УДК 621.315.592,621.373

# АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ РЕЖИМА НАКАЧКИ

© 2020 г. В. В. Близнюк<sup>1, \*</sup>, К. П. Галстян<sup>1</sup>, В. С. Григорьев<sup>1</sup>, А. В. Долгов<sup>1</sup>, Н. В. Морозов<sup>1</sup>, В. А. Паршин<sup>1</sup>, А. Г. Ржанов<sup>2</sup>, О. И. Семенова<sup>1</sup>, А. Е. Тарасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет, Москва, Россия

\**E-mail: 4059541@mail.ru* Поступила в редакцию 29.07.2019 г. После доработки 30.08.2019 г. Принята к публикации 27.09.2019 г.

Рассматривается взаимосвязь между спектральными характеристиками лазерных диодов и возможностью подбора оптимального тока накачки для максимального срока их службы. Экспериментально и аналитически изучена связь между аппроксимацией спектральных линий излучения и их вариациями, вызванными особенностями драйвера лазера при регулировке накачки.

DOI: 10.31857/S0367676520010081

#### введение

Одномодовые лазерные диоды (ЛД) с высокой стабильностью мощности и длины волны излучения представляют практический интерес для разработчиков прецизионных измерительных систем. Режим питания ЛД считают оптимальным, если выполняются следующие условия: во-первых, обеспечивается требуемый уровень мощности излучения; во-вторых, имеет место генерация на фундаментальной моде, в-третьих, реализуется достаточно большой срок службы, чтобы практически исключить замену модулей в аварийных условиях.

Обзор литературных источников [1] позволяет заключить, что для реализации режима питания лазерных модулей, при котором одновременно обеспечиваются требуемая мощность генерации на фундаментальной моде и ее высокая стабильность в течение 5000–10000 ч, необходимо использовать малоинерционное звено обратной связи со сроком службы не менее 50000 ч. При этом на первый план выходит контроль параметров источника питания ЛД – напряжения на входе драйвера и тока накачки лазерного диода [2, 3].

Режим генерации ЛД на фундаментальной моде контролируется путем измерений диаграммы направленности его излучения и различными способами ее количественного анализа [2–6]. Существенным недостатком такого метода контроля является необходимость извлечения ЛД из измерительной системы. Срок службы современных ЛД определяется по результатам ускоренных испытаний, а значит, при повышенных температурах окружающей среды, что также приводит к необходимости извлечения модулей из измерительной системы [1].

Целью данной работы является разработка методики оптимизации и контроля параметров блока питания ЛД без извлечения их из оптико-электронного комплекса. Единственной возможностью проведения такого контроля является анализ токовой зависимости спектральной характеристики ЛД.

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ПИТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ, ВСТРОЕННЫХ В ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

При разработке методики оптимизации режима генерации ЛД учитывались два требования. Во-первых, должны обеспечиваться генерация на фундаментальной моде и большой срок службы. Во-вторых, для исключения долговременных исследований спектральных характеристик ЛД необходимо использовать полученные ранее результаты исследований лазерных диодов, согласно которым одновременное выполнение этих условий возможно только при определенных значениях тока накачки  $i_{ld opt}$ , когда функция  $f_{emp}(v)$ , описывающая огибающую экспериментально полученного спектра излучения ЛД, может быть хорошо аппроксимирована гауссовой функцией [5, 6].



Рис. 1. ВАХ лазерного модуля с лазерным диодом ЛД-3 модели KLM-650-5-5.

Так как ток накачки является основным параметром блока питания ЛД, оптимизация режима питания модуля сводится к определению значения этого тока  $i_{ld opt}$ .

Начальной операцией по нахождению параметра  $i_{ld opt}$  является определение диапазона значений тока накачки, в котором следует анализировать токовую зависимость функции  $f_{emp}(v)$ . Для определения границ этого диапазона необходимо измерить вольтамперную характеристику (ВАХ) ЛД. Характерный вид ВАХ ЛД приведен на рис. 1.

ВАХ можно аппроксимировать двумя отрезками прямых линий со значительно различающимися углами наклона. Анализ функций  $f_{emp}(v)$  не проводится при токах накачки в той области ВАХ, где наблюдается сильная зависимость тока накачки от напряжения на входе ЛД, так как даже малые флуктуации напряжения блока питания  $U_{вx}$ приводят к значительным изменениям тока накачки, а значит, и к большой нестабильности параметров излучения.

Участок ВАХ с малым углом наклона соответствует значениям напряжения питания ЛД, при которых драйвер работает в режиме ограничения тока накачки. Во всем диапазоне напряжений  $U_{\rm BX}$  на входе драйвера, работающего в таком режиме, обеспечивается существенное уменьшение флуктуаций тока накачки при изменении  $U_{\rm BX}$ , а значит, и высокая стабильность параметров излучения ЛД.

Так как угол наклона ВАХ практически постоянен в диапазоне значений  $U_{\rm BX}$  от трех до пяти вольт, один и тот же уровень стабилизации параметров излучения ЛД может быть обеспечен при любом значении  $U_{\rm BX}$  из выше указанного диапазона [7].

Изготовители ЛД рекомендуют использовать источник питания с выходным напряжением 5 В. Обусловлено это тем, что при таком напряжении на входе драйвера обеспечивается не только устойчивый режим его работы, но и максимальная мощность излучения ЛД. Однако исследова-



**Рис. 2.** Вид огибающей спектра излучения ЛД-3 модели KLM-650-5-5 (сплошная линия) и гауссовой кривой (пунктир) шириной, равной ширине огибающей, при токе накачки 25.7 мА.

ния токовой зависимости функции  $f_{emp}(v)$  показали, что при увеличении  $U_{\rm вх}$  наблюдается не только рост мощности излучения, но и длинноволновый сдвиг спектра излучения ЛД. Этот сдвиг объясняется ростом тока накачки ЛД и вызванным им ростом температуры гетероструктуры ЛД. Для определения границ диапазона значений тока накачки, в пределах которого нужно вести поиск его оптимального значения  $i_{ldopt}$ , мы использовали количественный анализ функции  $f_{emp}(v)$  при разных значениях напряжения на входе драйвера, а следовательно, и тока накачки ЛД.

Анализ проводился путем сравнения функции  $f_{emp}(v)$  с гауссовой функцией в пределах ширины линии  $\Delta v$ , огибающей спектр излучения лазерного диода, с центральной частотой линии  $v_0$ . Мерой отклонения функции  $f_{emp}(v)$  от гауссовой функции в диапазоне частот  $\Delta v$  служил параметр A, такой, что при выполнении условия  $A \rightarrow 1$  функция  $f_{emp}(v)$  практически совпадала с гауссовой функцией (рис. 2). Согласно [6] это означало, что ЛД генерировал на фундаментальной моде, а срок его службы был практически максимальным для партии приборов, изготовленных в едином технологическом цикле.

Уточненный анализ функции  $f_{emp}(v)$  проводили с учетом критерия A > 0.855 [6]. Соответствие результатов измерения параметра A этому критерию указывает на то, что имеет место режим генерации лазерного диода на фундаментальной моде.

При определении срока службы ЛД из партии приборов, изготовленных групповым методом в одном и том же технологическом цикле, установлено, что он может варьироваться в пределах от 2500 до 3500 ч. Поэтому для определения качества каждого экземпляра ЛД из той или иной партии приборов наряду с параметром *A* использовался параметр *T*:

$$T = \frac{\tau}{\tau_{max}},\tag{1}$$

где  $\tau$  — срок службы конкретного экземпляра ЛД из определенной партии приборов в масштабе реального времени;  $\tau_{max}$  — максимальное время наработки некоторого ЛД из той же партии приборов.

Установлено, что параметры T и A при A > 0.855, т.е. в режиме генерации лазерного диода на фундаментальной моде, связаны между собой следующим соотношением:

$$T = A^{1/3}$$
. (2)

Анализ токовой зависимости спектра излучения ЛД модели ЛД-3 позволил определить оптимальное значение его тока накачки  $i_{ld opt}$ . Срок службы ЛД, согласно (1) и (2), возрастает при увеличении параметра *А*. При рассмотрении режима питания ЛД-3, установлено, что максимальное значение параметра *А* реализуется при токе накачки 25.7 мА и напряжении на входе драйвера 3 В, т.е. в области слабой зависимости тока накачки ЛД от  $U_{\rm nx}$ .

Наряду с ЛД-3 в работе рассматривались режимы работы блока питания еще двух моделей лазерных модулей: ЛД-2 и ЛД-5. Они, как и ЛД-3, изготовлены в едином технологическом цикле и имеют одинаковые с ЛД-3 ВАХ. Однако значение тока накачки ЛД-2, равное 24.7 мА, при котором параметр *А* достигает максимального значения 0.970, находится в области сильной зависимости тока накачки от  $U_{\rm BX}$ , что исключает возможность рассмотрения его в качестве  $i_{ld opt}$ . Поэтому за оптимальное принято значение тока накачки ЛД-2, равное 26.1 мА, несмотря на то, что значение параметра *A* = 0.960, т.е. меньше, чем при токе 24.7 мА.

Исследования партии приборов показали, что для ЛД, изготовленных в едином технологическом цикле, нижняя граница пологой части их ВАХ одинакова. Это позволяет для каждой партии ЛД определить входное напряжение  $U_{\text{вх. min}}$  на драйвере, при превышении которого драйвер начинает функционировать как ограничитель тока накачки.

Входное напряжение ЛД  $U_{\rm BX}$  равно выходному напряжению блока питания, что исключает необходимость использования измерителя тока накачки, а значит, и усложнение схемы контроля режима питания ЛД.

ЛД модели ЛД-105 включает в себя лазер мощностью 40 мВт. На рис. 3 изображена ВАХ этого ЛД. Область вариации тока накачки здесь ограничена условием A > 0.855. Из рассмотрения ВАХ ЛД-105 с учетом такого ограничения следует, что



**Рис. 3.** ВАХ лазерного модуля с лазерным диодом ЛД-105 модели KLM-650-40-5.

оптимальное значение тока накачки равно 85.6 мA при  $U_{\rm BX} = 4.5$  B.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена методика оптимизации режима питания ЛД, основанная на анализе токовой зависимости формы линии  $f_{3\kappaсп}(v)$ , огибающей его спектр излучения ЛД. Показано, что для проведения такого анализа достаточно использовать интегральный спектральный параметр A, такой, что при  $A \rightarrow 1$  функция  $f_{3\kappaсп}(v)$  практически совпадает с гауссовой. Экспериментально установлено, что режим питания ЛД оптимален, если имеет место генерация на фундаментальной моде и выполняется условие  $A \rightarrow 1$ . При этом оптимальное значение тока накачки  $i_{ld opt}$  должно находиться в той части вольтамперной характеристики, где наблюдается слабая зависимость тока накачки от напряжения на входе драйвера ЛД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жуков А.Е. Основы физики и технологии полупроводниковых лазеров. СПб: Изд-во Академ. ун-та, 2016. 364 с.
- Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. № 11. С. 1393; Leshko A.Yu., Lyutetskii A.V., Pikhtin N.A. et al. // Semiconductors. 2002. V. 36. № 11. Р. 1308.
- Гордеев Н.Ю., Новиков И.И., Кузнецов А.М. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. № 10. С. 1401; Gordeev N.Y., Novikov I.I., Shernyakov Y.M. et al. // Semiconductors. 2010. V. 44. № 10. Р. 1357.
- Близнюк В.В., Березовская Н.В., Брит М.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 6; Bliznyuk V.V., Berezovskaya N.V., Brit M.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 1. Р. 1.
- 5. Близнюк В.В., Березовская Н.В., Паршин В.А., Тарасов А.Е. // Докл. Томского гос. ун-та сист. упр. и радиоэлектрон. 2016. Т. 19. № 3. С. 55.
- 6. Bliznyuk V.V., Berezovskaya N.V., Brit M.A. et al. // Phys. Wave Phenom. 2017. V. 25. № 2. P. 95.
- 7. Елисеев П.Г., Акимова И.В. // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 478.