

Определение температуры и теплового сопротивления полудискового лазерного диода методом измерения импульсных вольт-амперных характеристик

© Ф.И. Зубов¹, Ю.М. Шерняков², А.А. Бекман², Э.И. Моисеев¹, Ю.А. Салий (Гусева)^{2,1},
М.М. Кулагина², Н.А. Калужный², С.А. Минтаиров², А.В. Николаев²,
Е.В. Шерстнев², М.В. Максимов¹

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: fedyazu@mail.ru

Поступила в Редакцию 17 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 20 ноября 2023 г.

Принята к публикации 1 декабря 2023 г.

Предложена методика определения температуры лазерного диода, работающего в непрерывном режиме, а также теплового сопротивления прибора посредством сопоставления его вольт-амперной характеристики с импульсными вольт-амперными характеристиками, измеренными при различных температурах. Методика апробирована для $\varnothing 200$ мкм полудискового микролазера с активной областью на основе квантовых точек InGaAs/GaAs. Установлено, что при токах, соответствующих пиковой лазерной мощности и гашению лазерной генерации ввиду перегрева активной области, температура прибора достигает 101 и 149°C соответственно. Тепловое сопротивление лазера составило 110 К/Вт.

Ключевые слова: полудисковый микролазер, температура лазера, тепловое сопротивление, квантовые точки, лазерные диоды.

DOI: 10.61011/FTP.2023.09.56992.5765

1. Введение

Температура активной области и прилегающих гетерослоев полупроводникового лазера — его ключевая величина, так как характеристики прибора могут очень сильно зависеть от нее. Тепловое сопротивление R_T , которое определяет, какова будет рабочая температура лазера той или иной конструкции (последовательность слоев гетероструктуры, тип монтажа чипа на теплоотвод и т.д.) при заданном токе накачки I , выражается следующей формулой:

$$R_T = \frac{\Delta T}{\Delta Q}, \quad (1)$$

где ΔT — прирост температуры прибора T в ответ на приращение выделяемой в нем тепловой мощности ΔQ . Экспериментальное определение температуры и теплового сопротивления является важной задачей при исследовании и разработке полупроводниковых лазеров.

Ряд существующих методов определения температуры лазерных диодов (ЛД) основан на измерении смещения спектральных пиков с ростом тока накачки: пика лазерной генерации [1], пика спонтанного излучения [2], или пиков мод шепчущей галереи (МШГ) [3], если резонатор лазера их поддерживает. Знание температурного коэффициента сдвига пиков из справочной литературы или дополнительных измерений позволяет определить температуру прибора при разных накачках. По экспери-

ментально установленной зависимости тепловой мощности прибора $Q = UI - P$ от тока, где U — напряжение на лазере, а P — его выходная оптическая мощность, используя выражение (1), можно определить тепловое сопротивление.

Следует отметить следующие недостатки данных методов. Отслеживание смещения пика лазерного спектра может становиться затруднительным с ростом накачки, если в лазере наблюдается многочастотная генерация и спектр приобретает сложную форму. К тому же одновременный рост с током заселенности активной области и ее температуры вносит дополнительную неточность, поскольку рост заселенности приводит к сдвигу пика в коротковолновую область, а рост температуры — к сдвигу пика в длинноволновую область. В случае контроля сдвига МШГ этой неопределенности можно избежать, если межмодовое расстояние достаточно большое (малые размеры резонатора), так как в довольно широких диапазонах токов накачки сдвиг мод главным образом определяется изменением показателя преломления гетерослоев. Контроль пика спонтанного излучения (а именно смещения длинноволнового спада пика на полувысоте) может требовать создания дополнительного окошка в конструкции прибора, из которого вывод лазерного излучения подавлен. Наконец, применение этих методов для определения температуры прибора в области высоких накачек (например, вблизи гашения

лазерной генерации) может быть неприемлемым ввиду сравнительно большой длительности процесса записи спектров, в течение которого прибор может сдвигаться.

В патенте [4] предложен метод определения температуры ЛД на основе импульсного измерения уменьшения напряжения на приборе, связанного с разогревом. Однако этот метод применим лишь для импульсной (квазинепрерывной) накачки: измерительные импульсы малого тока (ниже порога генерации) подаются между рабочими лазерными импульсами высокой накачки.

Еще один метод измерения температуры лазера, схожий с тем, что используется в настоящей работе, основан на сопоставлении импульсных ватт-амперных характеристик (ВтАХ) и ВтАХ, измеренной в непрерывном режиме накачки [5]. Данный метод требует использования быстродействующего измерителя оптической мощности. Однако в случае измерения лазерного излучения малой мощности (например, микролазеров), одновременное обеспечение приемлемой точности измерения импульсной оптической мощности и достаточно коротких фронтов импульсов фототока (< 50 нс), что необходимо для устранения разогрева прибора, может оказаться нетривиальной технической задачей.

В настоящей работе на примере полудискового микролазера рассматривается способ определения температуры прибора при непрерывной накачке и его теплового сопротивления, основанный на измерении импульсных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Предлагаемый метод является достаточно простым и при этом обеспечивающим хорошую точность.

2. Исследуемые микролазеры

Лазерная гетероструктура синтезировалась на подложке n^+ -GaAs, разориентированной на 6° в направлении [111]. Волновод GaAs толщиной 720 нм, заключенный между AlGaAs-эмиттерами, в центральной части содержал 7 слоев InGaAs квантовых точек высокой плотности (так называемых квантовых ям-точек [6]). На поверхности структуры методом оптической литографии и сухого травления на глубину 6 мкм, сквозь все эпитаксиальные слои, создавались мезы в форме дисков диаметром 200 мкм. Далее посредством оптической литографии и вакуумного напыления на поверхности дисков создавались кольцевые контакты AgMn/Ni/Au шириной 15 мкм и отступом 2 мкм от края диска. Полупроводниковая пластина с помощью химико-механической полировки утончалась до толщины ~ 160 мкм. На обратную сторону пластины наносился сплошной слой металла AuGe/Ni/Au. Посредством раскалывания кристалла через центры дисков образовывались полудисковые резонаторы. Чипы с полудисками напайвались p -контактом вверх на медные теплоотводы так, что сколотая грань полудисков оказывалась на краю теплоотвода. К полукольцевым контактам приваривались золотые микропро-

волочки диаметром 18 мкм (см. вставку на рис. 1). Такие приборы, поддерживающие МШГ, выходная мощность которых главным образом излучается из сколотой грани, ранее были подробно исследованы нами в работах [7,8].

3. Детали эксперимента

Теплоотвод с монтированным прибором крепился на медную пластину, температура которой задавалась при помощи элемента Пельтье, резистивного датчика температуры, размещаемого рядом с теплоотводом, и термоконтроллера. Температура поддерживалась с точностью $\pm 0.25^\circ\text{C}$.

Для подачи постоянного и импульсного смещения на лазер применялась пайка контактов к источникам питания. Отметим, что использование зондов (иглолок) для питания микролазеров может приводить к дополнительной ошибке измерения напряжения на лазере из-за нестабильности контактного сопротивления.

В непрерывном режиме ВАХ и ВтАХ прибора измерялись при помощи программируемого источника питания NI PXI 4110, мультиметров NI PXI 4065 и калиброванного Ge-фотодиода (ФД) $\varnothing 5$ мм Thorlabs FDG05-CAL, придвигаемого вплотную к микролазеру (угол сбора излучения составлял $\geq 130^\circ$). В непрерывном режиме точность измерения напряжения и тока составляла не хуже $\pm 1\%$, а оптической мощности — $\pm 5\%$.

На рис. 1 показаны ВАХ и ВтАХ прибора, измеренные в непрерывном режиме накачки и температуре теплоотвода 20°C до очень высокой накачки, при которой наблюдается полное гашение лазерной генерации из-за перегрева активной области. Ток, при котором достигается пиковая оптическая мощность, составил 468 мА, а

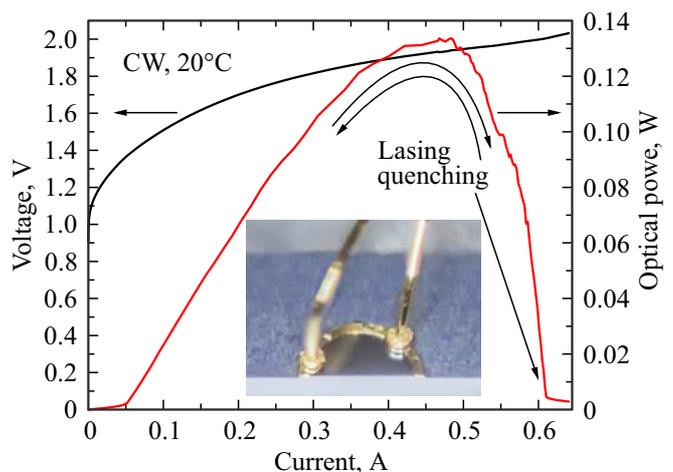


Рис. 1. Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики полудискового лазера $\varnothing 200$ мкм с полукольцевым контактом, измеренные при непрерывной накачке и температуре теплоотвода 20°C . На вставке — фотография лазера с приваренными золотыми проволочками. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

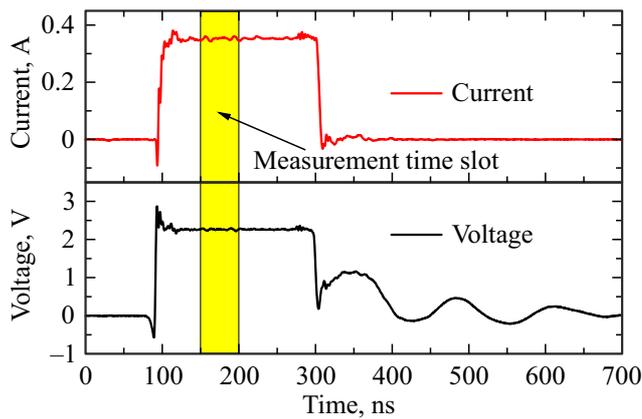


Рис. 2. Пример импульсов тока через лазер и соответствующего напряжения на нем.

ток гашения лазерной генерации — 610 мА. Небольшая оптическая мощность, наблюдаемая выше тока гашения лазерной генерации, связана с остаточным спонтанным излучением. Так как запись ВАХ и ВтАХ микролазера в непрерывном режиме происходила сравнительно быстро (в пределах нескольких секунд), лазер не успевал сдвигаться и представленные характеристики воспроизводились многократно.

Накачка прибора П-образными импульсами осуществлялась при помощи импульсного драйвера на базе полевого транзистора, который управлялся при помощи внешнего генератора импульсов, задающего длительность и частоту следования импульсов. Амплитуда импульсов напряжения на ЛД и последовательно соединенном тестовом сопротивлении задавалась при помощи программируемого источника питания NI PXI 4110. Импульсы напряжения на ЛД и тока через него, определяемого по тестовому резистору, записывались в автоматическом режиме при помощи осциллографа Tektronix MDO3014, что позволяло строить импульсные ВАХ прибора.

Частота следования импульсов составляла 1 кГц. Пример импульсов тока и напряжения длительностью ~ 200 нс при импульсной накачке ~ 350 мА представлен на рис. 2. Фронты нарастания и спада импульсов вместе с небольшими выбросами на фронтах составляли ~ 30 нс. Колебания напряжения по окончании импульса (начиная с 300 нс на графике) связаны с релаксацией заряда после запирающего транзистора. Временное окно измерения тока и напряжения выбиралось таким, чтобы во время него разогрев прибора был пренебрежимо мал. Появление разогрева определялось по спектрам. С его началом лазерные линии начинают смещаться в длинноволновую область. В нашем случае для устранения влияния разогрева измерение амплитуды импульсов производилось во временном окне 50–100 нс от начала импульса. В это окно попадало 125 точек осциллограмм, по которым производилось усреднение для снижения влияния шумов. Также усреднение проводилось

по нескольким осциллограммам. По спектрам, а именно посредством вариации длительности импульса накачки, было установлено, что разогрев прибора, усредненный по использованному временному окну, при максимальной импульсной накачке (640 мА) составлял ~ 0.5°C.

Перед измерением импульсных ВАХ нами выполнялась калибровка измерительной системы с использованием резистора, номинал которого известен с высокой точностью и который припаивался вместо ЛД. После введения поправочного коэффициента, отклонения импульсной ВАХ резистора от рассчитываемой по закону Ома составляли ≤ 1%.

4. Описание методики, результаты и обсуждение

У „идеального лазера“, тепловое сопротивление которого равно нулю, т.е. выделяемое тепло отводится мгновенно и разогрева активной области не происходит, ВАХ в непрерывном режиме накачки после открывания ЛД должна выходить на линейный рост, определяемый сопротивлением структуры. На практике же для лазера с ненулевым тепловым сопротивлением при непрерывной накачке (или накачке импульсами большой длительности) из-за увеличения температуры гетероструктуры наблюдается сублинейный рост ВАХ (см. рис. 1). В случае накачки достаточно короткими импульсами, за время которых ЛД не успевает значительно нагреться, можно наблюдать „идеальные“ ВАХ, имеющие линейный рост до больших плотностей токов.

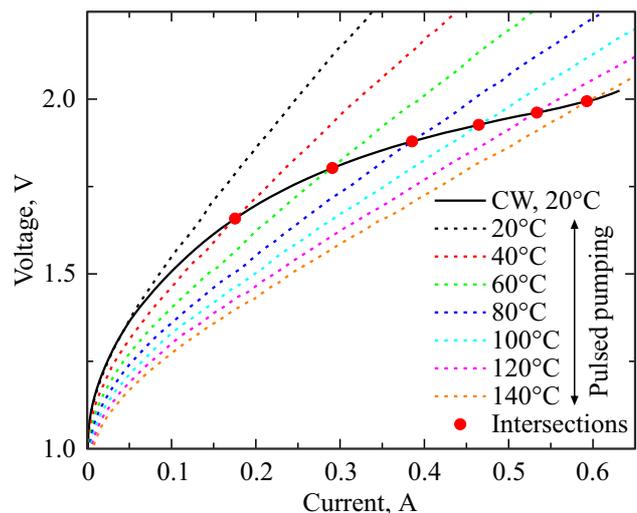


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика прибора при непрерывной накачке и температуре теплоотвода 20°C, а также набор импульсных ВАХ при температурах от 20 до 140°C с шагом 20°C. Кружки — точки пересечения ВАХ, по которым можно определить температуру прибора при различных токах непрерывной накачки. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

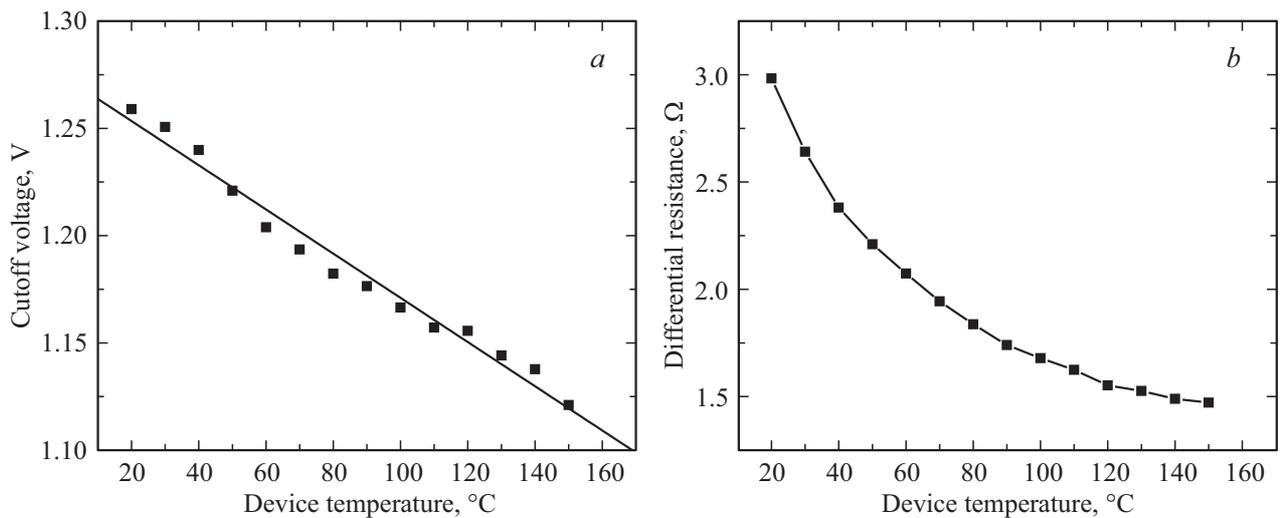


Рис. 4. Зависимости напряжения открывания (а) (прямая — линейная аппроксимация) и дифференциального сопротивления микролазера (b) от температуры теплоотвода (температуры лазера) в отсутствие внутреннего разогрева, определенные по импульсным ВАХ.

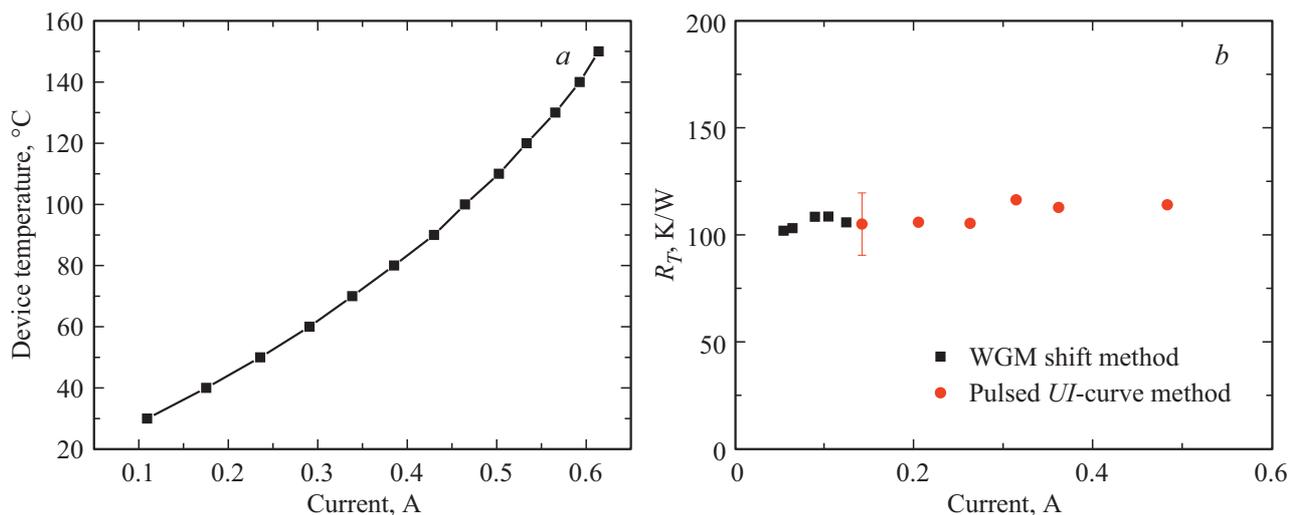


Рис. 5. Зависимости температуры лазера (а) и его теплового сопротивления (b) от тока непрерывной накачки при температуре теплоотвода 20°C. На панели (b): квадраты — значения, определенные по спектральному сдвигу мод шепчущей галереи, кружки — по импульсным ВАХ.

Предлагаемая методика определения температуры ЛД основана на измерении ВАХ прибора в непрерывном режиме (его номинальном режиме) и измерении набора импульсных ВАХ, когда разогрев исключен, в том же токовом диапазоне при различных температурах теплоотвода. На рис. 3 представлено наложение ВАХ, измеренной в непрерывном режиме накачки при температуре теплоотвода 20°C, и набора импульсных ВАХ при различных температурах теплоотвода, задающих температуру лазера. Видно, что ВАХ в непрерывном режиме накачки и импульсная ВАХ при 20°C совпадают в области малых накачек там, где разогрев пренебрежимо мал. С ростом тока ветви этих ВАХ расходятся. По пересечениям ВАХ, измеренной в непрерывном режиме,

и импульсных ВАХ при повышенных температурах (> 20°C) можно установить значения температуры лазера при различных токах непрерывной накачки.

Температура прибора, определяемая таким способом, впрочем, как и для других вышеупомянутых методов, является некой усредненной температурой по гетероэлементам в области протекания тока (в нашем случае под полукольцевым контактом, где сосредоточены пучности лазерных МШГ [9]), а определяемое тепловое сопротивление соответствует отводу тепла из этой области.

На рис. 4 показаны зависимости напряжения открывания U_0 (а) и дифференциального сопротивления микролазера R_d (b) в открытом состоянии от температуры прибора в отсутствие разогрева, определенные

по импульсным ВАХ. Значения U_0 и R_d определялись по пересечению экстраполяции линейного участка ВАХ с осью ординат и как тангенс угла его наклона соответственно. Видно, что U_0 , приблизительно, линейно снижается с ростом температуры со средней скоростью спада 1.03 мВ/К, что связано с уменьшением ширины запрещенной зоны гетерослоев. Сопротивление также снижается, но с некоторым замедлением. Спад сопротивления с температурой можно объяснить ростом концентрации носителей заряда в волноводе.

На рис. 5, а представлена зависимость температуры микролазера от тока непрерывной накачки, температура теплоотвода которого стабилизирована на уровне 20°C. Видно, что рост зависимости сверхлинеен, что ожидаемо, учитывая закон Джоуля–Ленца. Эти данные позволяют определить температуру активной области лазера при достижении пиковой мощности и гашении лазерной генерации: 101 и 149°C соответственно.

На рис. 5, б показана зависимость теплового сопротивления прибора R_T от накачки, определенная с использованием предложенного метода (кружки). В нашем случае погрешность определения теплового сопротивления для выбранного приращения по температуре (10 К) составила $\pm 7\%$. Среднее значение R_T по всему диапазону токов составило 110 К/Вт. В области малых накачек тепловое сопротивление также было определено нами по спектральному сдвигу МШГ (квадраты на рис. 5, б). Можно констатировать хорошее согласие данных, полученных разными методами.

5. Заключение

Таким образом, нами рассмотрен метод определения температуры и теплового сопротивления ЛД на основе сопоставления ВАХ, измеренных в непрерывном и импульсном режимах. Метод не требует длительного воздействия током на прибор, поэтому риск его деградации при определении температуры лазера даже при больших накачках минимизирован. Это позволило определить температуру прибора при гашении лазерной генерации, которая составила 149°C. Имеет место хорошее согласие значений теплового сопротивления, полученных предложенным методом и методом, основанным на измерении спектрального сдвига мод шепчущей галереи. Хотя метод проиллюстрирован на примере полудискового микролазера, мы полагаем, что в дальнейшем он может быть рассмотрен в качестве альтернативы имеющимся методам определения теплового сопротивления и температуры также для ЛД других типов.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-22-00949, <https://rscf.ru/project/22-22-00949/>

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.W. Hänsch, G.T. Kamiya, T.F. Krausz, G.B. Monemar, L.M. Ohtsu, T.H. Venghaus, B.H. Weber, B.H. Weinfurter. *High Power Diode Lasers* (Springer New York, N. Y., 2007).
- [2] A.S. Payusov, A.A. Beckman, G.O. Kornyshev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, N.Yu. Gordeev. *Semiconductors*, **56**, 919 (2022).
<http://dx.doi.org/10.21883/SC.2022.12.55152.4409>
- [3] F. Zubov, M. Maximov, E. Moiseev, A. Vorobyev, A. Mozharov, Yu. Berdnikov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov. *Optics Lett.*, **46**, 3853 (2021).
<https://doi.org/10.1364/OL.432920>
- [4] Patent US8112243.
- [5] S.S. Saini, S.H. Cho, M. Dagenais. *Photonics Packag. Integr. Interconnects VII*, **6478**, 647805 (2007).
<https://doi.org/10.1117/12.714295>
- [6] M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, N.Y. Gordeev, Y.M. Shernyakov, A.S. Payusov, F.I. Zubov, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Appl. Sci.*, **10**, 1038 (2020).
<https://doi.org/10.3390/app10031038>
- [7] F.I. Zubov, E.I. Moiseev, M.V. Maximov, A.A. Vorobyev, A.M. Mozharov, N.A. Kaluzhnyy, S.A. Mintairov, M.M. Kulagina, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **34**, 1349 (2020).
<https://doi.org/10.1109/LPT.2022.3216738>
- [8] F.I. Zubov, E.I. Moiseev, M.V. Maximov, A.A. Vorobyev, A.M. Mozharov, Yu.M. Shernyakov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.M. Kulagina, V.G. Dubrovskii, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov. *Laser Phys.*, **32**, 125802 (2022).
<https://doi.org/10.1088/1555-6611/ac996f>
- [9] F. Zubov, E. Moiseev, M. Maximov, A. Vorobyev, A. Mozharov, Y. Shernyakov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, V. Dubrovskii, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov. *Photonics*, **10**, 290 (2023). <https://doi.org/10.3390/photonics10030290>

Редактор А.Н. Смирнов

Determination of the temperature and thermal resistance of a half-disk laser diode by measuring pulsed current-voltage characteristics

*F.I. Zubov¹, Yu.M. Shernyakov², A.A. Beckman²,
E.I. Moiseev¹, Yu.A. Salii (Guseva)^{2,1}, M.M. Kulagina²,
N.A. Kalyuzhnyy², S.A. Mintairov², A.V. Nikolaev²,
E.V. Sherstnev², M.V. Maximov²*

¹ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A technique is proposed for determining the temperature of a laser diode operating in a continuous mode, as well as thermal resistance of the device by comparing its current-voltage characteristic with pulsed current-voltage characteristics measured at different temperatures. The technique was applied to a $\varnothing 200 \mu\text{m}$ half-disk microlaser with an active region based on InGaAs/GaAs quantum dots. It was found that at currents corresponding to the peak laser power and lasing quenching due to overheating of the active region, the device temperature reaches 101 and 149°C, respectively. The thermal resistance of the laser is 110 K/W.