

УДК 621.382.019.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА КРИСТАЛЛА ПТБШ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ В ПРИПОЕ

А. О. Климов

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

Проанализирован дефект наклона кристалла AlGaN/GaN/SiC транзистора после пайки на эвтектический сплав AuSn в вакуумной печи оплавления без приложения давления к кристаллу. Рассчитаны эквивалентные напряжения по Мизесу, возникающие в SiC подложке после приложения тепловой нагрузки в зависимости от наклона кристалла относительно равномерного положения. На основании полученных значений эквивалентных напряжений для каждого варианта положения кристалла рассчитан коэффициент надёжности модели. Обоснована важность недопущения смещения вертикального положения кристалла при его монтаже.

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*

THERMOMECHANICAL RESPONSE STUDY OF THE FET CRYSTAL CHANGING ITS VERTICAL ORIENTATION IN SOLDER

A. O. Klimov

JSC S&PE Pulsar, 105187, Moscow, Okrzhnoy 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*

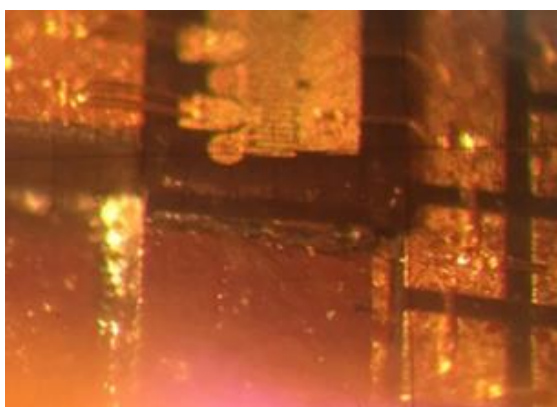
Author: *Klimov Aleksey Olegovich, klimov_ao@pulsarnpp.ru*

Введение

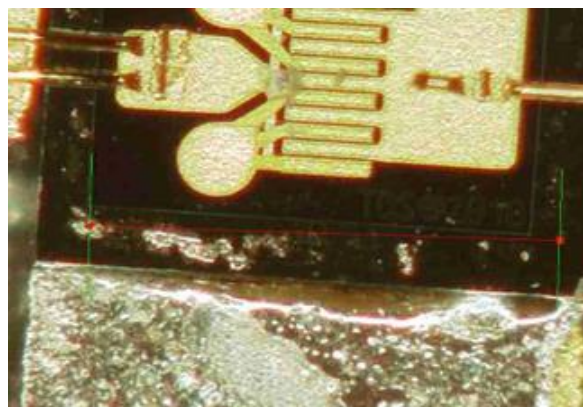
Использование кристаллов AlGaN/GaN/SiC СВЧ транзисторов в современной радиоаппаратуре сопряжено с необходимостью строгого контроля установки полупроводниковых кристаллов и последующей сборки с целью обеспечения безопасных тепловых режимов их работы [1-3]. Высокая удельная тепловая нагруженность мощных AlGaN/GaN/SiC СВЧ транзисторов требует особого подхода к обеспече-

нию теплосъёма – это и использование новых материалов оснований приборов [4], и контроль наличия пустот в паяных соединениях [5]. Вообще говоря, любые предупредительные меры, направленные на исключение дефектов сборки, крайне важны для мощных AlGaN/GaN/SiC СВЧ транзисторов.

Одним из некоторых визуально наблюдаемых дефектов монтажа приборов может быть нарушение вертикального поло-



a)



б)

Рис. 1

Вертикальный сдвиг кристалла

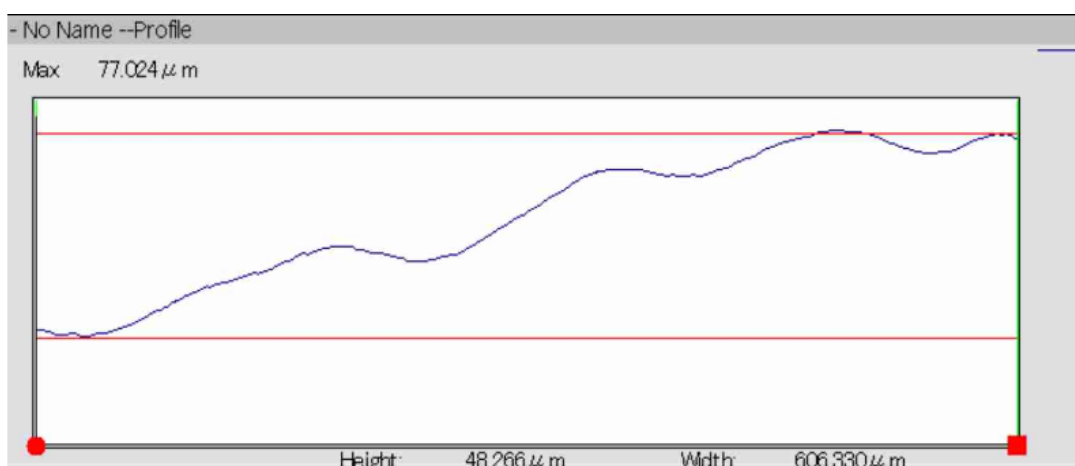


Рис. 2

Вертикальный сдвиг кристалла после пайки и измерение смещения кристалла по высоте, $\Delta h \approx 50$ мкм

жения кристалла после пайки, часто прослеживающееся после пайки кристаллов без прижима. Нестабильная толщина слоя пайки вдоль геометрической длины кристалла ухудшает теплоотвод в месте, где толщина соединения максимальна, увеличивает напряжение в месте, где толщина соединения минимальна. Также нарушение планарности посадки кристалла ухудшает качество последующего УЗ монтажа проволок и в некоторых случаях делает его невозможным [6].

На рис. 1а, б показаны фотографии участка кристалла, на котором производилось измерение высот вдоль выделенной линии. На рис. 2 показан график максимального измеренного смещения кристалла по высоте. Видно, что разница по высоте между гранями кристалла составляет почти 50 мкм.

Дефект вертикального наклона кристалла после пайки приводит к нестабильной толщине слоя припоя между кристаллом и основанием. Постоянная же толщина припоя реализуется через минимизацию отклонения угла от обоих краёв кристалла.

Большой интерес представляет оценка напряжений, возникающих в кристалле при разогреве в зависимости от различных вариантов расположения кристалла в пространстве, а также их влияние на потенциальную надёжность структуры кристалла [7].

Проведён расчёт эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих в AlGaIn/GaN/SiC кристалле после пайки в вакуумной печи оплавления без прикладывания давления к кристаллу. Механические напряжения развиваются из-за термических напряжений в системе. Стандарт-

ный способ выражения разнонаправленных напряжений есть их сведение к эквивалентному напряжению, также известному как напряжение по Мизесу. Данный расчёт позволил оценить термомеханический отклик кристалла на изменение его вертикальной ориентации в пространстве.

Значения и характер распределения напряжений в кристалле определялись с помощью расчёта НДС (напряжённо-деформированного состояния) модели кристалла с дефектом смещения грани или угла методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

В трёхмерном случае связь тензоров деформации и напряжения, а также поля температуры имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{11} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \\ \sigma_{12} &= 2\mu\varepsilon_{12}; \\ \sigma_{22} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{22} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \\ \sigma_{23} &= 2\mu\varepsilon_{23}; \\ \sigma_{33} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{33} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \\ \sigma_{31} &= 2\mu\varepsilon_{31}; \\ (\theta &= \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}), \end{aligned} \quad (1)$$

где ε – симметричный тензор деформации, σ – симметричный тензор напряжения.

Поле температур, участвующее в системе уравнений (1), находится из уравнения теплопередачи:

где ρ – плотность кг/м³; C_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении Дж/(кг·К); t – время, с; T – температура, К; $\lambda(T) = (\lambda_x(T), \lambda_y(T), \lambda_z(T))$ – ортотропная

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} + s_c + s_p T \quad (2)$$

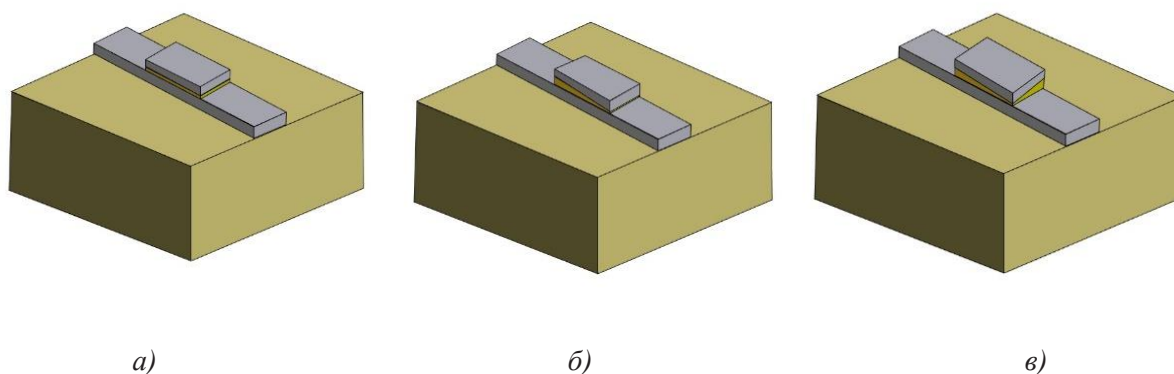


Рис. 3

Наклон кристалла после пайки без прижима

теплопроводность, возможно, зависящая от температуры; s – объёмная плотность источников тепла Вт/м³ (s_c – постоянная составляющая, $s_p < 0.0$ – линеаризованная составляющая при зависимости мощности тепловыделения от температуры).

Напряжения Мизеса или эквивалентные напряжения вычисляются по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+6(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2)}{2}} \quad (3)$$

Оценивались напряжения, возникающие в кристалле AlGaIn/GaN/SiC при стабильном рассеивании мощности в зависимости от пространственного расположения кристалла относительно основания. Задача решалась в несвязной постановке. Это означает, что сначала искалось распределение температур, потом по известному распределению определялось напряжённо-деформированное состояние.

Рассмотрены три варианта возможного положения кристалла после пайки: стабильная толщина припоя (угол отклонения

равен 0) – рис. 3а, непостоянная толщина припоя (наклон либо стороны кристалла, либо одного из углов) – рис. 3б, в.

На рис. 4 представлена расчётная модель. Кристалл установлен на эвтектический сплав AuSn к металлическому пьедесталу из псевдосплава МД-40. Пьедестал также устанавливается на основание из МД-40 припоем AuSn. Расчёт производился при условии отсутствия пустот в слое AuSn под кристаллом, то есть при температуре активной структуры примерно 260 °С.

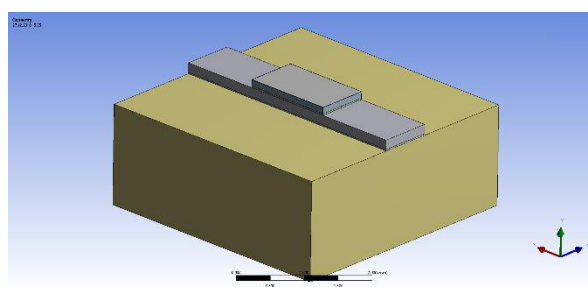


Рис. 4

Изображение модели

Напряжения в AlGaIn/GaN слое существенно не изменялись, поэтому дальнейший

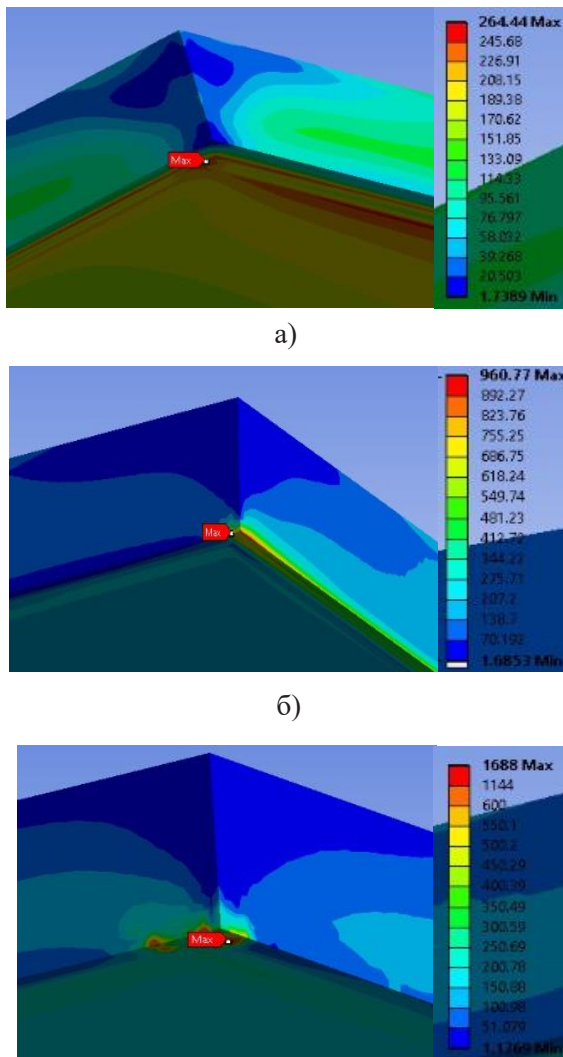


Рис. 5

Распределение основных напряжений в кристалле при непрерывном рассеивании мощности для случая равномерной постоянной толщины припоя – а; непостоянной толщины – б (грань), в (угол)

анализ посвящён изменению напряжений в SiC слое. На рис. 5 показано трёхмерное распределение основных термических напряжений в SiC слое.

На основании полученных значений эквивалентных напряжений для каждого варианта положения кристалла рассчитан коэффициент надёжности (safety factor). Коэффициент надёжности определяет, насколько фактически проектируемая структура

сможет выдерживать индуцированное тепловое напряжение. Чем выше коэффициент надёжности, тем меньше вероятность потенциального разрушения структуры; коэффициент надёжности < 1 показывает очень низкую надёжность структуры [9].

$$\text{Safety factor} = \frac{S_{limit}}{\sigma_e}, \quad (4)$$

где S_{limit} – предел текучести материала, МПа (3440 МПа для SiC) [10]; σ_e – эквивалентное напряжение, МПа.

В таблице представлено сравнение эквивалентных напряжений и коэффициентов надёжности карбид-кремниевое кристалла при постоянной и непостоянной толщине припоя.

Таким образом, надёжность кристалла SiC ухудшается максимально в 6,5 раза при максимальном наклоне угла и в 3,6 раза при максимальном наклоне грани. Сделан вывод, что смещение плоскости кристалла значительно увеличивает напряжения в SiC в областях с утончающимся слоем припоя, что в свою очередь означает потенциальное развитие механических разрушений структуры при циклических нагрузках. При стабильной толщине припоя напряжения лежат в пределах нормы.

Выводы

Разработана конечно-элементная модель дефекта наклона кристалла AlGaIn/GaN/SiC транзистора в эвтектическом припое AuSn в программном комплексе ANSYS.

Проведён расчёт внутренних термомеханических напряжений в SiC кристалле при различной ориентации кристалла после пайки без приложения усилия к кристаллу. Показано, что коэффициент надёж-

Таблица

Сравнение коэффициента надёжности кристалла в зависимости от его вертикальной ориентации в пространстве

Параметр	Постоянная толщина припоя		Непостоянная толщина (наклон грани)		Непостоянная толщина (наклон угла)	
	Эквивалентное напряжение, МПа	Коэффициент надёжности	Эквивалентное напряжение, МПа	Коэффициент надёжности	Эквивалентное напряжение, МПа	Коэффициент надёжности
SiC	264	13	960	3,6	1688	2

ности для модели кристалла AlGaIn/GaN/SiC транзистора снижается более чем в 6 раз при максимальном наклоне угла и почти в 4 раза при максимальном наклоне грани.

Показано, что смещение плоскости кристалла значительно увеличивает напряжения в областях SiC подложки с утончающимся слоем припоя (с 264 до 1688 МПа), что в свою очередь приведёт к развитию механических разрушений полупроводниковой структуры при циклических нагрузках.

Литература

- Аболдуев, И.М. Разработка микромодуля 20-ваттного усилителя мощности X-диапазона / И.М. Аболдуев, А.Ю. Евграфов, В. М. Миннебаев, Ю.О. Никольская, А.В. Редька, А.В. Царев // Наноиндустрия. – 2017. – № S (74). – С. 517-523.
- Груздов, В.В. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторах / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 12-2. – С. 201-208.
- Васильев, А.Г. SiGe и GaN СВЧ приборы для приёмопередающих модулей / А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, С.В. Корнеев, А.А. Дорофеев, В.М. Миннебаев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2 (223). – С. 5-10.
- Золотарев, А.А. Исследование теплового коэффициента линейного расширения металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния / А.А. Золотарев, Ан.В. Редька // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2019. – № 1 (252). – С. 48-56.
- Климов, А.О. Технология сборки мощных GaN СВЧ транзисторов / А.О. Климов, К.А. Иванов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2019. – № 1 (252). – С. 57-67.
- Randy Hamm, Ken Peterson Maintaining low voiding solder die attach for power die while minimizing die tilt. International Symposium on Microelectronics:

- FALL 2015, vol.2015, no.1, pp.000848-0008555.
7. Jennifer J. Fabular, Hannah Erika R. Ducusin, Manolo G. Mena, Louis Angelo M. Danao Analysis of die tilt effect on the stress distribution in a small outline transistor using finite element method. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2018, vol. II WCE 2018, July 4-6. – URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewjrnP3vqKDiAhXKs4sKHe9bAqwQFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.iaeng.org%2Fpublication%2FWCE2018%2FWCE2018_pp662-666.pdf&usg=AOvVaw35dJW2cyyx4LE11kYSg_t
 8. Von Mises Criterion (Maximum Distortion Energy Criterion) Strength (Mechanics) of Materials – URL: https://www.engineersedge.com/material_science/von_mises.htm
 9. Balakrishnan Manoj Evaluation of thermal management solutions for power semiconductors. – URL: <http://theses.whiterose.ac.uk/16071/>
 10. TYoungs modulus – Tensile and yield strength for common materials. – URL: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html
 2. Gruzдов V.V. Kolkovskiy Yu.V., Minnebaev V.M. Elektronniye bloki na osnove AlGaN/GaN/SiC SVCH geterotranzistorov [Electronic modules based on microwave AlGaN/GaN/SiC heterotransistors]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki.* 2016, no. 12-2, pp.201-208.
 3. Vasilyev A.G., Kolkovskiy Yu.V., Korneev S.V., Dorofeev A.A., Minnebaev V.M. SiGe i GaN SVCH pribory dlya priemopere dayushchikh moduley [Microwave SiGe and GaN devices for transceiver modules]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2009, no. 2(223), pp.5-10.
 4. Zolotarev A.A., Redka An.V. Issledovaniye teplovogo koeffitsienta lineynogo rashireniya metallomatrichnogo kompozita na osnove alyuminiya i karbida kremniya [Research of the thermal coefficient of linear expansion of the metal-matrix composite based on aluminium and silicon carbide]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2019, no. 1(252), pp.48-56.
 5. Klimov A.O., Ivanov K.A., Tekhnologiya sborki moshchnykh GaN SVCH tranzistorov [Mount technique of GaN power microwave transistors], *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2019, no. 1(252), pp.57-67.
 6. Randy Hamm, Ken Peterson Maintaining low voiding solder die attach for power die while minimizing die tilt. *International Symposium on Microelectronics: Fall 2015*, vol.2015, no.1, pp.000848-0008555.
 7. Jennifer J. Fabular, Hannah Erika R. Ducusin, Manolo G. Mena, Louis Angelo M.

References

1. Abolduev I.M., Evgrafov A.Yu., Minnebaev V.M., Nikolskaya Yu.O., Redka A.V., Tsarev A.V. Razrabotka mikro-modulya 20-vattnogo usilitelya moshchnosti X-diapazona [The design of X-band 20-W power amplifier micro-module]. *Nanoindustriya*, 2017, no. S(74), pp.517-523.

- Danao Analysis of die tilt effect on the stress distribution in a small outline transistor using finite element method. *Proceedings of the World Congress on Engineering* 2018, WCE 2018, vol. II, available at https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjrnP3vqKDiAhXKs4sKHe9bAqwQFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.iaeng.org%2Fpublication%2FWCE2018%2FWCE2018_pp662-666.pdf&usg=AOvVaw35dJW2cyux4LE11lkYSg_t (accessed_)
8. Von Mises Criterion (Maximum Distortion Energy Criterion) Strength (Mechanics) of Materials. Available at: https://www.engineersedge.com/material_science/von_mises.htm (accessed_)
 9. Balakrishnan Manoj Evaluation of thermal management solutions for power semiconductors. Available at: <http://theses.whiterose.ac.uk/16071> (accessed_)
 10. TYoungs modulus – Tensile and yield strength for common materials. Available at: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html (accessed_).