

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТИ В МНОГОМОДОВОМ ЛАЗЕРЕ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

С. А. Карусейчик<sup>1\*</sup>, В. Н. Чижевский<sup>1</sup>, W. L. Zhang<sup>2</sup>

УДК 621.375.826

<sup>1</sup> Институт физики НАН Беларуси,  
220072, Минск, Беларусь; e-mail: [sopfykavalenka@gmail.com](mailto:sopfykavalenka@gmail.com)

<sup>2</sup> Университет электронной науки и технологии Китая, Чэнду, Китай

(Поступила 9 октября 2019)

Экспериментально продемонстрировано сосуществование различных пространственных распределений интенсивности генерации в многомодовом лазере с вертикальным резонатором для фиксированных значений постоянного тока. Эти структуры характеризуются различной интегральной интенсивностью, состоянием поляризации и набором длин волн. Показано, что наличие пространственной мультистабильности приводит к появлению мультистабильности в интенсивности генерации и поляризационной мультистабильности. Пространственная мультистабильность характеризуется сильной локальной зависимостью в гистерезисном поведении интенсивности генерации от тока накачки. Исследовано влияние температуры лазерного диода на проявление мультистабильности.

**Ключевые слова:** вертикально-излучающий лазер, мультистабильность, локальные свойства, вибрационный резонанс.

*The coexistence of various spatial distributions of the laser intensity in a multimode VCSEL for fixed DC values has been experimentally demonstrated. These structures are characterized by different integrated intensities, polarization states, and a set of wavelengths. It is shown that the presence of spatial multistability leads to the appearance of multistability in the laser intensity and polarization multistability. The spatial multistability leads to a strong local dependence in the hysteresis behavior of the laser intensity on the pump current. The effect of the temperature of a laser diode on the manifestation of multistability is also investigated.*

**Keywords:** VCSEL, multistability, local properties, vibrational resonance.

**Введение.** Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) широко используются в качестве источников света в оптоэлектронных устройствах, оптических межсоединениях и измерительных системах, в частности, в коммуникационных системах для передачи данных, лазерных принтерах, автодинной интерферометрии, атомных часах, различных схемах в спектроскопии и т. д. (см., например, [1—4] и приведенные там ссылки). ВИЛ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами полупроводниковых лазеров: высоким качеством лазерного луча, работой на одной поперечной и продольной моде, низким порогом генерации и возможностью изготовления двумерных массивов лазерных диодов. Кроме того, они обеспечивают высокую ширину полосы модуляции и относительно дешевы.

Одно из характерных для ВИЛ свойств — наличие поляризационной бистабильности [5, 6] и мультистабильности [7, 8]. Как правило, в одномодовых ВИЛ бистабильность наблюдается при сканировании тока накачки как спонтанные переключения поляризационных состояний, которые во многих случаях сопровождаются явлением гистерезиса и, соответственно, появлением бистабильности. Аналогичное поведение имеет место в многомодовых ВИЛ. Однако при высоких токах накачки наряду с бистабильностью могут одновременно сосуществовать несколько поляризационных состояний [7, 8]. В частности, в работе [7] наблюдались три поляризационных состояния, в [8] — четыре и

---

## EXPERIMENTAL STUDY OF MULTISTABILITY IN A MULTIMODE VERTICAL CAVITY LASER

S. A. Karuseichik<sup>1\*</sup>, V. N. Chizhevsky<sup>1</sup>, W. L. Zhang<sup>2</sup> (<sup>1</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of the Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: [sopfykavalenka@gmail.com](mailto:sopfykavalenka@gmail.com);

<sup>2</sup> University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China)

пять поляризационных состояний. Мультистабильность такого типа наблюдается, как правило, в интенсивности генерации на выделенной поляризации как гистерезисное поведение при последовательном сканировании тока накачки в противоположных направлениях. Следует отметить, что мультистабильность — свойство, характерное для нелинейных динамических систем, широко представленное в различных областях физики, химии, биологии [9], которое означает одновременное существование нескольких аттракторов при одном и том же наборе параметров. Выход на тот или иной аттрактор определяется начальными условиями.

В данной работе представлены результаты комплексного экспериментального исследования мультистабильности в многомодовом ВИЛ. Экспериментально обнаружено, что наряду с поляризационной мультистабильностью в многомодовом ВИЛ наблюдается пространственная мультистабильность. Она проявляется как существование при одинаковых параметрах ВИЛ нескольких различных распределений интенсивности генерации в поперечном сечении пучка. Экспериментально показано, что в зависимости от тока накачки возможно сосуществование двух, трех и четырех пространственных распределений интенсивности генерации. Следствие пространственной мультистабильности — появление мультистабильности в интегральной интенсивности генерации лазера и мультистабильности в интенсивности генерации лазера на выделенной поляризации. В этом случае наряду с гистерезисным методом для исследования мультистабильности использован метод вибрационного резонанса, позволяющий более детально определить области существования бистабильности и мультистабильности [8]. Кроме того, показано, что пространственная мультистабильность приводит к сильной локальной зависимости гистерезисного поведения интенсивности генерации от тока накачки.

**Экспериментальная установка.** Экспериментальные исследования проведены на установке, представленной на рис. 1. Использован лазерный диод HFE-4080-321 (Honeywell) с  $\lambda_{\text{ген}} = 852$  нм, температура которого поддерживалась термоконтроллером TED200C с точностью до  $0.01$  °C. Изменение тока накачки осуществлялось с шагом  $0.01$  мА. Коллимированный пучок лазерного излучения делился на светоделительном кубике 50:50 на два равных пучка. Один из пучков использовался для анализа интегральной интенсивности ВИЛ лавинным фотодиодом ФД1, другой после прохождения полуволновой пластинки разделялся на две ортогональные поляризационные компоненты с помощью призмы Глана. Одна из компонент использовалась для анализа пространственных паттернов пучка с помощью CCD-камеры, другая регистрировалась лавинным фотодиодом ФД2 для исследования динамики лазера на выделенной поляризации. Сигналы лавинных фотодиодов регистрировались осциллографом Agilent DSO5034A, данные с которого в режиме реального времени обрабатывались на персональном компьютере. Кроме того, исследован спектральный состав излучения ВИЛ в области мультистабильности с помощью анализатора спектра Bristol 771NIR с разрешением в рассматриваемом диапазоне  $4.5$  пм.

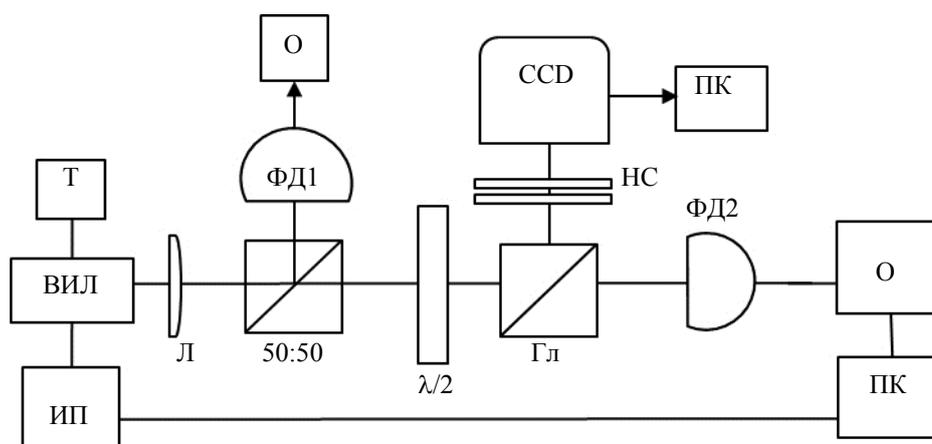


Рис. 1. Экспериментальная установка: ВИЛ — лазерный диод; ИП — источник питания; ФД1, ФД2 — лавинные фотодиоды; Гл — призма Глана; 50:50 — светоделительный кубик;  $\lambda/2$  — полуволновая пластинка; Л — коллимирующая линза; О — осциллограф; НС — нейтральные светофильтры; ПК — компьютер; Т — термоконтроллер

**Результаты и их обсуждение.** Исследование мультистабильности проведено несколькими методами. Вначале рассмотрим гистерезисное поведение интенсивности генерации с изменением тока накачки. На рис. 2 представлены зависимости интенсивности ВИЛ от тока накачки, полученные измерением интегральной интенсивности (рис. 2, *а*) и с поляризационным разрешением (рис. 2, *б*) в диапазоне 12—18 мА при температуре лазерного диода 30 °С. Зависимости получены наложением нескольких сканирований тока накачки в противоположных направлениях с различными начальными и конечными значениями  $j_{dc}$ . При первом сканировании ток накачки  $j_{dc}$  изменялся последовательно вперед (1-2-3-4-5-6-7) и назад (7-8-9-10-1) от 11 до 18 мА, что дало возможность наблюдать бистабильность. Второе сканирование проведено от  $j_{dc} \approx 15$  мА до значения чуть выше первого скачка (1-2-3-4-5-6) при прямом сканировании  $j_{dc}$ . При этом обратное сканирование дает дополнительный цикл гистерезиса (6-5-9-10-1). Третье сканирование также от 15 мА, но до значения сразу после второго скачка (1-2-3-4-5) при прямом сканировании  $j_{dc}$ , где следующий цикл гистерезиса появился при обратном сканировании (5-4-11-2-1) и т. д.

Из рис. 2, *а*, где показана интегральная интенсивность  $I_{пр}$  без поляризационного разрешения, можно отметить сосуществование двух, трех- и четырех значений интенсивности генерации. Однако более четко эта картина видна в измерениях интенсивности генерации на выделенной поляризации (рис. 2, *б*). В этом случае наблюдается мультистабильное поведение, причем в разных диапазонах тока накачки лазера проявляется мультистабильность разной кратности: от бистабильности до четырехстабильности аналогично рис. 2, *а*. Следует отметить, что регистрация сигнала интенсивности с поляризационным разрешением позволяет проводить исследование режимов ВИЛ с большим разрешением, под которым понимается относительное расстояние между стационарными состояниями, за счет выделения поляризатором некоторых компонент излучения. Однако в этом случае необходимо тщательно выбирать угол поворота полуволновой пластинки, которая определяет выделенное направление. В формирование интегральной интенсивности вносят вклад разные наборы мод ВИЛ с различными поляризациями. Использование поляризатора ослабляет пучок в соответствии с выбранной ориентацией поляризатора, что может привести как к повышению разрешения, так и к уменьшению числа наблюдаемых стационарных состояний. Поэтому выбор угла направления оси поляризатора существенно влияет на форму гистерезиса и, соответственно, на полученные результаты.

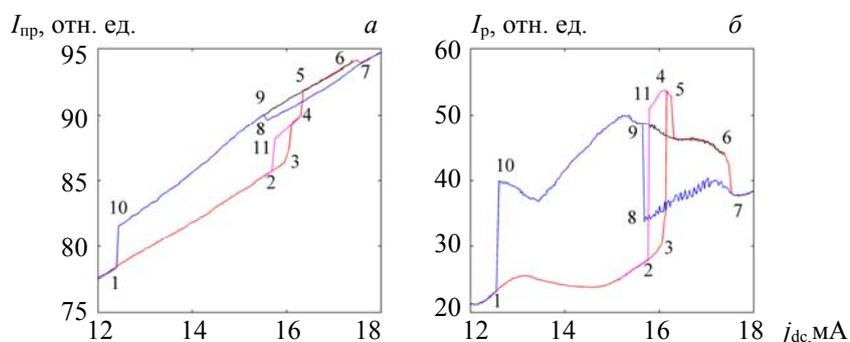


Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения ВИЛ лазера от тока накачки: *а* — гистерезис в интегральной интенсивности без поляризационного разрешения  $I_{пр}$  (сигнал ФД1), *б* — гистерезис в поляризационно-разрешенной интенсивности  $I_p$  (сигнал ФД2); числа характеризуют траекторию изменения тока накачки

Форма гистерезиса и степень мультистабильности излучения ВИЛ в значительной степени зависят от температуры ВИЛ. На рис. 3 представлены гистерезисные кривые, полученные с поляризационным разрешением при температурах, близких к комнатной: 15, 20, 25 и 30 °С. Изменение температуры оказывает значительное влияние на характеристики резонатора лазерного диода, оно не только определяет число и подвижность носителей  $p$ -,  $n$ -заряда, зависящие от этого условия генерации (изменения контура коэффициента усиления, уширение энергетических уровней, характеристики обрарабатываемых фононов), но и приводит к изменению геометрических параметров резонатора. ВИЛ-диоды типично имеют цилиндрическую симметрию. Изменения геометрии резонатора за счет температурных деформаций сопровождаются изменением коэффициента потерь и симметрии системы, определяющей возможные для генерации моды.

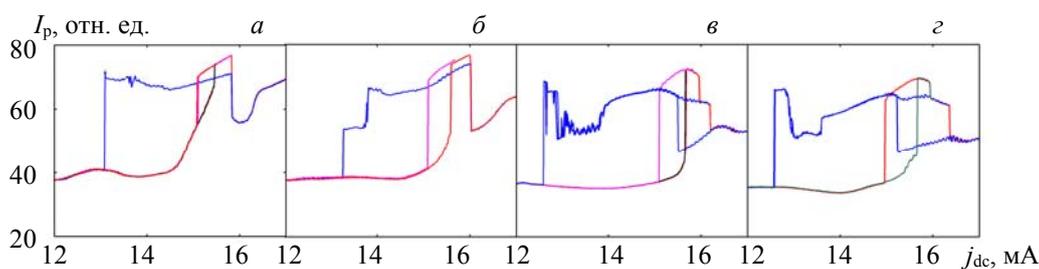


Рис. 3. Гистерезис интенсивности генерации излучения ВИЛ на выделенной поляризации при температурах лазерного диода 15 (а), 20 (б), 25 (в) и 30 °С (г)

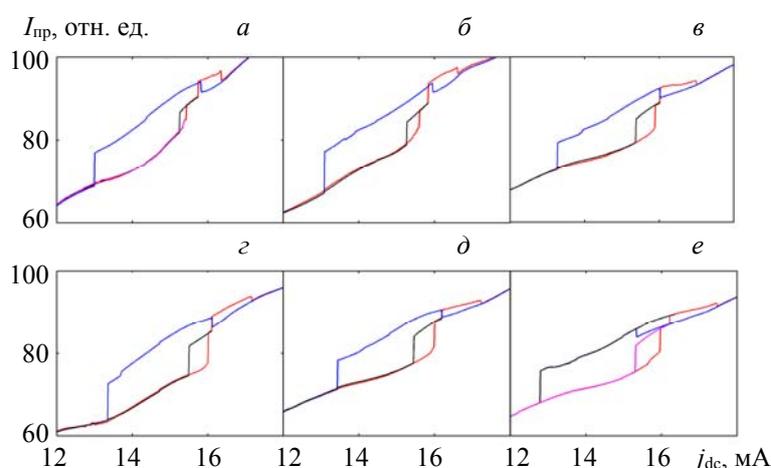


Рис. 4. Интегральная интенсивность генерации лазера как функция постоянного тока накачки, измеренная для температуры лазерного диода 12 (а), 15 (б), 20 (в), 22 (г), 25 (д) и 30 °С (е)

Границы появления зон и ширина зон зависят от температуры лазерного диода. Например, при температуре лазерного диода  $T = 15\text{ °C}$  (рис. 3, а) можно заметить появление нескольких зон бистабильности и одной достаточно узкой зоны трехстабильности. Повышение температуры до  $T = 20\text{ °C}$  и выше приводит к увеличению ширины зоны трехстабильности (рис. 3, б). С ростом температуры до  $T = 25\text{ °C}$  проявляется зона четырехстабильности (рис. 3, в), ширина которой возрастает с повышением температуры (рис. 3, г). Аналогичные исследования проведены без поляризационного разрешения (рис. 4). При измерениях без поляризационного разрешения в гистерезисном поведении наблюдаются несколько зон бистабильности и трехстабильности (рис. 4, а–д) и только при  $T = 30\text{ °C}$  — четыре сосуществующих состояния интенсивности генерации (рис. 4, е).

Для выявления более детальной картины мультистабильности в случае измерений без поляризационного разрешения использован метод, основанный на явлении вибрационного резонанса [8], который позволяет находить скрытые состояния системы, не проявляющиеся явным образом в гистерезисном поведении. Метод заключается в добавлении к нелинейной системе двух периодических сигналов с сильно различающимися частотами. При этом исследуется отклик системы на низкой частоте с фиксированной амплитудой в зависимости от амплитуды высокочастотного сигнала. При наличии бистабильности или мультистабильности в этой зависимости появляются нелинейные резонансы, число которых на единицу меньше числа сосуществующих состояний. В ток накачки лазера добавлялись два синусоидальных сигнала с частотами  $f_L = 1\text{ кГц}$  и  $f_H = 100\text{ кГц}$  и амплитудами  $A_L$  и  $A_H$ . При этом исследовался отклик лазера  $R_L$  на частоте  $f_L$  при фиксированной амплитуде  $A_L$  как функция амплитуды  $A_H$  в широком диапазоне токов накачки при различных температурах лазерного диода. На рис. 5 представлены типичные зависимости отклика лазера  $R_L$  от  $A_H$  для случаев трехстабильности и четырехстабильности, измеренных при различных токах накачки. В первом случае имеются два явно выраженных нелинейных резонанса, во втором — три, что соответствует наличию трех- и четырехстабильности.

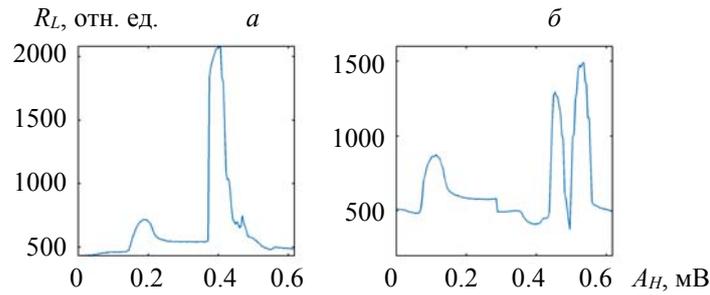


Рис. 5. Отклик лазера на частоте  $f_L$  как функция амплитуды  $A_H$ , ток накачки 14.68 (а) и 15.08 мА (б);  $T = 12.5^\circ\text{C}$

На рис. 6 представлены зависимости отклика лазера  $R_L$  на частоте  $f_L$  от тока накачки  $j_{dc}$  и амплитуды модуляции  $A_H$ . В этих измерениях постоянный ток накачки и амплитуда  $A_H$  изменялись с шагом 0.01 мА и 1 мВ. В частности, рис. 6, а демонстрирует наличие двух и трех нелинейных резонансов на зависимости  $R_L$  от амплитуды  $A_H$  и тока смещения. Наличие трех резонансных ветвей означает, что в определенном диапазоне постоянного тока могут существовать одновременно четыре разных состояния интенсивности генерации. При более высоких температурах (рис. 6, б и в) наблюдаются только две резонансные ветви нелинейного отклика, что означает сосуществование трех различных интенсивностей генерации.

Сравнивая результаты, полученные методом вибрационного резонанса, с представленными на рис. 4, видим, что исследование методом вибрационного резонанса дает более полную картину существования мультистабильности. Фактически гистерезисное поведение на рис. 4 демонстрирует одновременное существование трех состояний интенсивности генерации только в довольно узком диапазоне токов накачки по сравнению с результатами, полученными методом вибрационного резонанса (рис. 6).

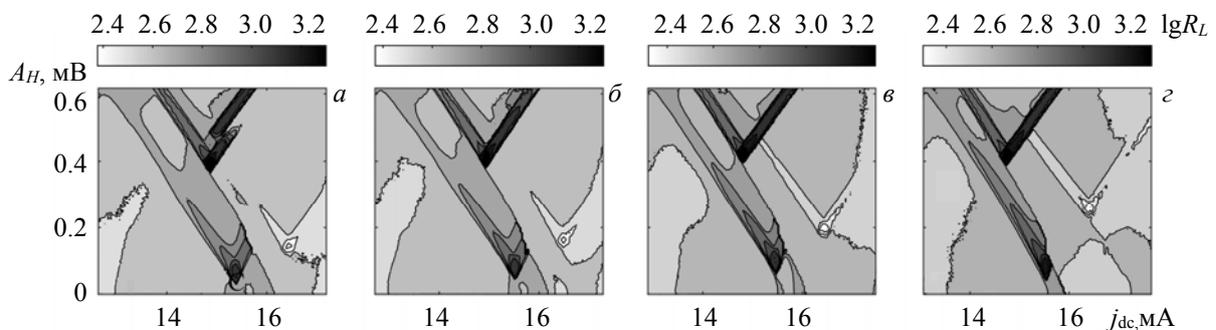


Рис. 6. Контурные графики отклика лазера  $R_L$  на частоте  $f_L$  в зависимости от постоянного тока накачки  $j_{dc}$  и амплитуды модуляции  $A_H$  (случай интегральной мультистабильности) при  $T = 12.5$  (а), 15 (б), 20 (в) и  $25^\circ\text{C}$  (г)

Одновременное существование нескольких состояний интенсивности генерации может быть объяснено одновременной генерацией нескольких пространственных мод, появление которых в интенсивности генерации зависит от начальных условий. Анализ данных, зарегистрированных CCD-камерой, показывает явное соответствие между присутствующей в системе мультистабильностью в интенсивности и мультистабильностью в пространственном распределении интенсивности лазерного пучка. На рис. 7, а представлены пространственные распределения интенсивности в поперечном сечении пучка ВЛЛ при фиксированном токе накачки (15.84 мА), температуре  $25^\circ\text{C}$ , соответствующие четырем состояниям интенсивности генерации на выделенной поляризации при  $25^\circ\text{C}$  (рис. 3, в). Разность между представленными пространственными распределениями показана на рис. 7, б.

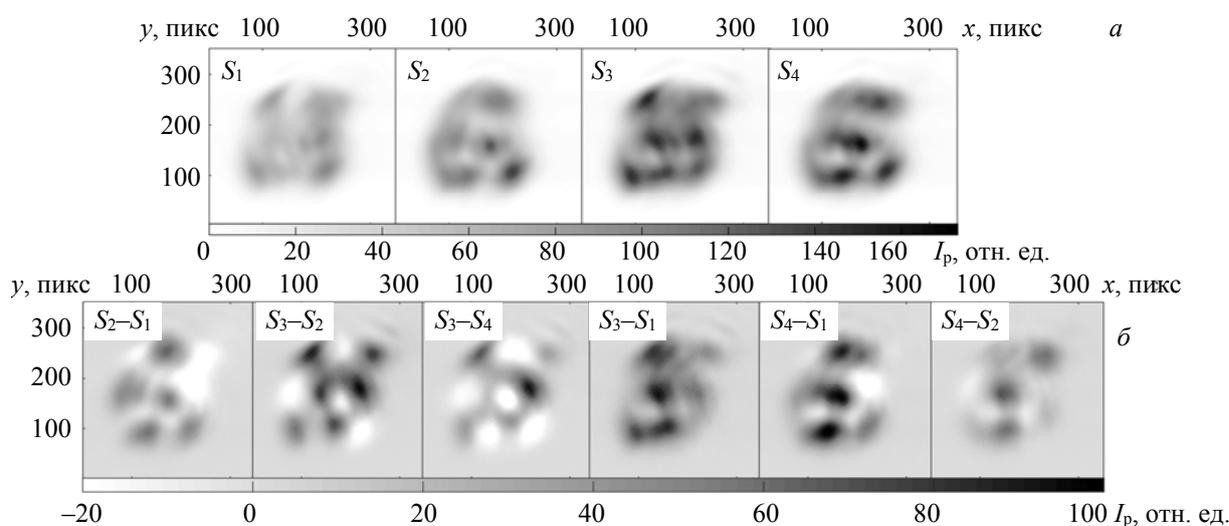


Рис. 7.  $S_1$ — $S_4$ -пространственные распределения интенсивности, соответствующие различным стационарным состояниям интенсивности при токе 15.84 мА,  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$  (а) и пространственное распределение разностного сигнала интенсивностей  $S_i - S_j$ , где  $i, j = 1, 2, 3, 4$  (б)

Аналогичные закономерности наблюдались при других фиксированных токах накачки. В частности, в области би- и трехстабильности сосуществуют два и три различных пространственных распределения интенсивности генерации. Можно заметить, что изображения разности между паттернами структурированы, как и сами паттерны. Это означает, что сечение пучка неоднородно и является суперпозицией набора пространственных мод. Наблюдаемая пространственная мультистабильность отличается от мультистабильности, исследованной в одиночных или в системе оптически связанных широкоапертурных ВИЛ, где сосуществуют несколько пространственно локализованных солитонов [10—12].

Наиболее полную информацию о модовом составе излучения можно получить, опираясь на спектральные данные. На рис. 8 представлены спектры излучения ВИЛ при температуре  $25\text{ }^\circ\text{C}$  и токе накачки 15.84 мА. На рис. 8, а—г показан результат измерения спектра излучения ВИЛ без поляризационного разрешения на разных ветвях гистерезиса. Нетрудно заметить, как сильно различается спектральный состав, однако некоторые компоненты присутствуют во всех спектрах (853.2210, 853.2475 нм). На рис. 8, д—з представлены спектры, характеризующие излучение ВИЛ на выделен-

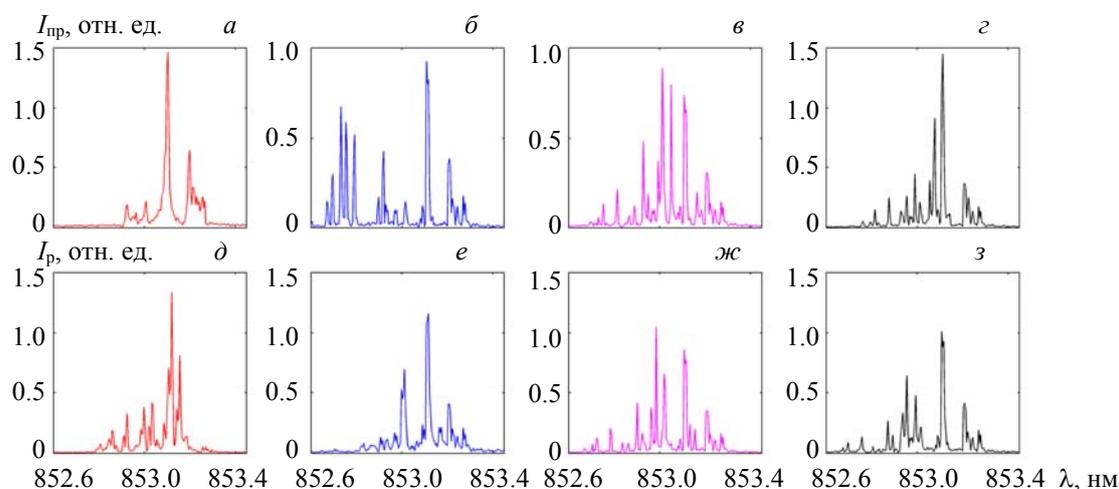


Рис. 8. Спектры излучения ВИЛ полной интенсивности излучения (а—г) и интенсивности лазера с поляризационным разрешением (д—з); ток накачки 15.84 мА,  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$

ной поляризации, а также пространственные распределения, показанные на рис. 7, а. При выделении поляризации некоторая часть компонент значительно ослабилась, однако по-прежнему видны как значительное различие между спектрами, так и компоненты, присутствующие в излучении ВИЛ на всех подуровнях гистерезиса при выбранном наборе параметров.

Многомодовые ВИЛ имеют сложное пространственное сечение пучка. Для лазерных диодов с протон-активированной рабочей областью распределение интенсивности в большинстве случаев не является симметричным и представляет собой результат наложения паттернов, соответствующих различным пространственным модам. Очевидное следствие пространственной мультистабильности — пространственная неоднородность локальной зависимости интенсивности от тока накачки. Различные формы локальных гистерезисов, зарегистрированных вдоль диаметра пятна ВИЛ (диаметр сечения пучка 2 мм  $\sim 200$  пикселей), иллюстрирует рис. 9, где представлены сигналы интенсивности, просуммированные по области  $20 \times 20$  пикселей, полученные при увеличении и уменьшении тока накачки с шагом 0.005 мА. Области, по которым проводилось суммирование, приведены в порядке следования по диаметру пучка и не имеют общих пикселей.

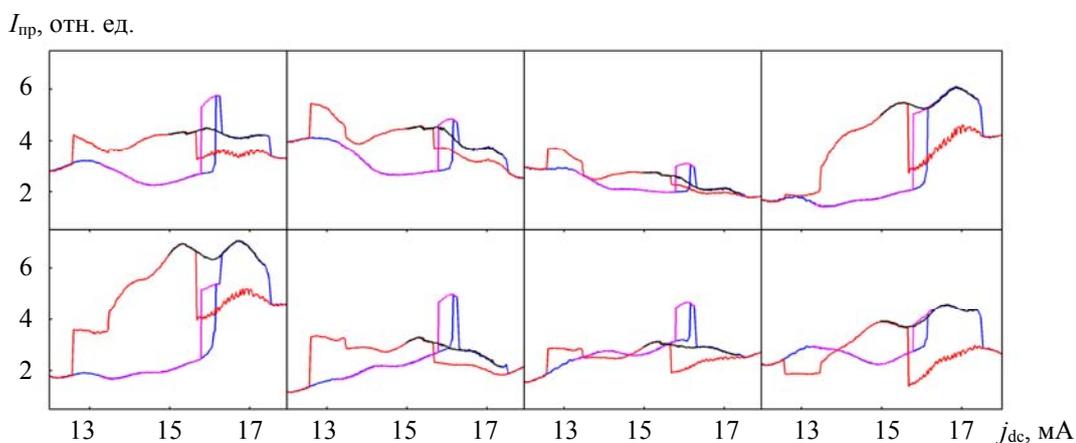


Рис. 9. Локальные свойства мультистабильности: набор гистерезисов в интенсивности ВИЛ, суммированной по участку площади регистрации CCD-камеры  $20 \times 20$  пикселей вдоль диаметра в сечении пятна ВИЛ

Отметим, что крайние границы областей бистабильности и мультистабильности не изменяются относительно границ в гистерезисе интегрального сигнала всего пятна (рис. 2, а), однако поведение интенсивности локальных областей значительно изменяется, что сопровождается изменением числа мультистабильных зон, степени мультистабильности, формы гистерезиса. Такой результат свидетельствует о сильном влиянии локальной динамики пространственных мод и необходимости рассмотрения локальных особенностей при использовании многомодовых ВИЛ.

**Заключение.** Экспериментально продемонстрировано наличие пространственной мультистабильности в вертикально-излучающих лазерах, которая характеризуется сосуществованием разных распределений интенсивности генерации в поперечном сечении пучка с различными интегральной интенсивностью, состоянием поляризации и набором длин волн. Показано, что пространственная мультистабильность приводит к сильной локальной зависимости в гистерезисном поведении интенсивности генерации от тока накачки и разнообразию форм гистерезисного поведения в излучении вертикально-излучающих лазеров. Исследовано влияние температуры лазерного диода на проявление мультистабильности. Методом вибрационного резонанса выявлены скрытые состояния в мультистабильности в измерениях без поляризационного разрешения.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № 18КИ-09).

- 
- [1] **A. Liu, P. Wolf, J. A. Lott, D. Bimberg.** *Photon. Res.*, **7** (2019) 121
- [2] **T. Taimre, M. Nikolic, K. Bertling, Y. L. Lim, T. Bosch, A. D. Rakic.** *Adv. Opt. Photon.*, **7** (2015) 570
- [3] **J. Li, B. Yu, W. Zhao, W. Chen.** *Appl. Spectr. Rev.*, **49** (2014) 666
- [4] **J. Hodgkinson, R. P. Tatam.** *Measur. Sci. Technol.*, **24** (2012) 012004
- [5] **J. Martin-Regalado, S. Balle, M. S. Miguel.** *Opt. Lett.*, **22** (1997) 460
- [6] **M. B. Willemsen, M. U. F. Khalid, M. P. van Exter, J. P. Woerdman.** *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 4815
- [7] **S. Barbay, G. Giacomelli, S. Lepri, A. Zavatta.** *Phys. Rev. E*, **68** (2003) 020101(R)
- [8] **V. N. Chizhevsky.** *Phys. Rev. E*, **89** (2014) 062914
- [9] **A. N. Pisarchik, U. Feudel.** *Phys. Rep.*, **540** (2014) 167
- [10] **S. Barbay, R. Kuszelewicz, J. R. Tredicce.** *Adv. Opt. Technol.* (2011) ID 628761
- [11] **P. Genevet, L. Columbo, S. Barland, M. Giudici, L. Gil, J. R. Tredicce.** *Phys. Rev. A*, **81** (2010) 053839
- [12] **P. Genevet, S. Barland, M. Giudici, J. R. Tredicce.** In “Localized States in Physics: Solitons and Patterns”, Eds. O. Descalzi, M. Clerc, S. Residori, G. Assanto, Springer, Berlin, Heidelberg (2011) 169—186