

**Аннотация проекта (ПНИЭР), выполняемого в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям
развития научно-технологического комплекса России на 2014 -
2020 годы»**

**Номер Соглашения о предоставлении субсидии/государственного
контракта:** 14.607.21.0010

Название проекта: Разработка методов и аппаратуры для исследования
и контроля тепловых процессов в мощных полупроводниковых
излучающих приборах на основе гетероструктур.

Основное приоритетное направление: Информационно-
телекоммуникационные системы

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных
гетероструктур Российской академии наук

Руководитель проекта: Закгейм Александр Львович

Должность: заместитель директора по научной работе

E-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru

Ключевые слова: полупроводниковый прибор, полупроводниковый
излучатель, светодиод, тепловое сопротивление, тепловой импеданс,
температурный мэппинг, тепловизионные методы, температурно-зависимые
характеристики, теплоперенос, тепловыделение

Цель проекта

Задачи проекта - теоретическое и экспериментальное исследование тепловых
процессов в мощных полупроводниковых излучающих приборах, включая:

- разработку методов математического моделирования процессов
распределения тока и света, генерации и переноса тепла в излучающих
кристаллах, а также математических методов идентификации элементов
тепловых цепей и алгоритмов определения их параметров;
- разработку экспериментальных методов исследования тепловых процессов
в полупроводниковых излучателях с применением ИК тепловизионной
микроскопии и анализа переходных процессов изменения
температурочувствительных параметров под воздействием греющего тока;
- разработку аппаратно-программного комплекса для измерения теплового
импеданса светодиодов в целом и отдельных звеньев тепловой цепи.

Целью проекта является повышение энергетических характеристик, ресурса
работы и надежности мощных полупроводниковых излучателей за счет
оптимизации их конструкции с точки зрения теплорегулирования на стадии
разработки и определения, с учетом саморазогрева, допустимых нагрузок и
режимов эксплуатации.

Основные планируемые результаты проекта

Ожидаемые результаты:

- самосогласованная 3D модель процессов растекания тока, ближнего поля
излучения, генерации тепла и теплопереноса в полупроводниковых
гетероструктурах;
- математическая модель идентификации составляющих элементов тепловых
цепей и алгоритмы определения параметров звеньев тепловых цепей;
- экспериментальные методы ИК-тепловизионной микроскопии для
температурного "мэппинга" с высоким пространственным разрешением;

- методика измерения теплового импеданса с использованием переходных процессов при широтно-импульсной модуляции греющего тока;
- экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса для измерения тепловых импедансов мощных полупроводниковых светоизлучающих приборов.

Краткая характеристика создаваемой/созданной научной (научно-технической, инновационной) продукции

- Результаты моделирования процессов растекания тока, генерации тепла и теплопереноса в полупроводниковой приборной структуре в самосогласованной 3D модели для типовых конструкций мощных светодиодов "флип-чип", "верикальной", "face-up". К новизне и преимуществам заявляемой модели следует отнести "самосогласованность", т.е. учет зависимости электрических и оптических параметров в заданной точке p-n-перехода от температуры в данной точке. Соответствующие зависимости определяются расчетным и экспериментальным путями, либо на основе литературных данных.

- Экспериментальные распределения и сравнительный анализ температурных и яркостных полей по площади излучающих кристаллов в зависимости от типа конструкции, геометрии контактов и уровня возбуждения. Оценка предельных нагрузочных режимов с учетом неоднородности распределения (локализации) тока и тепловыделения в активной области светодиодов.

Большинство аналогичных работ на сегодняшний день ограничивается оценкой средних температур перегрева активной области, рассчитанной из значений общего теплового сопротивления;

- Математическая модель и алгоритмы идентификации параметров тепловых цепей;

- Экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса для детального исследования элементов тепловых цепей в корреляции с физической структурой светодиода (функциональный аналог прибора Thermal Tester T3Ster, фирмы MicRed, США). Отличие от аналога - оригинальный метод теплового возбуждения: воздействие греющего тока с использованием широтно-импульсной модуляции с последующим анализом переходной характеристики температурочувствительного параметра (прямое напряжение) на такое воздействие. Комплекс должен обеспечивать контроль тепловых параметров готовых приборов на приемо-сдаточных испытаниях, определение узких мест ("bottlenecks") для теплового потока на стадии исследований и разработок.

За последнее время риски спроса на разрабатываемую аппаратуру, и так невысокие из-за большой стоимости зарубежного аналога (цена T3Ster - > \$130000), снизились в связи с политикой ограничительных санкций.

Назначение и область применения, эффекты от внедрения результатов проекта

Потенциальную область применения результатов проекта образуют научно-исследовательские и промышленные организации, занимающиеся разработкой и производством мощных полупроводниковых приборов

различных типов, но, в особой степени, специализирующиеся в области мощных светодиодов для светотехнических задач, а также потребители этой продукции. Сегодня на российских предприятиях, производящих полупроводниковые изделия, имеются единичные дорогостоящие импортные экземпляры измерителей теплового сопротивления, в то время как тепловое сопротивление является одним из важнейших параметров приборной спецификации. Серийно приборы для измерения тепловых характеристик полупроводниковых приборов и, тем более, светодиодов, в России не производятся. Зарубежными аналогами разрабатываемого аппаратно-программного комплекса являются приборы Thermall Tester T3Ster производства фирмы MicRED (США, www.micred.com), достаточно уникальные и дорогие приборы. Они используются при разработке и контроле продукции практически всеми ведущими зарубежными светодиодными фирмами. В силу ценовых факторов ($> \$130000$), T3Ster мало доступен для большинства российских производителей, а тем более потребителей светодиодов. Разрабатываемый аппаратно-программный комплекс измерения тепловых сопротивлений должен быть значительно дешевле при сохранении большинства функциональных возможностей зарубежного аналога. Использование разрабатываемого аппаратно-программного комплекса, теоретических и экспериментальных методов исследования температурных полей в мощных светодиодах должно обеспечить на стадии разработки приборов оптимизацию их конструкции и повышение энергетических характеристик, а при производстве и эксплуатации - определение допустимых режимов работы, отбраковку потенциально ненадежных образцов, что в совокупности, означает ощутимый экономический эффект.

Текущие результаты проекта

1. На основе разработанных математических моделей распределения плотности тока, температуры и ближнего поля электролюминесценции в излучающих InGaN/GaN кристаллах с квантоворазмерной активной областью (с применением пакета программ Simuled) были рассчитаны указанные распределения для мощных светодиодов наиболее распространенных "флип-чип", "face-up" и "вертикальной" конструкций с различной геометрией контактов. Анализ профилей распределения плотностей тока показал, что неравномерность поперечной плотности тока резко возрастает, начиная с определенных уровней возбуждения $\sim 70 \text{ A/cm}^2$. Скорость тепловыделения в активной области примерно пропорциональна плотности тока с некоторым отклонением от линейности, связанным с вариациями по площади внутреннего квантового выхода η_i и прямого напряжения на p-n-переходе U_f . Тем не менее, расчетное распределение температуры разогрева, заметно более однородно, чем распределение плотности тока. Распределение ближнего поля электролюминесценции рассчитывалось в модели трассировки лучей с учетом зависимости внутреннего квантового выхода излучения в данной точке от плотности тока и температуры в ней. Установлено, что из-за роста локальной плотности тока вблизи контактных площадок и сопутствующего локального перегрева, квантовый выход излучения примерно

на 10-15% ниже по сравнению со случаем равномерного токового распределения.

2. Математическая модель идентификации параметров тепловых цепей светодиодов основывается на представлении теплового импеданса в виде суммы тепловых импедансов отдельных слоев конструкции, представляемых по модели Фостера в виде параллельно включенных тепловых сопротивлений и теплоемкостей слоев (RC-звеньев). Расчет параметров элементов тепловых цепей состоит в решении системы уравнений, составленной для характерных точек на частотных зависимостях модуля и фазы теплового импеданса прибора. Разработана компьютерная программа идентификации параметров тепловой модели полупроводникового прибора. Разработаны алгоритмы идентификации параметров 1-, 2- и 3-х звенных тепловых цепей СД в приближении моделей Фостера и Кауэра по результатам измерения частотных тепловых характеристик, то есть зависимости амплитуды и фазы изменения температуры перехода при нагреве прибора мощностью, изменяемой по заданному закону. Проведены оценки погрешности и рассмотрены варианты отличий реальных тепловых цепей от идеальных. Разработанные алгоритмы положены в основу работы экспериментального образца аппаратно-программного комплекса (ЭО АПК).

3. Разработаны рабочие варианты программы управления работой ЭО АПК с использованием широтно-импульсной модуляции греющей мощности для контроля и анализа тепловых характеристик мощных полупроводниковых излучателей по алгоритмам идентификации параметров тепловых цепей. Оформлена соответствующая программная документация.

4. Разработана лабораторная методика экспериментального исследования температурных полей (температурный мэппинг) с помощью ИК-тепловизионной микроскопии в диапазоне длин волн 2.5-3 мкм совместно с исследованием ближнего поля собственной электролюминесценции в видимом спектральном диапазоне с применением оптической микроскопии. Получены детальные картины профилей распределения температуры и яркости излучения по площади p-n-перехода для различных конструкций излучающих кристаллов.

5. Разработана лабораторная методика измерения тепловых сопротивлений мощных СД с учетом оптического охлаждения по переходным тепловым характеристикам при ступенчатой форме греющего тока с использованием температурочувствительного параметра – прямое напряжение на p-n-переходе U_f . Аппаратурной базой методики являются: Thermal Thester T3Ster и LED Measurement System OL770.

6. С применением разработанной методики (п.4) получен значительный объем данных по тепловому сопротивлению СД различных конструкций и отдельных элементов, входящих в их конструкцию (собственно излучающий кристалл, плата-носитель, адгезив и др.). Для ряда конструкций установлены критические элементы «bottleneck», вносящие доминирующий вклад в общее тепловое сопротивление. Установлена зависимость теплового сопротивления от уровня возбуждения и предложена оценка по крутизне этой зависимости неоднородности распределения плотности тока и мощности. Для сравнительного анализа и оценки достоверности результатов были

проведены измерения теплового сопротивления образцов СД с другим способом возбуждения греющей мощности – ШИМ, получена хорошая воспроизводимость и согласованность результатов.

7. Сопоставление и анализ экспериментальных и расчетных картин токо-, тепло- и светораспределения позволили осуществить верификацию математических моделей; получено хорошее согласование экспериментальных и теоретических результатов.