neglect possible β deviations when the injection current variations occur.

Key words: polarization switching; surface-emitting lasers; induced dichroism of amplification; spontaneous emission factor.

Введение

В работе [1] проведена детализация общего феноменологического подхода [2; 3] к описанию формирования поляризованного излучения в поверхностно излучающих полупроводниковых лазерах. Суть этого подхода (метод поляризационных компонент – МПК) заключается в том, что формирование поляризованного излучения рассматривается как процесс последовательного усиления исходного спонтанного излучения в условиях, когда разность коэффициентов усиления и потерь обладает ориентационной анизотропией. Для обычных торцевых полупроводниковых лазеров степень такой анизотропии достаточно велика, и в процессе формирования излучения идет параллельное нарастание интенсивности и степени поляризации, при котором они примерно за одинаковое время (которое значительно меньше времени жизни фотона в резонаторе) достигают стационарных значений, причем для степени поляризации это обычно предельное значение ± 1 . У поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров (VCSEL) степень ориентационной анизотропии разности коэффициентов усиления и потерь (наведенный дихроизм усиления [1]) значительно меньше, поэтому скорости нарастания интенсивности и степени поляризации становятся существенно различными [1]. Время выхода на стационарное значение суммарной интенсивности для VCSEL практически такое же, как и для торцевых лазеров, и определяется в основном используемой гетероструктурой. Для степени поляризации скорость нарастания пропорциональна наведенному дихроизму усиления [1], т. е. значительно ниже. Другими словами, эволюция излучения в резонаторе VCSEL происходит следующим образом: излучение быстро достигает стационарных значений интенсивности при достаточно низкой степени поляризации и дальнейшая эволюция излучения идет за счет перераспределения интенсивности между поляризационными компонентами при сохранении значений суммарной интенсивности и медленном росте степени поляризации. Если за время жизни фотона в резонаторе излучение не успевает достигнуть предельных значений степени поляризации, то оно остается частично поляризованным. А поскольку величина наведенного дихроизма усиления зависит от плотности инжекционного тока [1], то при его последовательном изменении формируется область достаточно резкого изменения поляризации при почти неизменном значении суммарной интенсивности, что и имеет место в области поляризационного переключения (ПП), – область значений плотности тока инжекции, в пределах которой происходит переход от состояния с одним предельным значением степени поляризации к ортогональному (обычно говорят о переключении с одной поляризационной моды на другую). Если же плотность инжекционного тока изменяется достаточно быстро, то временным ограничителем становится уже не время жизни фотона в резонаторе, а характеристическое время изменения тока.

Таким образом, процесс ПП в VCSEL в рамках МПК интерпретируется не как результат конкуренции двух ортогонально-поляризованных волн, что является практически общепринятым в рамках существующих подходов [4; 5], а как процесс последовательного преобразования от одного предельного состояния поляризации к ортогональному через цепочку частично поляризованных состояний, что есть следствие изменения знака наведенного дихроизма усиления при изменении инжекционного тока.

Суть детализации МПК сводилась [1] к удачному определению феноменологически введенной зависимости наведенного дихроизма усиления от плотности инжекционного тока, которое позволило описать, например, эффект динамического смещения точки ПП в случае изменения скорости нарастания тока. Однако с точки зрения детализации МПК есть еще один параметр, которому уделяется недостаточное внимание. Речь идет о параметре β , определяющем относительный вклад спонтанного излучения

в моду генерации. Для МПК значение этого параметра играет принципиально важную роль, поскольку в рамках этого метода спонтанное излучение выступает именно в роли источника, который и запускает процесс последовательного усиления излучения.

Однако определение этой величины для VCSEL имеет несколько запутанную историю, не имеющую в настоящее время однозначного разрешения. Уже первые измерения β дали широкий разброс значений – от $7,3 \cdot 10^{-2}$ [6] до $1,1 \cdot 10^{-4}$ отн. ед. [7]. В какой-то степени этот разброс можно связать с различием параметров (например, апертуры) лазеров, но не на полтора порядка. С одной стороны, теоретические оценки параметра β , в соответствии с общей теорией полупроводниковых лазеров, также дают широкий спектр значений. С другой – этот параметр фигурирует в теоретических моделях, построенных на основе скоростных уравнений, однако в таких моделях величина β рассматривается в области 10^{-5} отн. ед. [8].

Далее, при исследовании эффектов ПП в VCSEL интерес к величине β значительно спадает, поскольку очень широкое распространение получает SFM (spin flip model) подход [9–10], при котором этот параметр просто отсутствует (β появляется в SFM только после перехода к статистическим моделям, где основным источником шумов рассматриваются флуктуации спонтанного излучения [11]). Однако, как показали результаты [12], величина β влияет на ширину области ПП.

До настоящего времени в литературе нет четкого критерия выбора значения β для VCSEL, однако при численном моделировании используются чаще всего значения в диапазоне 10^{-5} – 10^{-6} отн. ед., при этом многие авторы ссылаются на [13]. Это является достаточно странным, поскольку в данной работе не содержатся критерии, которые позволяли бы однозначно определиться с величиной параметра β . В то же время значения β , используемые при численном моделировании процессов в VCSEL, значительно ниже значений, полученных либо экспериментальным путем, либо из общей теории полупроводниковых лазеров. И хотя некоторые предположения на этот счет высказываются [14], определенного мнения до сих пор так и не выработано.

В настоящей работе β использован в качестве подгоночного параметра при моделировании широкого круга эффектов в области поляризационной неустойчивости, чтобы на основе сопоставления полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными получить достаточно надежное ограничение области определения этого параметра.

Теоретическая модель

Исходная теоретическая модель базируется на использовании МПК в той форме, как это сформулировано в работе [1], т. е. уравнения для эволюции интенсивности поляризационной компоненты $I(\psi)$ и концентрации неравновесных носителей заряда N можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{dI(\psi)}{dt} &= v(k_{\text{amp}}(\psi) - k_{\text{los}}(\psi))I(\psi) + \beta \frac{hv^2}{\lambda} \frac{N}{\tau_N N_k}, \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{j}{ed} - \frac{v}{h\lambda} \int (k_{\text{amp}}(\psi) - k_{\text{los}}(\psi))I(\psi) d\psi - \frac{N}{\tau_N}, \end{aligned} \quad (1)$$

где разность коэффициентов усиления $k_{\text{amp}}(\psi)$ и потерь $k_{\text{los}}(\psi)$ определялась как $k_{\text{amp}}(\psi) - k_{\text{los}}(\psi) =$

$$= g_0(N - N_{\text{tr}}) \left(1 + k_0 \left(\frac{j}{j_{\text{ps}}} - 1 \right) \cos 2\psi \right) - \rho \quad [1]; \quad g_0(N - N_{\text{tr}}) - \text{стандартное выражение для коэффициента}$$

усиления полупроводниковых инжекционных лазеров [15]; N_{tr} – концентрация прозрачности; j_{ps} – значение плотности инжекционного тока, соответствующего ПП; k_0 – безразмерный параметр, определяющий скорость изменения степени анизотропии коэффициента усиления [1]; ρ – коэффициент изотропных потерь; v – скорость света в активной среде; j – плотность тока инжекции; e – заряд электрона; d – толщина активного слоя; τ_N – время жизни носителей в активном слое; λ – длина волны излучения; β – определяет вклад спонтанного излучения в моду генерации; N_k – количество поляризационных компонент, на которое разбивается излучение в пределах от 0 до π .

Дальнейший анализ строится на решении уравнений (1) при вариации параметра β . Однако относительно самого этого параметра необходимо сделать некоторые пояснения. Обычно β определяется [15] как относительный вклад спонтанного излучения в моду генерации. В нашем случае β означает вклад спонтанного излучения в отдельную поляризационную компоненту. Однако вследствие аксиальной симметрии VCSEL спонтанное излучение является неполяризованным [4], поэтому его вклад в любую

из поляризационных компонент должен быть одинаков и равен относительному полному вкладу в моду генерации в целом. Другими словами, величина β , определяемая в МПК, в точности соответствует его классическому смыслу.

В соответствии с общей теорией полупроводниковых лазеров [15] параметр β не является постоянной величиной и достаточно строго определяется лишь в пороге генерации, а за пределами пороговых величин инжекционного тока может изменять свое значение. Например, согласно данным [16] значения β зависят от концентрации N и могут меняться почти в два раза в области ниже порога генерации. В области выше порога генерации значение N меняется слабо [15], однако нельзя исключить, что могут сказываться другие факторы. Для полноты картины анализа влияния параметра β на поляризационные характеристики VCSEL в области поляризационной неустойчивости рассмотрим также возможность изменения этого параметра с ростом величины инжекционного тока, аппроксимируя ее линейной функцией вида

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \left[\frac{j}{j_{th}} - 1 \right], \quad (2)$$

где β_0 определяется при пороговом значении плотности тока j_{th} ; коэффициент β_1 может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Решения уравнений (1) проводились в соответствии с процедурой и при численных значениях материальных параметров, использованных в работе [1].

Результаты численного моделирования

Расчеты показывают, что наличие спонтанного излучения как источника процесса усиления излучения снижает влияние наведенного дихроизма усиления. Например, рост вклада спонтанного излучения в моду генерации приводит к быстрому снижению времени выхода степени поляризации P на стационарное значение τ_c (рис. 1). В частности, для $k_0 = 0,01$ отн. ед. (согласно [1] – это типичное значение для VCSEL) зависимость τ_c от плотности инжекционного тока j быстро нивелируется и при $\beta \geq 10^{-4}$ отн. ед. (см. рис. 1, 3) практически полностью исчезает. Необходимо подчеркнуть, что наблюдаемый эффект сильно зависит от величины k_0 и с ее уменьшением максимальное значение τ_c возрастает.

С ростом β снижается и стационарное значение степени поляризации в области ПП, а сама область ПП расширяется (рис. 2). Характерно, что при достаточно больших значениях $\beta \geq 10^{-4}$ отн. ед. и относительно невысоком значении плотности тока ПП ($j_{ps} \sim 1,5j_{th}$) степень поляризации может не достигать предельных значений в области $j < j_{ps}$ (см. рис. 2, 2).

Похожий вид зависимости $P(j)$ можно получить, например, при $\beta = 10^{-6}$ отн. ед. и $k_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ отн. ед., т. е. рост величины β эквивалентен снижению величины наведенного дихроизма усиления. Характерным является тот факт, что положение точки ПП практически не зависит от значений β и k_0 . Следует отметить, что авторам неизвестны надежные экспериментальные данные, которые бы соответствовали таким зависимостям.

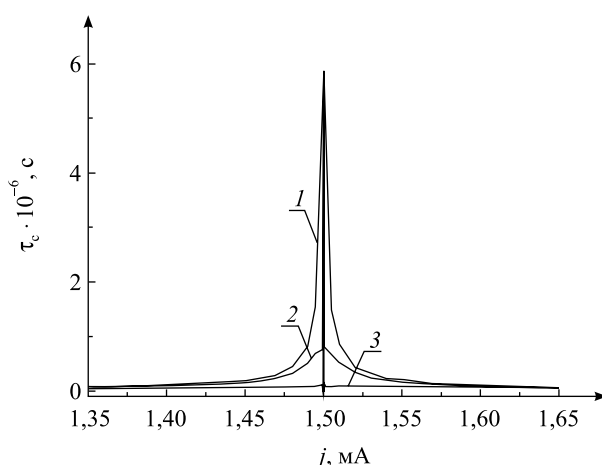


Рис. 1. Зависимость времени выхода на стационарные значения степени поляризации τ_c от плотности инжекционного тока j : $\beta = 10^{-6}$ отн. ед. (1), $\beta = 10^{-5}$ отн. ед. (2), $\beta = 10^{-4}$ отн. ед. (3); $k_0 = 0,01$ отн. ед.

Fig. 1. Dependence of the delay time of the steady polarization value on injection current j : $\beta = 10^{-6}$ a. u. (1), $\beta = 10^{-5}$ a. u. (2), $\beta = 10^{-4}$ a. u. (3); $k_0 = 0.01$ a. u.

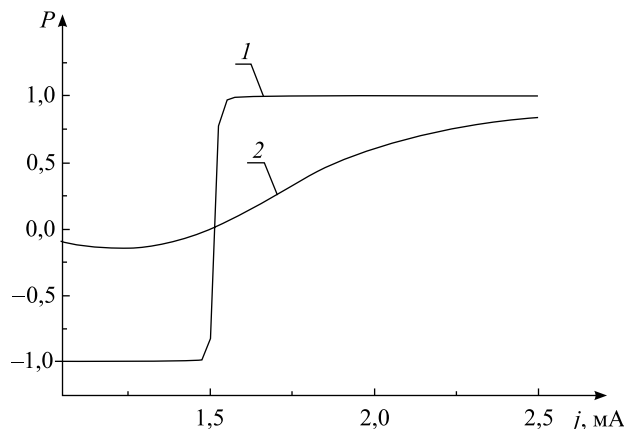


Рис. 2. Зависимость степени поляризации (P) выходного излучения VCSEL от значения плотности инжекционного тока j : $\beta = 10^{-6}$ отн. ед. (1), $\beta = 10^{-3}$ отн. ед. (2); $k_0 = 0,01$ отн. ед.

Fig. 2. Dependence of the VCSEL output polarization (P) on injection current j : $\beta = 10^{-6}$ a. u. (1), $\beta = 10^{-3}$ a. u. (2); $k_0 = 0.01$ a. u.

Эффект конкуренции наведенного дихроизма усиления и вклада спонтанного излучения хорошо согласуется с механизмом формирования поляризованного излучения, описываемого в рамках МПК (кратко изложен в начале статьи). Выход интенсивности генерации на стационарный уровень означает, что дальнейшее изменение степени поляризации может происходить вследствие перераспределения интенсивности между поляризационными модами за счет наведенного дихроизма. Однако при возрастании вклада спонтанного излучения растет неполяризованная составляющая выходного излучения, а эффективность перераспределения интенсивности падает, снижая величину дихроизма усиления. Этот же эффект конкуренции наведенного дихроизма усиления и вклада спонтанного излучения проявляется и в динамике (рис. 3), где хорошо наблюдается сглаживание зависимости $P(j)$ с ростом β . Следует сказать, что в работе [1] отмечен эффект смещения точки ПП с ростом скорости нарастания тока. Увеличение вклада спонтанного излучения приводит к обратному эффекту (см. рис. 3, б), практически возвращая эту точку в положение, соответствующее стационарному случаю.

Наконец, были проведены расчеты для случая зависимости $\beta(j)$, описываемой выражением (2). При стационарном изменении зависимости $P(j)$ относительно невелики даже в случае anomalно больших значений β_0 и β_1 , что иллюстрируют кривые (1, 2, 3), приведенные на рис. 4.

Существенно больший эффект может быть достигнут в динамике, да и то лишь при anomalно большом значении β (рис. 5).

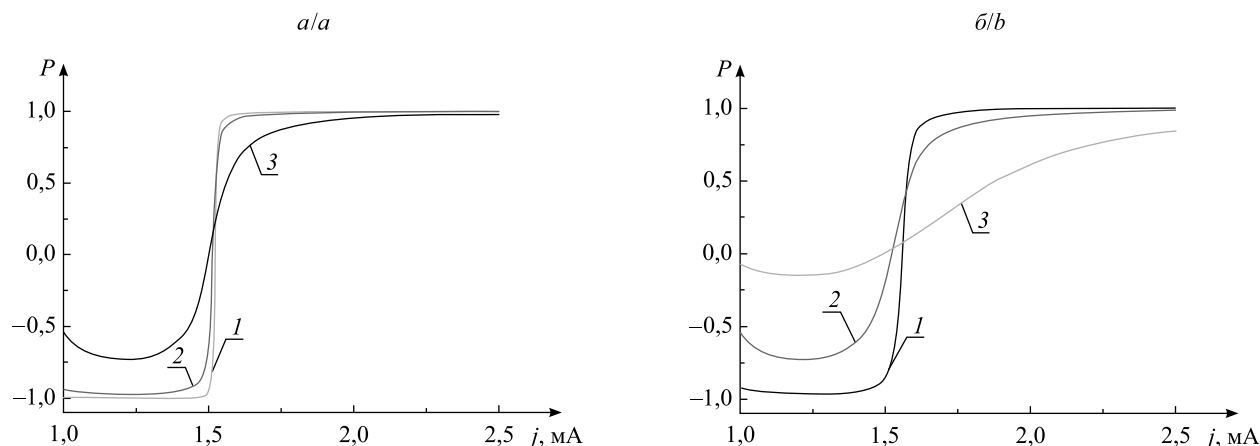


Рис. 3. Зависимость $P(j)$ при линейном нарастании тока. Время нарастания от 0 до 4 мА составляет 10^{-4} с: $\beta = 10^{-6}$ отн. ед. (1), $\beta = 10^{-5}$ отн. ед. (2), $\beta = 10^{-4}$ отн. ед. (3); $k_0 = 0,01$ отн. ед. (а); $k_0 = 0,001$ отн. ед. (б)

Fig. 3. Dependence of the $P(j)$ under current linear increasing. Increasing time from 0 to 4 mA is 10^{-4} s: $\beta = 10^{-6}$ a. u. (1), $\beta = 10^{-5}$ a. u. (2), $\beta = 10^{-4}$ a. u. (3); $k_0 = 0.01$ a. u. (a); $k_0 = 0.001$ a. u. (b)

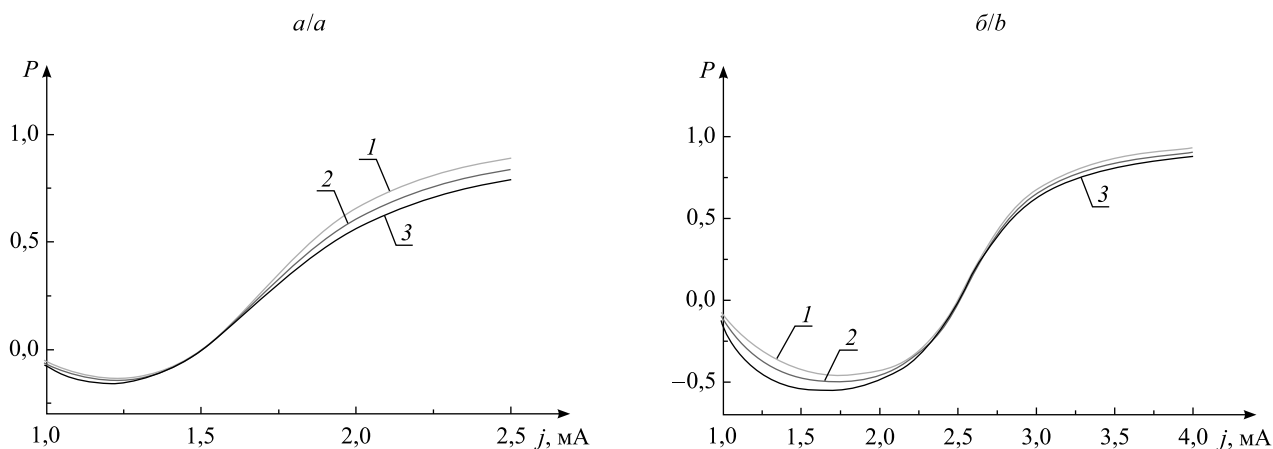


Рис. 4. Зависимость $P(j)$ для наличия $\beta(j)$: $j_{ps} = 1,5$ мА (а); $j_{ps} = 2,5$ мА (б);
 $\beta_1 = -0,5\beta_0$ отн. ед. (1), $\beta_1 = 0$ отн. ед. (2), $\beta_1 = 0,5\beta_0$ отн. ед. (3), $\beta_0 = 10^{-3}$ отн. ед.
 Fig. 4. Dependence of the $P(j)$ under appearance $\beta(j)$: $j_{ps} = 1.5$ мА (а); $j_{ps} = 2.5$ мА (б);
 $\beta_1 = -0.5\beta_0$ а. у. (1), $\beta_1 = 0$ а. у. (2), $\beta_1 = 0.5\beta_0$ а. у. (3), $\beta_0 = 10^{-3}$ а. у.

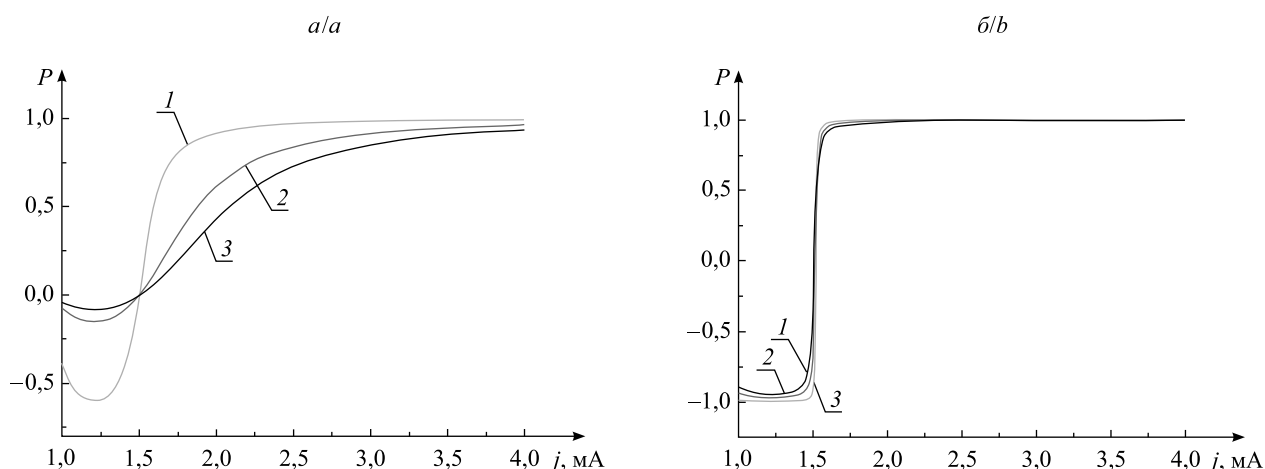


Рис. 5. Зависимость $P(j)$ при линейном нарастании тока.
 Время нарастания от 0 до 4 мА составляет 10^{-4} с: $\beta_0 = 10^{-3}$ отн. ед. (а),
 $\beta_0 = 10^{-6}$ отн. ед. (б), $\beta_1 = -0,5\beta_0$ отн. ед. (1), $\beta_1 = 0$ отн. ед. (2), $\beta_1 = 0,5\beta_0$ отн. ед. (3)
 Fig. 5. Dependence of the $P(j)$ under current linear increasing.
 Increasing time from 0 to 4 мА is 10^{-4} s: $\beta_0 = 10^{-3}$ а. у. (а),
 $\beta_0 = 10^{-6}$ а. у. (б), $\beta_1 = -0.5\beta_0$ а. у. (1), $\beta_1 = 0$ а. у. (2), $\beta_1 = 0.5\beta_0$ а. у. (3)

Зависимость параметра β от инжекционного тока может иметь значение только при достаточно высоких величинах самого параметра при быстром изменении тока, т. е. в режимах, например, высокочастотной модуляции. А для стационарных или квазистационарных режимов величину β можно считать постоянной для всего диапазона изменения инжекционного тока.

Заключение

Сопоставление полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными позволяет заключить, что вклад спонтанного излучения в моду генерации VCSEL является малым (во всяком случае, в области поляризационной неустойчивости), так что значения параметра β должны лежать в пределах 10^{-5} – 10^{-6} отн. ед. Более точно эти значения нужно связывать с конкретной структурой излучателя, способом его производства и режимами эксплуатации. С учетом полученной оценки величины параметра β его возможной зависимостью от режимов эксплуатации лазера можно пренебречь.

Библиографические ссылки

1. Буров Л. И., Горбачевич А. С., Лобаевич П. М. Наведенный дихроизм усиления в поверхностно излучающих полупроводниковых лазерах // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 3. С. 63–70.
2. Джадан М., Буров Л. И., Горбачевич А. С. и др. Переключение поляризации излучения в одномодовом инжекционном полупроводниковом лазере // Журн. прикл. спектроскопии. 2009. Т. 76, № 5. С. 717–724.
3. Джадан М., Буров Л. И., Горбачевич А. С. и др. Динамика переключения поляризации излучения в одномодовом инжекционном полупроводниковом лазере // Журн. прикл. спектроскопии. 2010. Т. 77, № 1. С. 74–81.
4. Panajotov K., Prati F. Polarization Dynamics of VCSELs, VCSELs // Springer Ser. Opt. Sci. 2013. Vol. 166. P. 181–231.
5. Kawaguchi H. Recent progress in polarization-bistable VCSELs and their applications to all-optical signal processing // Adv. Lasers. 2015. P. 1–17.
6. Kuksenkov D. V., Temkin H., Lear K. L., et al. Spontaneous emission factor in oxide confined vertical-cavity lasers // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70, № 1. P. 13–15.
7. Zhao Y. G., McInerney J. G., Morgan R. A. Measurements of spontaneous emission factor for vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers // IEEE Photon. Technol. Lett. 1995. Vol. 7, № 11. P. 1231–1233.
8. Mueller R., Klehr A., Valle A., et al. Effects of spatial hole burning on polarization dynamics in edge-emitting and vertical-cavity surface-emitting laser diodes // Semicond. Sci. Technol. 1996. Vol. 11. P. 587–596.
9. San Miguel M., Feng Q., Moloney J. V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 52, № 2. P. 1728–1739.
10. Martin-Regalado J., Prati F., San Miguel M., et al. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1997. Vol. 33, issue 5. P. 765–783.
11. Alharthi S. S., Hurtado A., Al Seyab R. K., et al. Control of emitted light polarization in a 1310 nm dilute nitride spin-vertical cavity surface emitting laser subjected to circularly polarized optical injection // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105, issue 18. P. 181106.
12. Danckaert J., Nagler B., Albert J., et al. Minimal rate equations describing polarization switching in vertical-cavity surface-emitting lasers // Opt. Commun. 2002. Vol. 201, issue 1. P. 129–137.
13. Valle A., Sciamanna M., Panajotov K. Irregular pulsating polarization dynamics in gain-switched vertical-cavity surface-emitting lasers // IEEE J. Quantum Electron. 2008. Vol. 44, issue 2. P. 136–143.
14. Khurgin J. B., Sun G. Comparative analysis of spasers, vertical-cavity surface-emitting lasers and surface-plasmonemitting diodes // Nat. Photonics. 2014. Vol. 8, issue 3. P. 468–473.
15. Coldren L. A., Corzine S. W. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. New York, 1995.
16. Ramoo D. H., Adams M. J. Carrier dependence of the spontaneous emission factor in DBR lasers // Opt. Commun. 2000. Vol. 180. P. 345–348.

References

1. Burov L. I., Gorbachevich A. S., Lobachevich P. M. The induced amplification dichroism in surface-emitting semiconductor lasers. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 3. P. 63–70 (in Russ.).
2. Dzhadan M., Burov L. I., Gorbachevich A. S., et al. [Polarization switching in single-mode injection semiconductor laser]. *J. Appl. Spectrosc.* 2009. Vol. 76, No. 5. P. 717–724 (in Russ.).
3. Dzhadan M., Burov L. I., Gorbachevich A. S., et al. [Dynamics of polarization switching in single-mode injection semiconductor laser]. *J. Appl. Spectrosc.* 2010. Vol. 77, No. 1. P. 74–81 (in Russ.).
4. Panajotov K., Prati F. Polarization Dynamics of VCSELs, VCSELs. *Springer Ser. Opt. Sci.* 2013. Vol. 166. P. 181–231.
5. Kawaguchi H. Recent progress in polarization-bistable VCSELs and their applications to all-optical signal processing. *Adv. Lasers.* 2015. P. 1–17.
6. Kuksenkov D. V., Temkin H., Lear K. L., et al. Spontaneous emission factor in oxide confined vertical-cavity lasers. *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 70, No. 1. P. 13–15. DOI: 10.1063/1.119288.
7. Zhao Y. G., McInerney J. G., Morgan R. A. Measurements of spontaneous emission factor for vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1995. Vol. 7, No. 11. P. 1231–1233. DOI: 10.1109/68.473455.
8. Mueller R., Klehr A., Valle A., et al. Effects of spatial hole burning on polarization dynamics in edge-emitting and vertical-cavity surface-emitting laser diodes. *Semicond. Sci. Technol.* 1996. Vol. 11. P. 587–596.
9. San Miguel M., Feng Q., Moloney J. V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers. *Phys. Rev. A.* 1995. Vol. 52, No. 2. P. 1728–1739. DOI: 10.1103/PhysRevA.52.1728.
10. Martin-Regalado J., Prati F., San Miguel M., et al. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* 1997. Vol. 33, issue 5. P. 765–783. DOI: 10.1109/3.572151.
11. Alharthi S. S., Hurtado A., Al Seyab R. K., et al. Control of emitted light polarization in a 1310 nm dilute nitride spin-vertical cavity surface emitting laser subjected to circularly polarized optical injection. *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 105, issue 18. P. 181106. DOI: 10.1063/1.4901192.
12. Danckaert J., Nagler B., Albert J., et al. Minimal rate equations describing polarization switching in vertical-cavity surface-emitting lasers. *Opt. Commun.* 2002. Vol. 201, issue 1. P. 129–137. DOI: 10.1016/S0030-4018(01)01668-6.
13. Valle A., Sciamanna M., Panajotov K. Irregular pulsating polarization dynamics in gain-switched vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* 2008. Vol. 44, issue 2. P. 136–143. DOI: 10.1109/JQE.2007.910707.
14. Khurgin J. B., Sun G. Comparative analysis of spasers, vertical-cavity surface-emitting lasers and surface-plasmonemitting diodes. *Nat. Photonics.* 2014. Vol. 8, issue 3. P. 468–473. DOI: 10.1038/nphoton.2014.94.
15. Coldren L. A., Corzine S. W. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. New York, 1995.
16. Ramoo D. H., Adams M. J. Carrier dependence of the spontaneous emission factor in DBR lasers. *Opt. Commun.* 2000. Vol. 180. P. 345–348. DOI: 10.1016/S0030-4018(00)00739-2.

Статья поступила в редакцию 08.12.2016.
Received by editorial board 08.12.2016.