УДК 621.382.31

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ МОЩНЫХ GAN СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

А. О. Климов, К. А. Иванов

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Представлены результаты моделирования температурного распределения канала GaN транзистора, рассеивающего тепловую мощность при наличии воздушных полостей в слое припоя AuSn между кристаллом и медным держателем. Рассчитано тепловое сопротивление транзистора. Описан способ монтажа кристаллов, исключая образование пустот в слое припоя AuSn.

Ключевые слова: GaN СВЧ транзистор, тепловая модель, канал, пустота, температурное распределение, тепловое сопротивление, монтаж кристалла, рентгеновский снимок

Сведения об авторах: Климов Алексей Олегович, klimov_ao@pulsarnpp.ru; Иванов Кирилл Андреевич, ivanov_ka@pulsarnpp.ru

MOUNT TECHNIQUE OF GAN POWER MICROWAVE TRANSISTORS

A. O. Klimov, K. A. Ivanov

«S&PE «Pulsar» JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

The results of modeling the temperature distribution of the GaN transistor channel, dissipating thermal power in the presence of air cavities in the AuSn solder layer between the chip and the copper heat spreader are presented. The thermal resistance of the transistor is calculated. A chip mount method, excluding the formation of voids in AuSn solder layer, is described.

Keywords: GaN power transistor, thermal model, channel, void, temperature distribution, thermal resistance, die attach, X-ray image

Data of authors: Klimov Aleksey Olegovich, klimov_ao@pulsarnpp.ru, Ivanov Kirill Andreevich, ivanov_ka@pulsarnpp.ru

Введение

В настоящее время в твердотельных СВЧ усилителях мощности все больше применяются транзисторы на основе AlGaN/GaN/SiC гетероструктур. Они обладают существенно лучшими характеристиками в сравнении с приборами на основе GaAs [1].

Большие значения пробивных напряжений (более 100 В) делают GaN транзисторы самыми привлекательными для использования в импульсных усилителях мощности. Следовательно, основным физическим механизмом, ограничивающим уровень выходной мощности, является перегрев активной области СВЧ транзистора [2]. На рис. 1 показана фотография GaN кристалла, вышедшего из строя вследствие теплового пробоя структуры.

Рис. 1

Тепловой пробой GaN транзистора
с $W_3 = 5$ мм

Эксплуатационная надёжность мощных СВЧ транзисторов определяется главным

образом их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии монтажа кристалла транзистора в корпус. Проблема качественного бездефектного соединения кристалла с корпусом до сих пор остаётся актуальной [3].

Многочисленные рентгенографические исследования показали, что после монтажа GaN СВЧ транзисторов в вакуумной печи оплавления процент заполнения пустотами составляет до 50 % площади кристалла (рис. 2).

Рис. 2

Рентгеновский снимок
GaN транзистора с $W_3 = 5$ мм

В статье представлены результаты математического моделирования температурного распределения канала GaN транзистора при наличии воздушных полостей в слое припоя AuSn между кристаллом и медным держателем. В ходе моделирования изменялись размер, количество и вертикальное расположение воздушных

полостей по всей толщине припоя под активной областью кристалла; для каждого варианта рассчитано тепловое сопротивление транзистора. Также описан способ монтажа кристаллов, исключающий образование пустот под кристаллом.

Постановка математической задачи и алгоритм решения

Внешний вид тепловой модели GaN ПТБШ в корпусе представлен на рис. 3.

Рис. 3

Внешний вид тепловой модели

Задача описывается трёхмерным уравнением теплопроводности в твёрдом теле в стационарной постановке:

$$\nabla(\lambda(x, y, z, T) \cdot \nabla T) = s_c + s_p \cdot T, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность, зависящая от пространственных координат и самого решения (температуры); T – поле температур ($T = T(x, y, z)$); s – линеаризованный источник член ($s_p \leq 0$); ∇ – оператор Гамильтона.

Граничные условия и правая часть уравнения описываются в статье [4].

Для данного расчёта изменены следующие условия:

1. На нижнем основании корпуса устанавливается условие Дирихле $T = 65^\circ\text{C}$.
2. Модель состоит из 4 ячеек, в каждой из которых содержится 10 затворов.
3. Тепловая мощность выделяется между затвором и стоком в областях, представляющих собой параллелепипеды с размерами $1 \times 0.1 \times 125$ мкм.

Подложка тепловой модели состоит из слоёв, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Материал и толщина слоёв корпусированного транзистора

Материал слоя	Толщина, мкм
GaN	3
SiC	100
AuSn/air	25
Cu	150
AuSn	25
МД40	1600
идеальный теплоотвод	

В расчёте используются температурно-зависимые и пространственно-зависимые теплопроводности материалов на основе справочных данных.

Алгоритм нахождения теплового сопротивления кристалла состоял из построения расчётной сетки, сборки матрицы системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и решения СЛАУ с помощью алгебраического многосеточного метода.

В качестве расчётной сетки использована адаптивная локально измельченная сетка (АЛИС) [5] (рис. 4). Сборка матрицы СЛАУ реализована как поячеечная [6].

(27.5 Вт на весь кристалл).

Практический интерес представляло моделирование полостей в припое под кристаллом, так как пустоты под кристаллом

Рис. 4

АЛИС в сечении под кристаллом

В программе [7] для решения задачи теплопередачи используется классический агломеративный алгебраический многосеточный метод РУМБА_v0.14 [5, 8].

Тепловое сопротивление R_t канал–основание корпуса рассчитывалось по формуле:

$$R_t = \frac{(T_j - T_a)}{P_{diss}}, \quad (2)$$

где T_j – температура канала кристалла, °C; T_a – температура основания корпуса, °C; P_{diss} – рассеиваемая мощность, Вт.

Результаты моделирования

Для расчёта был выбран кристалл GaN ПТБШ с суммарной шириной затвора 5 мм при удельной тепловой мощности 5 Вт/мм

вносят основной вклад в R_t , на порядок превышающий вклад пустот под балочным держателем [9]. В реальном производстве обеспечение прижатия балки не составляет трудностей, в то время как кристалл имеет на поверхности воздушные мосты, что ограничивает возможности прикладывания давления.

Форма и размеры пустот выбирались исходя из рентгеноскопических исследований паяных слоёв под кристаллом. Значение диаметра пустот составляло 50, 100 и 200 мкм. Процент заполнения пустотами по отношению к площади кристалла при расчёте 8 % и 50 % (рис. 5). Толщина слоя эвтектического припоя Au80Sn20 равнялась 25 мкм. Результат моделирования для варианта без пустот представлен на рис. 6.

Рис. 5

Круглые полости под кристаллом (диаметр 200 мкм),
процент заполнения: а) 8 %, б) 50 %

Рис. 6

Температурное распределение активной области кристалла
для варианта без наличия пустот

Сначала было рассчитано значение теплового сопротивления транзистора при различном вертикальном положении пустот в слое припоя. Размеры пустот и геометрическое расположение вдоль

длины кристалла не менялись. Температурное распределение вдоль кристалла при различном вертикальном расположении трёх пустот диаметром 200 мкм и заполнении 8 % показано на рис. 7.

Рис. 7

Температурное распределение канала кристалла при различном вертикальном расположении пустот: Q_tU_p – толщина 5 мкм, верхняя часть припоя; Q_tH – толщина 25 мкм, на всю толщину припоя; Q_tD – толщина 5 мкм, нижняя часть припоя; Q_tC – толщина 5 мкм, центральная часть припоя

Результаты моделирования показали: оказывают существенного влияния на толщину, геометрические размеры и вертикальное расположение полостей при изменении теплового сопротивления кристалла (не более 1 %) (табл. 2). суммарной одинаковой площади не

Таблица 2

**Зависимость теплового сопротивления от вертикального
расположения пустоты в припое**

Идентификатор варианта	R_t , °C /Вт
Без полостей	7.04
Три полости по всей высоте припоя Q_tH ($d = 200$ мкм)	7.45
Три полости толщиной 5мкм снизу припоя Q_tD ($d = 200$ мкм)	7.37
Три полости толщиной 5мкм сверху припоя Q_tU_p ($d = 200$ мкм)	7.4
Три полости толщиной 5мкм по центру припоя Q_tC ($d = 200$ мкм)	7.41

Далее было рассчитано значение теплового сопротивления транзистора при различном диаметре пустот и различной площади пустот относительно площади структуры кристалла. Дефекты занимали всю толщину припоя. Область расположения пустот различного диаметра не менялась. Температурное распределение вдоль кристалла транзистора для случаев различного количества и размера пустот показано на рис. 8.

По результатам расчёта увеличение теплового сопротивления канал–основание

корпуса при наличии воздушных полостей в припое (8 % и 50 % площади кристалла) составило 6 % и 17 % соответственно по сравнению с вариантом без полостей (табл. 3). На величину теплового сопротивления существенно влияет процент площади пустот по отношению к площади кристалла. Изменение количества и диаметра пустот при одинаковой суммарной площади не отражается на значении теплового сопротивления.

Рис. 8

Температурное распределение канала для случаев различного количества и размера пустот

Таблица 3

**Зависимость теплового сопротивления от различного
количества и размера пустот**

Идентификатор варианта	R_t , °C /Вт
Три полости по всей высоте припоя C_4H (диаметр 100 мкм)	7,16
Шесть полостей по всей высоте припоя C_4H (диаметр 100 мкм)	7,225
Двенадцать полостей по всей высоте припоя C_4H (диаметр 100 мкм) 8 % от площади кристалла	7,41
Три полости по всей высоте припоя C_4H (диаметр 50 мкм)	7,15
12 полостей по всей высоте припоя C_4H (диаметр 50 мкм)	7,20
48 полостей по всей высоте припоя C_4H (диаметр 50 мкм) 8 % от площади кристалла	7,44
18 полостей по всей высоте припоя C_4H (диаметр 200 мкм) 50 % от площади кристалла	8,2

Способ пайки дискретных полупроводниковых приборов к корпусу

В рамках работ по минимизации образования пустот в паяном слое был разра-

ботан способ пайки кристаллов дискретных полупроводниковых приборов к корпусу [10]. Данный способ исключил вероятность роста пустот по всей толщине припоя.

Рис. 9

Облуживание кристалла на поликоревой подложке

Рис. 10

Рентгеновский снимок области, в которой производилось облуживание обратной металлизации кристалла

Особенность способа заключается в том, что после предварительного облуживания в расплавленном припое при температуре 300 °С обратной металлизации кристалла на участке керамической платы с металлизацией Cu/Ni/Au без поднятия производится перемещение кристалла к полированной неметаллизированной поверхности, выдержка при охлаждении до 290 °С (рис. 9). Для захвата и перемещения кристалла используется инструмент, описанный в статье [3]. Далее с помощью поворота термостолика производится отрыв кристалла. Припой не смачивает неметаллизированную поверхность, следовательно при дальнейшем отрыве кристалл не скалывается. На рис. 10 показан рентгеновский снимок области, в которой производилось облуживание обратной металлизации кристалла. Красным контуром

обозначена неметаллизированная область, видно практически полное отсутствие следов припоя. После отрыва слой облуженной металлизации располагается равномерно по всей поверхности кристалла и имеет блестящий оттенок, повторяющий полированную поверхность. Далее производится поднятие и перемещение кристалла к месту предполагаемого соединения, прижим кристалла к основанию, на котором расплавлена преформа AuSn. Как показали опыты, при таком способе сборки ультразвуковая притирка даже не обязательна. Пайка проводится в среде защитной атмосферы.

На рис. 11 представлены рентгеновские снимки GaN кристалла, облуженного по новой технологии, и слоя пайки под этим кристаллом. Анализ снимков не показал наличие дефектов пайки в слое припоя.

Рис. 11

а – рентгеновский снимок GaN кристалла, облуженного по новой технологии;

б – рентгеновский снимок слоя пайки под GaN кристаллом

Выводы

Результаты моделирования показали важность исключения вероятности роста пустот во всем объеме припоя. В рамках работ по минимизации образования пустот в паяном слое был разработан способ пайки кристаллов дискретных полупроводниковых приборов к корпусу. Данный способ исключил вероятность роста пустот по всей толщине припоя.

Литература

1. Верхулевский, К. Новые возможности для GaN транзисторов от Microsemi / К. Верхулевский // Компоненты и технологии. – 2012. – № 9.
2. Васильев, А. Г. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках / А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: Техносфера, 2011. – 415 с.
3. Бенуни, И. С. Особенности монтажа GaN кристаллов СВЧ усилителей мощности / И.С. Бенуни, О.Ю. Дьяконница, А.О. Климов, Н.А. Павлюк-Мороз, Ал.В. Редька // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 3 (246). – С. 44-51.
4. Аболдуев, И.М. Исследование влияния геометрической конструкции активной области ПТБШ на его тепловой режим / И.М. Аболдуев, А.А. Дорофеев, К.А. Иванов, В.М. Миннебаев, Ан.В. Редька, А.В. Царев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – № 3 (250). – С. 25-31.
5. Карлыханов, Н. Г. Неявная схема решения нелинейного уравнения теплопроводности на квадратной адаптивной сетке / Карлыханов Н. Г., А.В. Уракова // VII Забабахинские научные чтения (Снежинск, 8-12 сентября 2003 г.) / Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский НИИ технической физики им. Акад. Е.И. Забабахина. – Снежинск, 2003. – С.1-15.
6. Рояк, М. Э. Сеточные методы решения краевых задачи математической физики: учеб.

- пособие для студентов III курса / М.Э. Рояк, Ю.Г. Соловейчик, Е.Р. Шурина; М-во общ. и проф. образования РФ Новосиб. Гос. техн. ун-т. – Новосибирск, Новосиб.гос. техн. ун-т, 1998. – 120 с.
7. Иванов К.А., Зубков А.М. Программа трёхмерного моделирования процесса тепломассопереноса. Свидетельство о государственной регистрации №2013660267 от 30.10.2013.
 8. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В. Н. Емельянов, А.Г. Карпенко. – М.: Физматлит, 2013. – 535 с.
 9. Груздов, В.В. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: Техносфера, 2016. – 327 с.
 10. Патент № RU 2636034C1 Российская Федерация, Н 01 L 21/58, В 23 К 1/20. Метод пайки дискретных полупроводниковых кристаллов на корпус / А.Х. Давыдов, А.О. Климов, Г.Д. Кравчук, Н.А. Павлюк-Мороз.
- References**
1. Verkhulevskiy K. New possibilities with microsemi GaN transistors // Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]. – 2012. – no. 9.
 2. Vasil'ev A. G., Kolkovskiy Yu. V., Kontsevoy Yu. A. SVCH pribory i ustrojstva na shirokazonnyh poluprovodnikah. – Moscow: Tekhnosfera, 2011. – 415 p.
 3. Benuni I. S., Dyakonitsa O. Yu., Klimov A. O., Pavlyuk-Moroz N. A., Redka Al. V. Features of microwave GaN power amplifier dies solder bonding // Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. – 2017. –no.3 (246). – pp. 44-51.
 4. Abolduev I. M., Dorofeev A. A., Ivanov K. A., Minnebaev V. M., Redka An. V., Tsarev A. V. Investigation of the effect of the Schottky FET active region design on its thermal behavior // Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. – 2018. –no. 3 (250). – pp. 25-31.
 5. Karlyhanov N. G., Urakova A. V. Neyavnaya skhema resheniya nelinejnogo uravneniya teploprovodnosti na kvadratnoj adaptivnoj setke // Russian Federal nuclear center. – 2003. – pp. 1-15.
 6. Royak M. H., Solovejchik Yu. G., Shurina E.P. Setochnye metody resheniya kraevykh zadach matematicheskoy fiziki. – Novosibirsk: NGTU, 1998. – pp. 21-47.
 7. Ivanov K. A., Zubkov A. M. The program of the three-dimensional modeling of heat and mass transfer. Certificate of state registration № 2013660267 of 30.10.2013.
 8. Metody uskoreniya gazodinamicheskikh raschyotov na nestrukturirovannykh setkakh / K.N. Volkov, V.N. Emelyanov et all. // Russian Foundation for Basic Research. – 2014. – 535 p.
 9. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V., Kontsevoy Yu. A. Kontrol novykh tehnologiy v tverdotel'noy SVCH elektronike. – Moscow: Tekhnosfera, 2016. – 327 p.
 10. Patent № RU2636034C1. H01L 21/58 B23K 1/20. 2017 Technique of discrete semiconductor crystals brazing to case / Davydov A. H., Klimov A. O., Kravchuk G. D., Pavlyuk-Moroz N. A.