

Система теплоотвода приемо-передающего модуля СВЧ-диапазона на принципе адиабатического расширения газа

Пяточкин М.Д., к.т.н., *adress@company.ru*

Баранов Г.В., к.ф.-м.н., *adress@company.ru*

Болгов С.Ю., *adress@company.ru*

Панасенко П.В., д.т.н., *adress@company.ru*

АО «НИИМЭ»

124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Рассмотрены особенности теплоотвода для различных конструктивов приемо-передающих модулей (ППМ). Предложена система теплоотвода СВЧ-модуля, основанная на принципе адиабатического расширения газа в расширяющемся канале внутри металлического основания СВЧ-модуля или кремниевого интерпозера и обладающая сравнимой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости, но отличающаяся простотой реализации и компактностью.

Ключевые слова: СВЧ приемо-передающий модуль; кремниевая коммутационная плата; TSV-интерпозер; адиабатическое расширение газа.

Вопросы генерации тепла и его эффективного отвода за границы электронных блоков являются злободневными для различной аппаратуры, но особо остро стоят для электроники СВЧ-диапазона, где мощность выходных каскадов усилителей на основе GaAs или GaN может составлять до 100 Вт и даже выше, а коэффициент полезного действия – порядка 20–50% [1]. Конструктивно-технологический базис СВЧ-модулей на основе кремниевого интерпозера позволяет кратно снизить габариты СВЧ-модуля для возможности повышения диапазона рабочих частот в интересах развития современных телекоммуникационных и радиолокационных приложений, а кроме того, обеспечивает гибкость в реализации конструктивных решений систем теплоотвода, требования к которым возрастают в таких малогабаритных изделиях, что безусловно требует тщательных исследований.

Основные системы теплоотвода в ППМ включают пассивные и активные решения. К пассивным относятся теплопроводящие металлические основания, термоинтерфейсы, тепловые трубки в низкотемпературной совместно обжигаемой керамике (LTCC), их теплоотвод ограничен количеством теплостоков и не для всех задач имеет удовлетворительные характеристики [2]. Активные системы включают принудительное воздушное охлаждение с использованием вентиляторов, жидкостное охлаждение с циркуляцией хладагента. Традиционные методы охлаждения, такие как воздушное или жидкостное охлаждение, часто оказываются недостаточно эффективными в условиях ограниченного пространства и высокой плотности компонентов. Одним из альтернативных подходов к организации систем теплоотвода, предложенным в данной работе, является охлаждение ППМ за счет адиабатического расширения газа, протекающего в объеме Si-интерпозера или металлического основания. Предложенный метод позволяет эффективно снижать температуру активных элементов ППМ, что особенно важно для повышения их надежности и производительности. Проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

В основе этого метода лежит принцип адиабатического расширения газа, когда процесс теплообмена с окружающей средой практически отсутствует. Процесс включает сжатие газа компрессором, что повышает его температуру и давление, затем адиабатическое расширение сжатого газа через сопло, что приводит к резкому падению температуры. Охлажденный газ используется для отвода тепла от электронных компонентов, и цикл повторяется.

Конструкция предлагаемой системы включает компрессор, теплообменник, сопло или расширительное устройство, регулятор потока и рабочий газ. Преимуществом этой системы являются высокая эффективность, экологичность, компактность, надежность и возможность работы в широком диапазоне температур. Блок-схема системы эффективного теплоотвода, построенной на принципе адиабатического расширения газа, приведена на рис. 1.

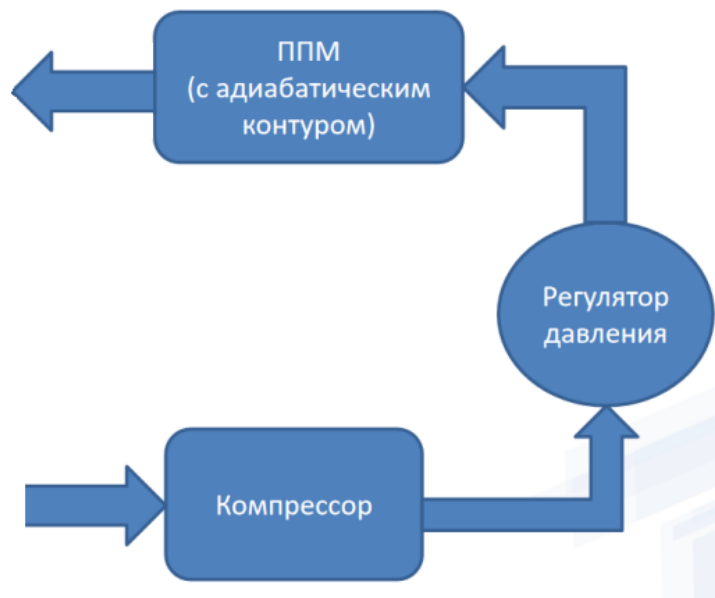


Рис. 1. Блок-схема системы охлаждения ППМ, основанной на адиабатическом расширении газа

Адиабатическое расширение газа

Адиабатическое расширение газа — это процесс, при котором газ расширяется без теплообмена с окружающей средой. Согласно первому закону термодинамики, при адиабатическом расширении внутренняя энергия газа уменьшается, что приводит к снижению его температуры. Этот эффект может быть использован для охлаждения активных элементов ППМ.

Основное уравнение адиабатического процесса описывается следующим образом [58]:

$$TV^{(\gamma-1)} = \text{const},$$

где P — давление газа, V — объем газа, γ — показатель адиабаты (отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме).

Температура газа после адиабатического расширения может быть рассчитана по формуле

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

где T_1 и T_2 — начальная и конечная температуры газа, V_1 и V_2 — начальный и конечный объем.

Экспериментальная часть: исследование влияния геометрии и формы канала на эффективность адиабатического охлаждения

Для экспериментального подтверждения эффективности охлаждения за счет использования эффекта адиабатического охлаждения газа было изготовлено латунное основание с различной геометрией и формой расширяющихся каналов: одно конусовидной формы, два — ступенчатой и одно линейное без расширения. Диаметры входных отверстий — 2 мм, выходных от — 2 до 8 мм (таблица 1). Сжатый воздух под давлением 6 атм подавался через герметичный штуцер на вход каналов, и с использованием термопары измерялась динамика изменения температуры основания. В качестве источника тепла был взят корпусной транзистор *Infineon IRF3415S*, который был прижат к основанию прижимным механизмом. На транзисторе выделялось 12 Вт тепловой мощности. Для уменьшения теплопотерь между источником тепла и основанием использовалась серебряносодержащая термопаста с высокой теплопроводностью. Также для усиления эффекта

Моделирование теплового рассеяния. Верификация тепловой модели

Для исследования эффективности различных решений при адиабатическом охлаждении ППМ и адекватного моделирования протекающих в них тепловых процессов проводились разработка и верификация тепловой модели по результатам, полученным в ходе исследований.

Моделирование проводилось в САПР *COMSOL Multiphysics*. Были построены четыре варианта оснований с различной геометрией расширяющегося канала: одно конусовидной формы, два — ступенчатой и одно линейное без расширения. Диаметры входных отверстий — 2 мм, выходных — от 2 до 8 мм (таблица 2). При моделировании начальные условия задавались аналогично экспериментальным.

Таблица 1. Результаты моделирования влияния геометрии и формы канала на эффективность адиабатического охлаждения

Параметр	Основание № 1	Основание № 2	Основание № 3	Основание № 4
Форма канала	Ступенчатая	Ступенчатая	Конусовидная	Линейная
Входной диаметр канала, мм	2	2	2	2
Выходной диаметр канала, мм	8	4	4	2
Температура основания, °С	57,1	64,9	64,5	69,2
Разница температуры основания, °С	0	7,8	7,4	12,1
Относительный нагрев, %	0	13,7	13,0	21,2

Было проведено исследование влияния других газов (например, гелия, азота, аргона и др.) на эффективность охлаждения. Эффективность охлаждения газа при адиабатическом расширении зависит от внутренних характеристик самого газа, которые определяют, насколько сильно он может охладиться и как эффективно охладить окружающие объекты (таблица 6). Рассмотрим основные характеристики газа, влияющие на его способность к охлаждению.

1. Чем ниже молекулярная масса газа, тем выше скорость его расширения и тем ниже достигаемая температура после адиабатического расширения. Легкие газы (например, водород $M = 2$ г/моль или гелий $M = 4$ г/моль) имеют меньшую инерцию и могут быстрее выполнять работу при расширении, что приводит к большему снижению их внутренней энергии и температуры.
2. Показатель адиабаты определяет степень изменения температуры газа при расширении. Моноатомные газы ($\gamma \approx 1,67$) охлаждаются сильнее, чем диатомные ($\gamma \approx 1,4$) или многоатомные ($\gamma < 1,4$) газы, так как у моноатомных газов меньше степеней свободы для распределения энергии.
3. Теплоемкость газа определяет, сколько энергии необходимо затратить для изменения его температуры. Низкая теплоемкость позволяет газу быстрее терять энергию и охлаждаться при расширении. Однако слишком низкая теплоемкость может ограничить способность газа поглощать тепловую энергию от охлаждаемого объекта.
4. Теплопроводность газа (λ) определяет, насколько быстро он может передавать свой холод охлаждаемому объекту.

Подведем итог по выбору наиболее эффективного газа для адиабатического охлаждения:

- гелий – лучший выбор для экстремального охлаждения благодаря низкой молекулярной массе, высокой теплопроводности и инертности, однако дорог и ограничен в доступности;
- аргон хорош для среднетемпературных применений, но менее эффективен из-за высокой молекулярной массы; более доступен, чем гелий;
- азот – экономичный и безопасный вариант с умеренной эффективностью, широко используется в промышленности;
- водород – наиболее эффективный газ для охлаждения благодаря низкой молекулярной массе и высокой теплопроводности, однако опасен из-за воспламеняемости;
- сжатый воздух – самый доступный и простой в использовании газ, но менее эффективен из-за высокой молекулярной массы и относительно низкой теплопроводности.

Выбор конкретного газа зависит от требуемой температуры, бюджета, условий безопасности и технологических возможностей.

Выводы

Предложена система теплоотвода СВЧ-модуля, основанная на принципе адиабатического расширения газа в расширяющемся канале внутри металлического основания СВЧ-модуля и обладающая сравнимой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости, но отличающаяся простотой реализации и компактностью. Проведенное исследование демонстрирует перспективность использования адиабатического расширения газа для охлаждения прямо-передающих модулей. На основе экспериментальных данных и численного моделирования были выявлены оптимальные геометрические параметры каналов и материалы для достижения максимального снижения температуры. Результаты

исследования могут быть использованы для разработки компактных систем охлаждения ППМ, особенно в условиях ограниченного пространства.

Было определено, что с целью добиться максимального охлаждения при адиабатическом расширении газа необходимо учитывать несколько ключевых факторов и оптимизировать их. Основные способы увеличения эффективности охлаждения:

- 1) увеличение потока газа;
- 2) подборка эффективного газа с низкой молекулярной массой и высокой теплопроводностью;
- 3) более высокий коэффициент расширения канала;
- 4) оптимизация формы канала;
- 5) увеличение площади боковой поверхности канала.

Был предложен и смоделирован наиболее эффективный вариант теплоотвода на основе цилиндрических расширяющихся каналов с дополнительными ребрами, сравнимый по эффективности с водяным охлаждением, но обладающий более простой реализацией и меньшими габаритами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00278, <https://rscf.ru/project/25-21-00278/>

Литература

1. Красников Г.Я., Панасенко П.В., Волосов А.В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ-элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
2. Панасенко П.В., Волосов А.В., Ионов А.С., Красников Г.Я., Петров А.В. Малогабаритные мощные приемопередающие модули X-диапазона для АФАР // Наноиндустрия. – Спецвыпуск 4s, том 13 (99). — С. 404–406.

Heat dissipation system for a transceiver module based on the principle of adiabatic gas expansion

Pyatochkin M. D.¹, Ph.D., mpyatochkin@niime.ru

Baranov G. V.¹, Ph.D., gbaranov@niime.ru

Bolgov S.Y.¹, sbolgov@niime.ru

Panasenko P. V.¹, Sc.D., ppanasenko@niime.ru

¹ Molecular Electronics Research Institute, JSC

6/1 Akademika Valieva str., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The features of heat dissipation for various designs of microwave transceiver modules (TRM) are considered. A heat dissipation system for a microwave module is proposed, based on the principle of adiabatic gas expansion in an expanding channel within the metal base of the microwave module. This system demonstrates comparable efficiency to liquid cooling systems, while offering simplicity of implementation and compactness.

Keywords: RF transmit/receive modules; silicon interconnection board; TSV-interposer; adiabatic gas expansion.