

## Особенности одновременной генерации через основное и возбужденное состояния в лазерах на квантовых точках

© А.Е. Жуков\*<sup>+</sup>, М.В. Максимов\*<sup>+</sup>, Ю.М. Шерняков\*<sup>+</sup>, Д.А. Лившиц\*,  
А.В. Савельев\*<sup>+</sup>, Ф.И. Зубов\*, В.В. Клименко\*

\* Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий  
Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

• Innolume GmbH,  
44263 Дортмунд, Германия

<sup>+</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 6 июля 2011 г. Принята к печати 11 июля 2011 г.)

Исследованы спектры генерации и ватт-амперные характеристики лазера на основе квантовых точек InAs/InGaAs, излучающего в режиме одновременной генерации на основном и возбужденном оптических переходах, а также проведено сопоставление спектров лазерной генерации и спонтанного излучения. Показано, что гашение генерации на основном переходе наблюдается и в отсутствие саморазогрева активной области, а также при отсутствии возрастания однородного уширения с ростом плотности тока. Обнаружено, что спад интенсивностей как лазерной генерации, так и спонтанного излучения, происходящих на основном переходе, начинается при накачке, заметно превышающей порог двухуровневой генерации. Также обнаружено, что в лазерную генерацию на основном и первом возбужденном оптических переходах вовлечены разные группы квантовых точек.

### 1. Введение

В лазерах на основе самоорганизующихся квантовых точек (КТ) лазерная генерация на длине волны основного оптического перехода может происходить лишь при условии, что оптические потери не превосходят насыщенное усиление. Однако, даже если это условие выполнено, при достаточно больших токах накачки в спектрах генерации возникает дополнительная, более коротковолновая линия, спектральное положение которой соответствует первому возбужденному оптическому переходу [1,2]. Подобная двухуровневая генерация была приписана медленному захвату носителей заряда с первого возбужденного на основное состояние. Это приводит к постепенному увеличению концентрации носителей, находящихся на возбужденном состоянии КТ, сопровождающемуся возрастанием усиления на возбужденном оптическом переходе вплоть до достижения порогового условия.

На основе анализа скоростных уравнений (rate equations) [1–3], а также управляющих уравнений (master equations) [4] был сделан вывод, что оптическая мощность, излучаемая на основном оптическом переходе, достигает своего максимального значения на пороге двухуровневой генерации, после чего перестает меняться с ростом накачки. Однако в ряде работ сообщалось, что после возникновения генерации на возбужденном переходе наблюдается более или менее сильное снижение мощности лазера, излучаемой на длине волны

основного перехода как при непрерывной, так и при импульсной накачке [2,5–7]. В то же время в работе [8] отмечалось, что в импульсном режиме накачки мощность излучения основного состояния остается стабильной. В качестве возможных причин гашения лазерной мощности основного оптического перехода были названы увеличение температуры активной области лазера (саморазогрев) [5,9], а также увеличение однородного уширения с ростом накачки [7]. Кроме того, в работе [6] гашение лазерной генерации основного состояния было связано с асимметрией электронно-дырочного теплового распределения.

В данной работе на основе анализа спектров лазерной генерации показано, что ни одна из указанных моделей не может адекватно объяснить все обнаруженные особенности поведения лазеров на квантовых точках в режиме совместного излучения через основной и возбужденный оптический переходы: гашение лазерной генерации основного перехода при стабильной температуре активной области и отсутствии возрастания однородного уширения, участие разных групп точек в генерации на основном и возбужденном оптических переходах, достижение наибольшей интенсивности генерации на основном переходе далеко за порогом двухуровневой генерации.

### 2. Эксперимент

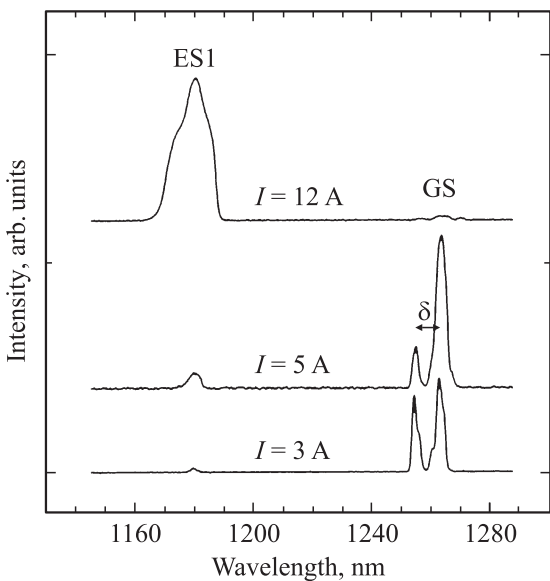
Лазерная структура, исследованная в настоящей работе, была выращена методом молекулярно-пучковой

† E-mail: zhukov@beam.ioffe.ru

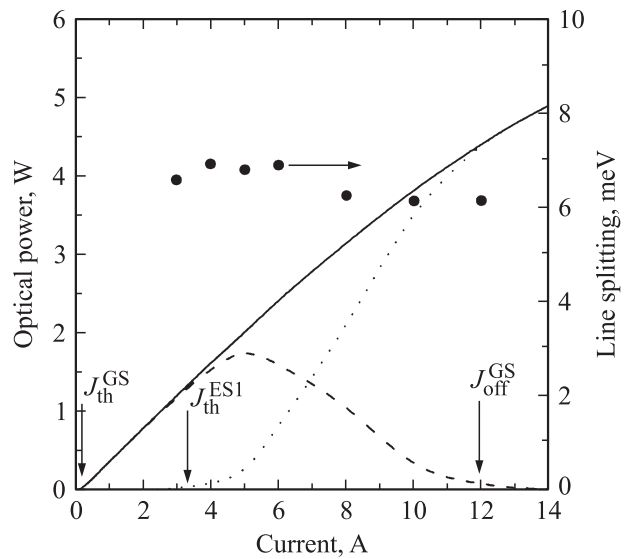
эпитаксии на подложке GaAs(100) *n*-типа. Так как уменьшение числа КТ способствует возникновению лазерной генерации на возбужденном оптическом переходе, активная область содержала один ряд КТ InAs/InGaAs. Исследовались лазерные диоды двух типов — полосковой конструкции с длиной резонатора 4 мм и шириной 100 мкм, а также лазер с четырьмя сколотыми гранями размером 362 × 375 мкм. Лазерные диоды напайвались на теплоотвод *p*-стороной вниз. Если не указано иное, то экспериментальные результаты получены при температуре теплоотвода 17°C. Исследования проводились при импульсной накачке с длительностью импульсов 300 нс и частотой 2 кГц.

### 3. Лазер полосковой конструкции

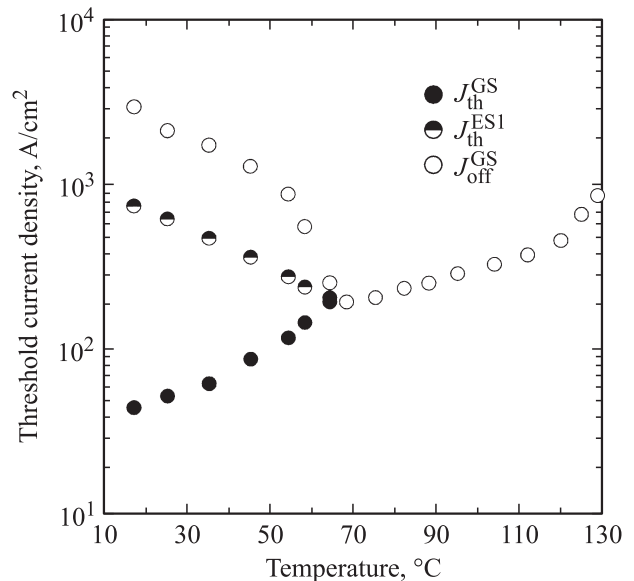
На рис. 1 представлены спектры излучения лазера полосковой конструкции, измеренные при различных токах накачки. Лазерная генерация возникает на основном оптическом переходе с длиной волны около 1.26 мкм при пороговой плотности тока ( $J_{th}^{GS}$ ), равной 45 А/см<sup>2</sup> (0.18 А). При увеличении накачки до 750 А/см<sup>2</sup> (3.0 А) — порога двухуровневой генерации ( $J_{th}^{ES1}$ ) — в спектре появляется дополнительная полоса вблизи длины волны 1.18 мкм, связанная с оптическими переходами через первое возбужденное состояние. На рис. 2 показана зависимость от тока накачки полной мощности, излучаемой лазером, а также мощности спектральных компонент, соответствующих основному и первому возбужденному оптическим переходам. Доля мощности, соответствующей генерации на основном (первом воз-



**Рис. 1.** Спектры генерации лазера полосковой конструкции при различном токе (обозначен на рисунке). GS (ES1) соответствует полосе генерации на основном (первом возбужденном) оптическом переходе. Расщепление полосы основного оптического перехода обозначено  $\delta$ .



**Рис. 2.** Оптическая мощность (сплошная линия — полная мощность, штриховая — мощность полосы генерации основного оптического перехода, пунктирная — мощность полосы генерации первого возбужденного оптического перехода), а также спектральное расщепление полосы генерации основного оптического перехода (точки) в зависимости от тока накачки лазера полосковой конструкции.



**Рис. 3.** Температурные зависимости плотности тока лазера полосковой конструкции, соответствующей началу генерации на основном оптическом переходе ( $J_{th}^{GS}$ ), началу двухуровневой генерации ( $J_{th}^{ES1}$ ) и гашению генерации на основном оптическом переходе ( $J_{off}^{GS}$ ).

бужденном) переходе, определялась с помощью интегрирования спектра излучения в пределах 1215–1280 нм (1150–1215 нм соответственно).

При дальнейшем увеличении накачки свыше  $J_{th}^{ES1}$  имеет место одновременная генерация через два оп-

тических перехода. Интенсивность полосы генерации, соответствующей основному оптическому переходу, достигает максимума при плотности тока  $1.25 \text{ кА/см}^2$  (5 А), после чего снижается вплоть до полного гашения при плотности тока  $J_{\text{off}}^{\text{GS}}$ , равной  $3 \text{ кА/см}^2$  (12 А). При дальнейшем увеличении накачки свыше  $J_{\text{off}}^{\text{GS}}$  в спектрах присутствует только полоса, соответствующая генерации на первом возбужденном переходе. Таким образом, вопреки сообщению [8], гашение лазерной генерации на основном переходе наблюдается и при импульсной накачке лазера. Также следует отметить, что вопреки теоретическим предсказаниям наибольшее значение интенсивности полосы генерации основного перехода достигает при накачке, заметно превышающей порог двухуровневой генерации  $J_{\text{th}}^{\text{ES1}}$ .

На рис. 3 показана зависимость плотностей пороговых токов лазера полосковой конструкции от температуры теплоотвода. При увеличении температуры происходит возрастание  $J_{\text{th}}^{\text{GS}}$ , в то время как  $J_{\text{th}}^{\text{ES1}}$  и  $J_{\text{off}}^{\text{GS}}$  снижаются, так что диапазон токов, в котором наблюдается генерация только на основном переходе, сужается с ростом температуры. При  $68^\circ\text{C}$  и более высоких температурах лазерная генерация на основном переходе не наблюдается, а изначально возникает на первом возбужденном оптическом переходе.

Если причиной гашения генерации на основном переходе с ростом тока является саморазогрев, как это предполагалось в [5,9], то он должен также проявляться в постепенном увеличении длины волны лазерной генерации с током. Из спектров, приведенных на рис. 1, можно видеть, что увеличение тока накачки от 5 (максимальная интенсивность полосы основного перехода) до 12 А (гашение полосы основного перехода) приводит к сдвигу доминирующего пика полосы основного оптического перехода от 1262.9 до 1263.3 нм. Таким образом, длинноволновый сдвиг линии составил всего 0.4 нм, что соответствует увеличению температуры активной области приблизительно на  $1^\circ\text{C}$ . Учитывая, что для полного подавления генерации на основном переходе требуется увеличение температуры по крайней мере до  $68^\circ\text{C}$ , можно заключить, что саморазогрев не может являться причиной гашения лазерной генерации на основном переходе.

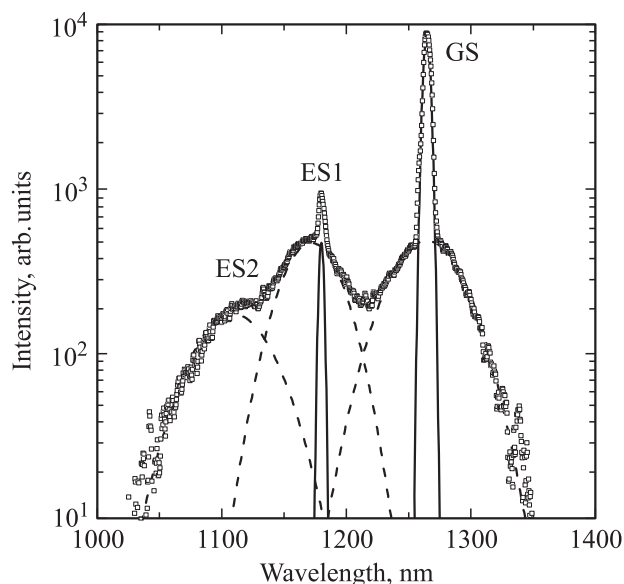
В работе [7] было сделано предположение, что за гашение лазерной генерации на основном оптическом переходе может быть ответственно увеличение однородного уширения с ростом тока, приводящее к снижению оптического усиления ниже порогового уровня. В своих расчетах авторы полагали, что однородное уширение возрастает от 5 до 20 мЭВ при росте плотности тока от 140 до  $700 \text{ А/см}^2$ . Согласно цитированной работе, однородное уширение может быть оценено по величине расщепления спектра лазерной генерации в пределах полосы основного оптического перехода (на рис. 1 обозначено символом  $\delta$ ). Спектральное расщепление, экспериментально определенное в настоящей работе,

слабо убывает от 6.9 до 6.1 мЭВ с ростом накачки, изменяющейся в широких пределах ( $750\text{--}3000 \text{ А/см}^2$ ). Таким образом, гашение лазерной генерации также не может быть объяснено и увеличением однородного уширения.

#### 4. Лазер с четырьмя сколотыми гранями

Какими бы причинами ни было вызвано увеличение оптического усиления на длине волны возбужденного оптического перехода, приводящее к возникновению двухуровневой генерации, а также снижение оптического усиления на основном переходе, вызывающее последующее гашение генерации, они должны сопровождаться соответствующим изменением концентрации носителей заряда, заселяющих соответствующие уровни квантовых точек. Это в свою очередь должно приводить к изменению интенсивности спонтанного излучения в пределах полос основного и возбужденного оптических переходов в режиме одновременной генерации через основное и возбужденное состояния. Насколько нам известно, подобные исследования ранее не предпринимались.

Нами были изучены спектры электролюминесценции лазерных диодов, имеющих 4 сколотые грани. Так называемые четырехсколотые лазеры характеризуются низкой эффективностью вывода лазерного излучения, в результате чего его интенсивность оказывается сравнимой с интенсивностью спонтанного излучения, позволяя провести прямое сопоставление спектров лазерной генерации и спонтанного излучения.



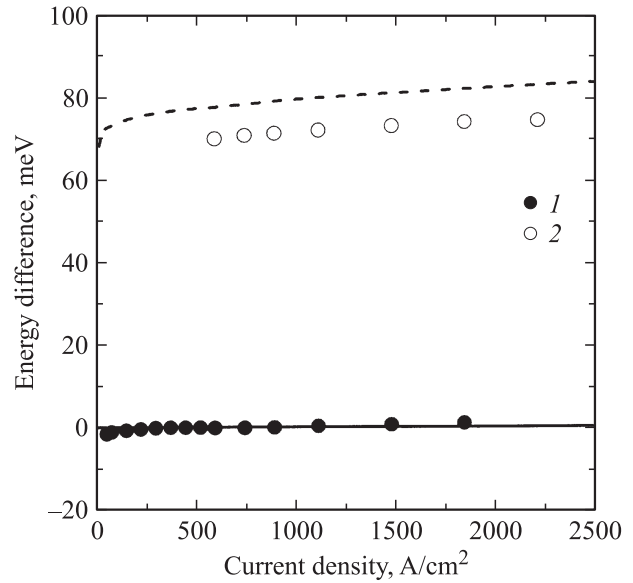
**Рис. 4.** Спектр электролюминесценции четырехсколотого лазера (точки) в режиме двухуровневой генерации и его составляющие, обусловленные спонтанным (штриховые линии) и лазерным (сплошные линии) излучением на основном (GS), первом возбужденном (ES1) и втором возбужденном (ES2) оптических переходах.

На рис. 4 приведен типичный спектр электролюминесценции четырехсколового лазера, записанный при накачке, незначительно превышающей порог двухуровневой генерации. Спектр с высокой точностью может быть представлен совокупностью пяти пиков, описываемых функцией Гаусса. Три из них, имеющие полную ширину на половине высоты около 60 нм, соответствуют спонтанному излучению, возникающему на основном оптическом переходе массива квантовых точек (центральная длина волны около 1.26 мкм), а также на первом возбужденном (около 1.17 мкм) и втором возбужденном (около 1.1 мкм) переходах. Более узкие пики (полная ширина на половине высоты около 4–10 нм в зависимости от уровня накачки), обусловлены лазерной генерацией на основном и первом возбужденном переходах. Как видно, пик полосы генерации, возникающей на основном оптическом переходе (1264.3 нм), практически совпадает с максимумом спонтанного излучения соответствующего оптического перехода (1264.0 нм). В то же время на первом возбужденном оптическом переходе линия генерации (1179.8 нм) заметно сдвинута в длинноволновую сторону относительно максимума спонтанного излучения (1172 нм). Такой же характер спектрального положения пиков лазерной генерации относительно максимумов спонтанного излучения сохраняется и при увеличении плотности тока, как это проиллюстрировано на рис. 5.

Уширение пика спонтанного излучения некоторого оптического перехода связано с разбросом размеров квантовых точек, а положение максимума пика близко к длине волны излучения квантовых точек среднего (наиболее вероятного) размера.

Возникновение пика лазерной генерации основного перехода вблизи максимума спонтанного излучения свидетельствует о том, что в данном типе лазерной генерации преимущественно участвуют носители заряда, локализованные на основном состоянии квантовых точек среднего размера. В то же время более длинноволновое положение пика лазерной генерации на первом возбужденном переходе относительно максимума спонтанного излучения этого перехода позволяет заключить, что в этом случае в лазерную генерацию в основном вовлечены носители заряда, заселяющие первый возбужденный уровень в квантовых точках большего по сравнению со средним размера.

Тот факт, что за генерацию на основном и возбужденном оптическом переходах в режиме двухуровневой генерации ответственны разные группы квантовых точек, насколько нам известно наблюдается экспериментально впервые. Очевидно, что его необходимо принимать во внимание при построении адекватной модели одновременной генерации через основное и возбужденное состояния в лазерах на квантовых точках. В то же время единственная существующая на сегодня модель, в которой в явном виде учитывается неоднородное уширение оптических переходов в квантовых точках, предсказывает возникновение лазерной генерации возбужденного оптического перехода в максимуме спектра

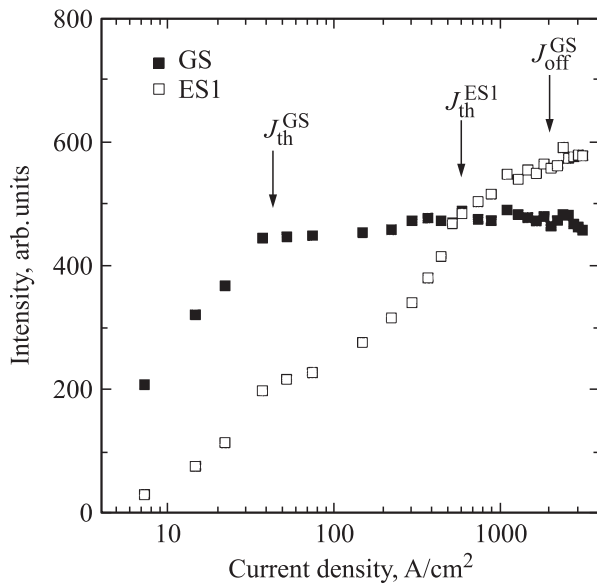


**Рис. 5.** Зависимости от плотности тока накачки четырехсколового лазера положения спектральных максимумов относительно максимума спонтанного излучения основного перехода: 1 — лазерная генерация на основном переходе, 2 — лазерная генерация на первом возбужденном переходе, штриховая линия — спонтанное излучение на первом возбужденном переходе.

спонтанного излучения [7]. В большинстве же моделей, описывающих динамику носителей заряда в квантовых точках, спектральное распределение носителей заряда по неоднородно уширенным квантовым уровням вообще не рассматривается.

Пик генерации на основном оптическом переходе возникает при 17°С в исследованном четырехсколовом лазере при пороговой плотности тока  $J_{th}^{GS}$ , равной 44 А/см<sup>2</sup>, и сохраняется вплоть до  $J_{off}^{GS}$ , приблизительно равной 2 кА/см<sup>2</sup>, тогда как пик генерации на первом возбужденном переходе возникает при плотности тока  $J_{th}^{ES1}$  около 600 А/см<sup>2</sup>. Полученные в четырехсколовом лазере значения  $J_{th}^{GS}$  и  $J_{th}^{ES1}$  хорошо согласуются с соответствующими величинами, измеренными в лазере полосковой конструкции, тогда как  $J_{off}^{GS}$  оказывается несколько меньше. Последнее может быть связано с недостаточной интенсивностью лазерной линии основного состояния в четырехсколовом образце в режиме, близком к гашению генерации, что не позволяет идентифицировать ее на фоне спонтанного излучения.

На рис. 6 показана максимальная интенсивность пиков спонтанного излучения основного и первого возбужденного перехода в зависимости от плотности тока. Интенсивность определялась с помощью подгонки экспериментальных спектров функций Гаусса, как это было показано на рис. 4. Интенсивность спонтанного излучения на первом возбужденном переходе первоначально возрастает с накачкой, причем при возникновении лазерной генерации на основном переходе ( $J_{th}^{GS}$ ), а также на возбужденном переходе ( $J_{th}^{ES1}$ ) наблюдается измене-



**Рис. 6.** Зависимости максимальных интенсивностей спонтанного излучения на основном (GS) и первом возбужденном (ES1) оптических переходах от плотности тока накачки четырехсколового лазера.

ние наклона зависимости. При плотности тока около  $2.4 \text{ кА/см}^2$ , что близко к  $J_{\text{off}}^{\text{GS}}$ , наблюдается насыщение интенсивности, что, вероятно, свидетельствует о дальнейшем постоянстве пиковой концентрации носителей заряда на первом возбужденном состоянии КТ.

Максимальная интенсивность спонтанного излучения на основном оптическом переходе также первоначально возрастает с накачкой. После начала генерации на основном оптическом переходе рост интенсивности сохраняется, хотя и с меньшей скоростью, что указывает на продолжающееся увеличение пиковой концентрации носителей заряда, локализованных на основном состоянии массива КТ. После начала двухуровневой генерации интенсивность остается практически неизменной. Спад интенсивности спонтанного излучения основного перехода начинается при накачке  $\sim 1.1 \text{ кА/см}^2$ , что заметно превышает порог двухуровневой генерации  $J_{\text{th}}^{\text{ES1}}$ . Это хорошо согласуется с тем, что и интенсивность лазерного излучения на основном оптическом переходе начинает снижаться при накачке, превышающей  $J_{\text{th}}^{\text{ES1}}$ , как это было обнаружено в лазере полосковой конструкции. Наблюдаемый при высоких накачках спад максимальной интенсивности спонтанного излучения свидетельствует о постепенном опустошении основного состояния массива КТ.

## 5. Заключение

Таким образом, хотя рост температуры и способствует гашению полосы генерации на основном оптическом переходе в режиме двухуровневой генерации, наблюдаемое с ростом накачки гашение не может быть объяснено

исключительно саморазогревом, поскольку это явление происходит и при стабильной температуре активной области. Сохранение спектрального расщепления полосы лазерной генерации основного перехода неизменным в широком диапазоне плотностей тока свидетельствует, что гашение также не может быть объяснено возрастанием однородного уширения.

Обнаруженный спад (возрастание) максимальной интенсивности спонтанного излучения основного (первого возбужденного соответственно) перехода с ростом тока позволяет предположить, что гашение генерации связано с уменьшением пиковой концентрации носителей на основном состоянии, сопровождающимся увеличением пиковой концентрации носителей на возбужденном состоянии квантовых точек. Подобное поведение согласуется с моделью асимметричного распределения электронов и дырок, согласно которой электроны, находящиеся на сильно разнесенных электронных уровнях размерного квантования, конкурируют за дырки, локализованные на близко расположенных уровнях. Однако данная модель требует дальнейшего развития для адекватного объяснения обнаруженных в данной работе особенностей: достижения наибольшей интенсивности лазерного излучения основного перехода за порогом двухуровневой генерации, а также того факта, что в генерацию на основном и возбужденном оптическом переходах вовлечены разные группы квантовых точек.

Работа выполнена при поддержке РФФИ ОФИ-М, Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, программы Фундаментальных исследований президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, программы Фундаментальных исследований ОНИТ РАН „Фундаментальные проблемы развития эпитаксиальных технологий наноструктур“.

## Список литературы

- [1] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov. *Semicond. Sci. Technol.*, **18** (8), 774 (2003).
- [2] A. Markus, J.X. Chen, O. Gauthier-Lafaye, J.-G. Provost, C. Paranthoën, A. Fiore. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **9** (5), 1308 (2003).
- [3] L. Jiang, L.V. Asryan. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (24), 2611 (2006).
- [4] A. Markus, A. Fiore. *Phys. Status Solidi A*, **201** (2), 338 (2004).
- [5] H.-M. Ji, T. Yang, Y.-L. Cao, P.-F. Xu, Y.-X. Gu, Z.-G. Wang. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49** (7), 072 103 (2010).
- [6] E.A. Viktorov, P. Mandel, Y. Tanguy, J. Houlihan, G. Huyet. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (5), 053 113 (2005).
- [7] M. Sugawara, N. Hatori, H. Ebe, M. Ishida, Y. Arakawa, T. Akiyama, K. Otsubo, Y. Nakata. *J. Appl. Phys.*, **97** (4), 043 523 (2005).
- [8] J. Lee, D. Lee. *J. Korean Phys. Soc.*, **58** (2), 239 (2011).
- [9] Y.J. Kim, Y.K. Joshi, A.G. Fedorov. *J. Appl. Phys.*, **107** (7), 073 104 (2010).

Редактор Т.А. Полянская

## **Peculiarities of simultaneous ground- and excited-state lasing in quantum dot lasers**

*A.E. Zhukov\*<sup>+≠</sup>, M.V. Maximov<sup>+\*</sup>,  
Yu.M. Shernyakov<sup>+\*</sup>, D.A. Livshits<sup>•</sup>,  
A.V. Savelyev<sup>\*≠</sup>, F.I. Zubov<sup>\*</sup>, V.V. Klimenko<sup>\*</sup>*

St. Petersburg Academic University — Nanotechnology  
Research and Education Centre  
of Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
<sup>•</sup> Innolume GmbH,  
44263 Dortmund, Germany  
<sup>≠</sup> St. Petersburg State Polytechnical University,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Lasing spectra and light-current curves are studied in an InAs/InGaAs quantum dot laser operating in regime of simultaneous lasing on ground-state and excited-state optical transitions. A comparison of lasing spectra and spontaneous emission spectra is presented. It is demonstrated that quenching of ground-state lasing is observed even without either self-heating of the active region or increase of homogeneous line broadening at high current densities. It is found that the intensities of the lasing and spontaneous emission start to decrease at a current density well beyond the threshold of two-state lasing. It is also found that different groups of quantum dots are involved in the ground-state and excited-state lasing processes.