

УДК 621.373.8

### МОДУЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ 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

Приводится описание учебно-исследовательского комплекса модульного типа для изучения излучения полупроводниковых лазеров, генерируемого в области 400–950 нм. Структурно комплекс состоит из модулей излучателя (в представленном комплекте их число равно 8, но принципиально оно ничем не ограничено), модулей питания и управления, модулей регистрации и дополнительного измерительного оборудования для обеспечения исследования энергетических, спектральных, пространственных, поляризационных и динамических характеристик выходного излучения. Модульная структура обеспечивает высокую вариативность комплекса и позволяет реализовать (в представленном исполнении) более 40 лабораторных работ, а также открывает возможность студентам получить навыки работы с современным оборудованием и разнообразными методами обработки данных. Этот комплекс ориентирован на учебную деятельность, но на его основе возможно также выполнение исследовательских заданий вплоть до заданий второй ступени высшего образования. Ряд лабораторных работ, построенных на использовании комплекса, прошел апробацию на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер; лабораторный комплекс; режимы лазерной генерации; параметры лазерного излучения.

---

#### Образец цитирования:

Буров ЛИ, Горбацевич АС, Лобацевич ПМ. Модульный лабораторный комплекс на основе полупроводниковых лазеров. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020;2:86–90.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-86-90>

#### For citation:

Burov LI, Gorbatsевич AS, Labatsevich PM. The modular equipment for training based on the semiconductor lasers. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;2:86–90. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-86-90>

---

#### 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. 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. Gorbatsевич**, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of general physics, faculty of physics.

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

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

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

## THE MODULAR EQUIPMENT FOR TRAINING BASED ON THE SEMICONDUCTOR LASERS

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)

The description is given of the study and research a modular-type training complex for studying the radiation of semiconductor lasers generated in the region of 400–950 nm. Structurally, the complex consists of emitter modules (there are 8 of them in the presented set, but in principle their number is not limited by anything), power and control modules, registration modules, and some additional measuring equipment to provide research on the energy, spectral, spatial, polarization and dynamic characteristics of the output radiation. The modular structure provides high variability of the complex and allows you to implement (in the presented version) more than 40 laboratory works, and also allows students to get skills in working with modern equipment and different data processing methods. This complex is focused on educational activities, but on its basis it is possible to carry out research work up to the second stage of higher education. A number of laboratory works based on the use of the complex have been tested at the department of laser physics and spectroscopy of the physics faculty of the Belarusian State University.

**Keywords:** semiconductor lasers; equipment for training; regimes of laser generation; parameters of laser radiation.

### Введение

В настоящее время полупроводниковые лазеры являются наиболее распространенными излучателями как по объемам производства (количеству единиц в год), так и по областям применения. Во многом это связано с отработанными технологиями массового производства, небольшой стоимостью, высокой эффективностью генерации и очень широким спектром длины волны генерации. Существенное достоинство полупроводниковых лазеров – возможность широкой вариации режимов работы за счет изменения параметров излучателя (например, температуры или модуляции инжекционного тока) [1]. Создание сверхминиатюрных лазерных излучателей дало существенный стимул к развитию новых уникальных методик в биологии и медицине. Фактически сформировалось целое направление наукоемкой индустрии, которое развивается очень быстрыми темпами.

Прогрессивные лазерные технологии требуют высококлассных специалистов, которые способны активно использовать современную номенклатуру полупроводниковых лазерных излучателей, а также готовы к появлению новых систем, в том числе использующих новейшие принципы или специфические свойства полупроводниковых структур. А это требует не только глубоких теоретических знаний в данной области, но и широкого круга практических умений и навыков обращения с устройствами подобного типа. Такие задачи могут быть решены в рамках специального физического практикума, однако, к сожалению, ни отечественный рынок, ни рынки ближнего и дальнего зарубежья не предлагают недорогого оборудования для подобных целей, а исследовательское оборудование и приборы стоят слишком дорого для использования в учебном процессе.

Физический факультет Белорусского государственного университета имеет большой опыт в разработке качественных оптических и лазерных приборов [2], в том числе и для учебных целей [3]. Сотрудники факультета ведут активные исследования в области физики полупроводниковых лазеров [4; 5]. Все это послужило основой для успешной разработки учебно-научного модульного комплекса по изучению полупроводниковых лазеров. Данный комплекс позволяет проводить лабораторные работы, помогающие ознакомиться с базовыми принципами функционирования полупроводниковых лазеров, научиться измерять различные параметры лазерного излучения (интенсивность, степень поляризации, модовый состав, расходимость и т. д.), изучить особенности формирования излучения генерации полупроводниковых лазеров, связанных с температурными режимами работы, исследовать температурную и токовую перестройку длины волны генерации. Разработанный комплекс представляет собой универсальную систему, в которой есть набор излучателей, а также ряд измерительных приборов, с помощью которых можно проводить исследования и студентам старших курсов, и магистрантам.

### Состав и структура комплекса

Комплекс разрабатывался с ориентиром на возможность проведения как лабораторных работ студентами и магистрантами, так и научных исследований с перспективой дальнейшей модернизации. Поэтому длины волн используемых излучателей должны захватывать как можно больший спектральный диапазон

(400–950 нм). Выбор данного спектрального диапазона обусловлен наличием большого количества полупроводниковых лазерных излучателей, основанных на различных гетероструктурах, и широкодоступных и недорогих фотодетекторов для данных длин волн.

Полупроводниковый лазерный диод является устройством, которое требует защиты от статического электричества, а также работает в определенном диапазоне температур и токов инжекции. Поэтому был разработан блок излучателя, позволяющий производить его подключение к блоку питания, не выключая последнего. Кроме того, в данном блоке хранится информация о типе излучателя и его рабочих параметрах, что дает возможность автоматически приводить параметры блока питания в соответствие с параметрами модуля излучения.

Схематически комплекс состоит из трех основных частей (модулей): модуля питания и управления, модуля полупроводниковых излучателей и модуля регистрации излучения. Модуль питания и управления (рис. 1) осуществляет накачку, термостабилизацию лазера и управление режимами работы. В комплекс входит два таких модуля: один осуществляет питание лазерных диодов постоянным током, а второй позволяет подавать на лазерный диод ток с амплитудной модуляцией. Оба модуля могут выдавать токи от 1 до 200 мА с точностью до 0,1 мА. Слабая модуляция осуществляется наложением на постоянную составляющую гармонических импульсов с частотой следования от 1 кГц до 15 МГц. Каждый модуль также осуществляет термостабилизацию в пределах от 15 до 50 °С с точностью до 0,1 °С.



Рис. 1. Общий вид модуля питания и управления (слева) и модуля полупроводниковых излучателей (справа)

Fig. 1. General view of power and control module (left) and semiconductor radiator module (right)

Так как полупроводниковые лазеры обычно выпускают в виде готовых блоков, доступ к внутренним частям которых закрыт, нами было решено создать модульную систему, где доступа к полупроводниковым кристаллам также не будет. Поэтому в качестве излучателей используются сменные закрытые модули полупроводниковых излучателей, которые монтируются на штатив, соединенный с модулем питания и управления (см. рис. 1).

Модуль полупроводниковых излучателей (рис. 2) содержит в себе лазерный диод, элемент Пельтье для осуществления термостабилизации и цифровой идентификатор, который при подключении распознается модулем питания и управления, что позволяет исключить ситуации, когда из-за неправильно выставленных параметров лазерный диод выходит из строя. Таким образом, осуществляется защита установки от ошибок эксплуатации. Комплекс содержит модули излучателя с лазерными диодами, генерирующими в диапазоне 405, 450, 520, 635, 650, 660, 670, 808, 850 нм. Элемент Пельтье обеспечивает термостабилизацию в пределах от 10 до 40 °С. Корпус модуля излучателя одновременно выступает и радиатором для отвода тепла. Такая компоновка системы термостабилизации позволяет как существенно снизить инерционность всего устройства, так и поднять точность установления температуры лазерного диода. Кроме того, в блоке излучателя находится коллимационная линза, которая формирует пучок лазерного излучения.

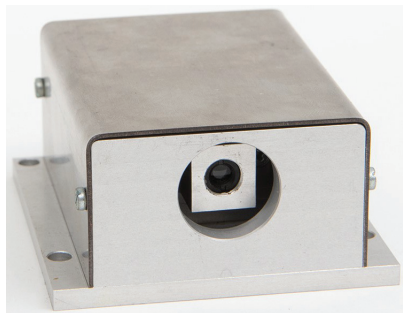


Рис. 2. Модуль полупроводниковых излучателей (9 различных длин волн)

Fig. 2. Semiconductor radiator module (9 different wavelengths)

Модуль регистрации излучения (рис. 3) представлен широким набором технических средств, которые позволяют определять энергетические, спектральные, поляризационные, пространственные и динамические характеристики. Таким образом, осуществляется гибкая настройка под каждое конкретное задание. Для регистрации выходного

излучения лазерных диодов используются следующие модули: полихроматор с выводом спектров на ПЭВМ, модуль измерения степени поляризации с выводом данных на ПЭВМ, измеритель мощности, быстрый фотодиод с осциллографом для исследования динамических характеристик лазерных диодов. Для нахождения пространственных характеристик лазерного излучения применяется CCD-камера, которая в полном соответствии со стандартом ISO 11146 позволяет студентам определять параметр качества пучка  $M^2$  для представленных излучателей.

Измеритель мощности лазерного диода построен на базе кремниевого фотодиода с применением фильтра выравнивания спектральной чувствительности фотодиода для видимого спектра, в результате отсутствует необходимость пересчета показаний измерителя при различных длинах волн регистрируемого излучения.

Следует отметить, что возможно одновременное применение нескольких устройств для решения поставленных задач.



Рис. 3. Модуль регистрации излучения:  
а – измеритель мощности;

б – измеритель степени поляризации выходного излучения

Fig. 3. Module of the radiation registration:

a – power meter; b – polarization degree of output radiation meter

### Измерение параметров выходного излучения

Базовая комплектация представленного комплекса позволяет:

- измерять спектр генерации для различных температур и токов инжекции;
- находить зависимость степени поляризации от тока инжекции и температуры;
- вычислять энергетическую эффективность генерации при различных величинах и режимах тока инжекции;
- определять пространственную структуру пучка;
- исследовать динамические характеристики излучателя.

Таким образом, с помощью представленного модульного комплекса можно достаточно подробно изучить непрерывный режим и режим со слабой токовой модуляцией для полупроводниковых лазеров. Разнообразие модулей полупроводниковых излучателей позволяет проводить эксперименты для различных сред, а широкий набор измерительного оборудования – создать большое количество лабораторных работ различного уровня сложности. На данный момент полностью готовы методические указания по следующим лабораторным работам:

1. Исследование ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазерных излучателей.
2. Исследование температурных особенностей ватт-амперных и пороговых характеристик полупроводниковых лазерных излучателей.
3. Исследование поляризационных характеристик полупроводниковых лазерных излучателей.
4. Исследование расходимости излучения полупроводниковых лазерных излучателей.
5. Исследование спектральных характеристик и продольной модовой структуры полупроводниковых лазерных диодов.
6. Исследование температурных особенностей спектральных характеристик и продольной модовой структуры излучения полупроводниковых лазерных диодов.
7. Исследование динамических характеристик генерации полупроводниковых лазерных диодов.

Кроме того, комплекс (как целиком, так и некоторые из его составляющих) можно применять для проведения исследовательских работ. В частности, измеритель мощности лазерного излучения, измеритель поляризации лазерного излучения и непрерывные источники лазерного излучения были использованы при изучении свойств жидкокристаллических ячеек на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ.

Примеры исследовательских работ:

- для данного лазерного диода найти области температуры и тока инжекции, при которых лазерный диод может генерировать одномодовое излучение;
  - определить длину лазерного резонатора лазерного диода;
  - выявить влияние внешнего резонатора на спектральные характеристики лазерного диода;
  - использовать комплекс для исследования дифракционной эффективности различных ЖК-ячеек.
- (В данном случае комплекс выступает и как источник лазерного излучения с различными длинами волн, и как средство для регистрации поляризации и интенсивности дифрагировавшего излучения.)

### Заключение

Представленный комплекс имеет модульную структуру, что является его существенным преимуществом в качестве учебного оборудования. Большой набор полупроводниковых излучателей, а также модулей регистрации при условии их совместного использования позволяет на основе данного комплекса реализовать целый курс лабораторных работ по полупроводниковым лазерам и механизмам формирования выходных характеристик. Можно отметить, что комплекс уже успешно используется на базе физического факультета Белорусского государственного университета для подготовки специалистов и магистрантов по лазерной физике.

### Библиографические ссылки

1. Numai T. *Fundamentals of semiconductor lasers*. Tokyo: Springer; 2015. 289 p. (Springer series in optical sciences; volume 93). DOI: 10.1007/978-4-431-55148-5.
2. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Мельникова ЕА, Толстик АЛ. Разработка лазерно-оптического, спектрального и научно-учебного оборудования, новых материалов и технологий на кафедре лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;3:4–19.
3. Буров ЛИ, Горбачевич АС, Лобаевич ПМ. Лабораторный комплекс на основе лазера с поперечной диодной накачкой. *Физическое образование в вузах*. 2017;23(1):63–70.
4. 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.
5. Jadan M, Addasi J, Flaifel MH, Burov LI, Gorbachevich AS, Lobatsevich PM. The effect of VCSEL intrinsic dynamics on polarization bistability. *Results in Physics*. 2019;14:102379. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102379.

### References

1. Numai T. *Fundamentals of semiconductor lasers*. Tokyo: Springer; 2015. 289 p. (Springer series in optical sciences; volume 93). DOI: 10.1007/978-4-431-55148-5.
2. Voropay ES, Gulis IM, Melnikova EA, Tolstik AL. Designing of optical laser and spectral equipment for research and educational applications, development of new materials and technologies at the laser physics and spectroscopy department of the Belarusian State University. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;3:4–19. Russian.
3. Burov LI, Gorbachevich AS, Lobatsevich PM. [Laboratory complex based on a laser with transverse diode pumping]. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh*. 2017;23(1):63–70. Russian.
4. Burov LI, Gorbachevich AS, Lobatsevich PM. Polarization switching transients in surface-emitting semiconductor lasers. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;2:17–24. Russian.
5. Jadan M, Addasi J, Flaifel MH, Burov LI, Gorbachevich AS, Lobatsevich PM. The effect of VCSEL intrinsic dynamics on polarization bistability. *Results in Physics*. 2019;14:102379. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102379.

Статья поступила в редакцию 02.03.2020.  
Received by editorial board 02.03.2020.