

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Теплофизическая модель ДГС–лазеров в условиях непрерывной  
генерации**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Любимовой Анастасии Александровны

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.В. Овчинников

Зав. кафедрой

нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Температурный режим является одним из важнейших факторов, определяющих эксплуатационные характеристики, надёжность и долговечность радиоэлектронных устройств [1–3]. Особенно значимым температурный фактор становится для мощных полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры (ДГС-лазеров), в которых значительная часть потребляемой энергии преобразуется в тепло [4, 5].

Повышение температуры активной области лазерного диода оказывает существенное влияние на его рабочие характеристики. Увеличивается пороговый ток генерации, снижается выходная мощность и эффективность преобразования энергии, происходит смещение длины волны излучения, а также усиливаются деградиционные процессы, сокращающие срок службы устройства [5–9].

Современные методы теплофизического анализа позволяют проводить исследование тепловых режимов ещё на этапе проектирования устройства. Использование математического моделирования обладает существенными преимуществами по сравнению с экспериментальными методами, поскольку позволяет исследовать перспективные конструкции, не существующие в реальном исполнении, проводить многопараметрическую оптимизацию и оценивать влияние различных конструктивных решений на характеристики устройства [1, 2, 10].

Особую актуальность приобретает разработка относительно простых аналитических моделей, которые могут быть реализованы с использованием персональных компьютеров без привлечения сложных специализированных математических пакетов. Такой подход позволяет существенно сократить вычислительные затраты и расширить возможности инженерного проектирования [10–12].

**Целью** настоящей магистерской работы является разработка теплофизических моделей конструктивных элементов твердотельных электронных устройств и модернизация теплофизической модели полоскового

ДГС-лазера в условиях непрерывной генерации для расчёта температурных полей и оценки выходной мощности с использованием аналитических методов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- изучение принципов теплофизического моделирования микроэлектронной аппаратуры;
- разработка теплофизических моделей основных конструктивных элементов лазерных диодов;
- построение моделей контактной пластины (сабмаунта), цилиндрического основания корпуса, радиатора и баллона корпуса;
- проведение анализа теплового сопротивления контактной пластины как элемента крепления лазерного кристалла;
- модернизация теплофизической модели активного кристалла полоскового ДГС-лазера;
- разработка алгоритма расчёта температурного поля и оценки выходной мощности лазера;
- проверка работоспособности разработанной модели.

### **Структура работы**

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованных источников и приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Принципы теплофизического моделирования микроэлектронной аппаратуры**

В первой главе рассмотрены основные подходы к теплофизическому моделированию радиоэлектронной и микроэлектронной аппаратуры [1, 2].

В разделе 1.1 приведены общие принципы построения теплофизических моделей микроэлектронных устройств. Рассмотрена иерархическая структура микроэлектронной аппаратуры, состоящая из нескольких уровней компоновки: от отдельных микросхем и дискретных элементов до многоблочных конструкций [1, 2].

Особое внимание уделено принципу местного влияния, позволяющему существенно упростить моделирование сложных систем путём замены реальных неоднородных структур эквивалентными моделями с эффективными теплофизическими характеристиками [1].

Показано, что при выполнении условий линейности возможно использование принципа суперпозиции температурных полей, позволяющего значительно упростить решение задач теплопроводности [1].

Рассмотрен метод тепловых схем, основанный на аналогии между процессами стационарной теплопроводности и электрическими цепями [1, 2]. Введено понятие теплового сопротивления как отношения перепада температур к тепловому потоку.

В разделе 1.2 исследованы особенности теплофизического обеспечения лазерных диодов. Рассмотрены механизмы влияния температуры на пороговый ток, мощность излучения, квантовую эффективность и долговечность устройства [5, 7–9].

Показано, что повышение температуры приводит к усилению нерадиационных процессов рекомбинации, увеличению утечки носителей заряда и ускорению деградиационных процессов [6–8].

Также рассмотрены основные методы отвода тепла от лазерного кристалла [4, 7–9, 13–15]:

- использование высокотеплопроводных материалов;
- применение микроканальных охлаждающих систем;
- использование пайки и термокомпрессионных соединений;
- применение теплопроводящих паст и прокладок.

В разделе 1.3 рассмотрены конструктивные особенности типовых корпусов лазерных диодов, в частности корпусов типов C-mount и TO [4].

## **Глава 2. Теплофизические модели пассивных конструктивных элементов**

Во второй главе разработаны теплофизические модели пассивных элементов конструкции лазерного диода [7–9, 16, 17].

В разделе 2.1 построена теплофизическая модель контактной пластины (сабмаунта), предназначенной для крепления лазерного кристалла. Рассмотрена задача стационарной теплопроводности для прямоугольного тела с локализованным поверхностным источником тепла.

Получены аналитические выражения для распределения температурного поля и расчёта теплового сопротивления пластины при различных вариантах организации теплоотвода. Решение задачи выполнено методом конечных интегральных преобразований [11, 12].

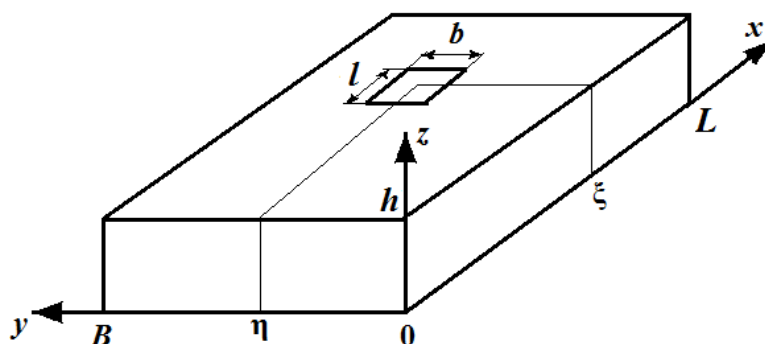


Рисунок 1 – Теплофизическая модель контактной пластины с локализованным поверхностным источником тепла.

В разделе 2.2 разработана теплофизическая модель цилиндрического основания корпуса лазерного диода. Рассмотрено распределение температуры

в цилиндрическом теле с локальным круговым источником тепла и конвективным теплообменом на внешних поверхностях [11, 12, 18].

В разделе 2.3 проведён анализ теплового сопротивления радиатора в форме диска.

В разделе 2.4 рассмотрена теплофизическая модель баллона корпуса лазерного диода.

В разделе 2.5 выполнен анализ влияния параметров контактной пластины на эффективность отвода тепла от лазерного кристалла. Показано, что геометрические размеры и теплофизические свойства материалов оказывают существенное влияние на температурный режим устройства [13–17].

### **Глава 3. Теплофизическая модель активного кристалла полоскового лазерного диода в условиях стационарной генерации**

В третьей главе выполнена модернизация теплофизической модели активного кристалла полоскового ДГС-лазера [19–24].

В разделе 3.1 разработан алгоритм расчёта температурного поля и оценки выходной мощности лазерного диода. Модель основана на аналитическом решении задач стационарной теплопроводности и позволяет учитывать особенности многослойной структуры лазерного кристалла [11, 12].

Разработанный алгоритм позволяет определять распределение температуры в активной области и оценивать изменение выходной мощности в зависимости от режима работы устройства [20–24].

В разделе 3.2 проведена проверка работоспособности разработанной модели. Полученные результаты показали, что разработанный подход позволяет эффективно оценивать влияние температурного режима на характеристики полоскового ДГС-лазера без использования сложных вычислительных комплексов [7, 8, 20, 24].

На основе разработанного алгоритма получены зависимости, характеризующие изменение основных параметров лазерного диода при различных режимах работы.

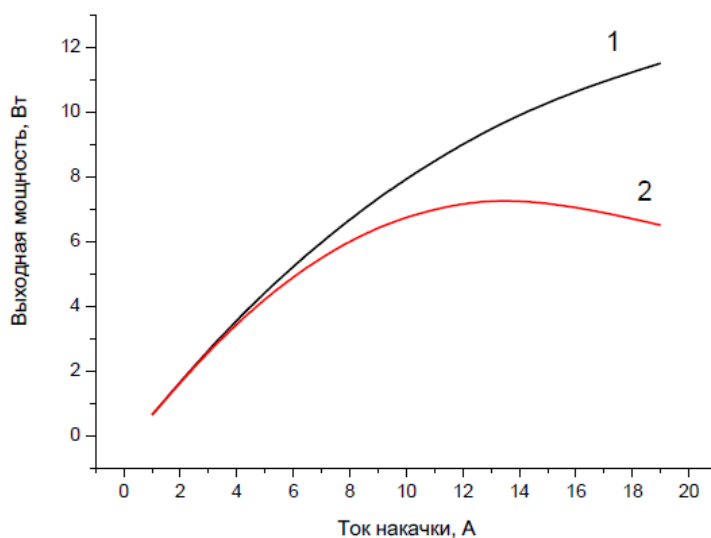


Рисунок 2 – Зависимость выходной мощности от тока накачки рассматриваемой модели ЛД

Для проверки адекватности разработанной теплофизической модели выполнено сравнение полученных результатов с литературными данными. Показано хорошее согласование результатов моделирования с опубликованными исследованиями, что подтверждает корректность разработанного подхода.

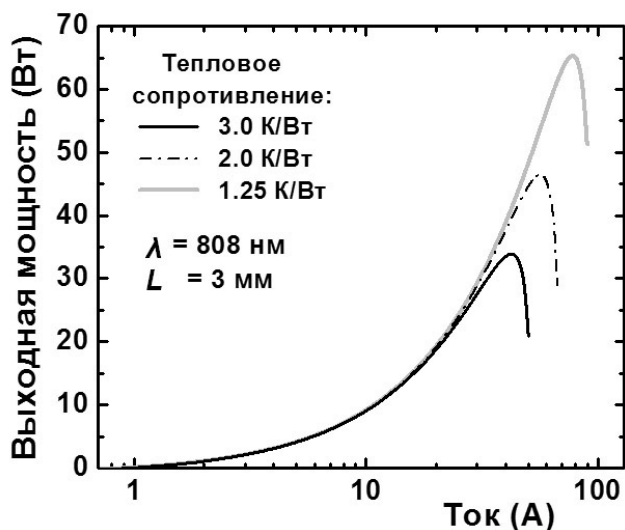


Рисунок 3 – расчеты мощности излучения, представленные в [16]

Предложенная модель обладает достаточной точностью и может быть использована при инженерном проектировании лазерных устройств.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения магистерской работы были разработаны теплофизические модели основных конструктивных элементов твердотельных электронных устройств и модернизирована теплофизическая модель полоскового ДГС-лазера в условиях непрерывной генерации.

Получены аналитические выражения для расчёта температурных полей и тепловых сопротивлений различных элементов конструкции лазерного диода [11, 12].

Разработан алгоритм оценки температурного режима и выходной мощности лазерного диода, позволяющий проводить инженерные расчёты с использованием персональных компьютеров без привлечения сложных математических пакетов [10].

Результаты работы могут быть использованы при проектировании полупроводниковых лазеров и других электронных устройств, функционирование которых существенно зависит от температурного режима.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. – Государственное унитарное предприятие научно-техническое издательство "Радио и связь", 1990.
2. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.
3. Рабинерсон А.А., Ашкинази Г.А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
4. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах / Под. ред. П.Г. Елисеева: Пер. с англ. Т.2 – М.: Мир, 1981.
5. Д. М. Демидов, А. Л. Тер-Мартirosян, К. А. Булашевич и др. МОЩНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 808 нм. I. ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ // НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2012, том 22, № 3, с. 78–86.
6. Слипченко С.О., Шашкин И.С., Вавилова Л.С. и др. Температурная делокализация носителей заряда в полупроводниковых лазерах // ФТП. 2010. Т. 44. С. 688–693.
7. Безотосный В. В. и др. Излучательные параметры и тепловой режим мощных одиночных лазерных диодов спектрального диапазона 980 нм //Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №. 2. – С. 145-148.
8. Безотосный В. В. и др. Тепловой режим мощных лазерных диодов //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2015. – Т. 42. – №. 3. – С. 36-43.
9. Иванов С.А. Температурные эффекты в мощных лазерных диодах // Труды XV Международной конференции «Фотоника и оптоэлектроника». – СПб., 2023. – С. 45-52.
10. Овчинников С.В., Ляшенко А.В. Обобщенная модель для аналитического расчета температурных полей и тепловых сопротивлений элементов твердотельной радиоэлектроники // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб.

науч. тр. / под ред. проф. А.В. Ляшенко. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – Вып. 12. С. 11 – 18.

11. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: «Высшая школа», 1970. – 712 с.

12. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: «Высшая школа», 1985. – 480 с.

13. В.В. Паращук, А.К. Беляева, В.В. Баранов и др. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4, С. 137 – 141.

14. Рябцев Г.И., Батай Л.Е., Паращук В.В. и др. Теплоотводы на основе искусственных алмазов для мощных лазерных диодов // Lithuanian Journal of Physics. – 1999. – V. 39. – № 4–5. – P. 389–394.

15. Демидов Д.М., Тер-Мартirosян А.Л., Свердлов М.А. и др. Анализ и оптимизация конструкции теплоотводов для мощных лазерных диодов. I. Теплоотвод традиционной конструкции // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 4. С. 40–44.

16. А. Л. Тер-Мартirosян, Д. М. Демидов, М. А. Свердлов, А. В. Кулик, С. Ю. Карпов. АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОТВОДОВ ДЛЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ. II. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ОТВОДА ТЕПЛА // НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2013, Т. 23, № 4, с. 45–49.

17. Демидов Д. М. и др. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. 3. Пути повышения мощности излучения // Научное приборостроение. – 2013. – Т. 23. – №. 2. – С. 129-138.

18. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Сигала. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1979.

19. Гарбузов, Д.З. и др. Мощные оксидно-полосковые и зарощенные одномодовые лазеры ( $\lambda=0,78-0,87$  мкм) на основе InGaAsP/GaAs ЖФЭ квантоворазмерных гетероструктур [Текст] / Д.З. Гарбузов, С.Н. Жигулин,

- А.Б. Кочергин, И.А. Мокина, Э.У. Рафаилов, Н.А. Стругов, М.В. Фуксман, А.П. Шкурко // 1 Всесоюзная конференция по физическим основам твердотельной электроники.. Тез. докл. – 1989. – Ленинград. – С. 20-21.
20. Миронов Ю.М. и др. Метод определения тепловых характеристик инжекционных полупроводниковых лазеров // Квантовая электроника, 1980, Т. 7, № 1, с. 155–169.
21. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах / Под ред. П.Г. Елисеева: пер. с англ. Т. 1. Основные принципы. – М.: Мир, 1981. – 301 с.
22. Xi Y., Schubert E. F. Junction temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method // Appl. Phys. Lett. 2004. 85, Iss. 12. P. 2163–2165.
23. Tsang W.T. The effect of lateral current spreading, carrier outdiffusion and optical mode losses on the threshold current density of GaAs–AlGaAs stripe - geometry DH lasers // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. N 3. P. 1031 – 1044.
24. Безотосный В.В., Васильева В.В., Винокуров Д.А. и др. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм на основе различных типов асимметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом // Физика и техника полупроводников, 2008, Т. 42, вып. 3, С. 357 – 360.