

УДК 621.382.3

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ GAN СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

М.Е. Гусев

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

Проведено сопоставление различных термографических методов контроля тепловых полей полупроводниковых приборов и указана соответствующая аппаратура, используемая для этой цели. Отмечено, что важнейшим параметром аппаратуры является разрешающая способность контроля по температуре и по размерам контролируемых тепловых полей. Приведены схема разработанной аппаратуры и примеры контроля тепловых полей GaN СВЧ гетеротранзисторов. Отмечено, что из-за высокой прозрачности таких материалов, как GaN и SiC, в широкой области ИК-спектра возникают трудности при попытке определения температуры в канале между истоком и стоком GaN гетеротранзисторов.

Ключевые слова: тепловые поля транзисторов, аппаратура для контроля тепловых полей, проблема контроля температуры в приповерхностной области GaN гетеротранзисторов

Сведения об авторах: Гусев Михаил Евгеньевич, gusev@pulsarnpp.ru

MICROWAVE GAN HEMT THERMAL FIELD MONITORING

M.E. Gusev

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr.27

Comparison of various thermographic methods for monitoring the thermal fields of semiconductor devices is given in this paper, and the corresponding equipment is described. It is highlighted that the most critical equipment parameters are: monitoring resolution of temperature and thermal field's size. The scheme of the developed equipment is given, as well as examples of microwave GaN transistors thermal field monitoring. It is noted that high transparency of such materials as GaN and SiC in wide IR range is causing problems in monitoring the channel temperature between the source and the drain of GaN HEMT.

Keywords: transistor thermal field, thermal field monitoring equipment, issues of temperature monitoring of GaN HEMT near-surface area

Author: Gusev Mikhail Evgenievich, gusev@pulsarnpp.ru

Введение

ИК-излучение широко используется для контроля тепловых полей изделий электронной техники, в частности, кристаллов транзисторов, смонтированных без крышки корпуса.

Аппаратура для контроля тепловых полей кристаллов полупроводниковых приборов применяется уже достаточно давно. Так, в работе [1] приведено описание телевизионной аппаратуры с видиконом на основе кремния, легированного цинком и охлаждаемого до температуры жидкого азота. При этом использовался специальный объектив из сапфира. Аппаратура позволяла контролировать тепловые поля кристаллов мощных кремниевых транзисторов. Однако качество объектива и диапазон чувствительности видикона не позволял контролировать тепловые поля с высокой разрешающей способностью.

В сообщении [2] речь шла об использовании инфракрасной камеры FLIRSC5700, которая благодаря возможности присоединения различных объективов ИК могла становиться ИК микроскопом с разрешением до 3 мкм на один пиксель.

Детектор формата 640 x 512 пикселей с размером пикселя 15 x 15 мкм изготовлен из материала КРТ (кадмий, ртуть, теллур). Детектор является счётчиком фотонов и обеспечивает высокую чувствительность, при этом сохраняя широкий динамический диапазон и линейность, имеет спектральную чувствительность 3.7-4.8 мкм. Его температура поддерживается на уровне – 200 °С встроенным охладителем, работающим по циклу Стирлинга. Частота кадров является программируемой и составляет 1–115 Гц в полнокадровом режиме и до

2.9 кГц при уменьшенном разрешении. Время интеграции регулируется от 0.1 до 20000 мкс с шагом 0.1 мкс. Эквивалентная шуму разность температур составляет менее 20 мК. Режим внешней синхронизации позволяет осуществлять синхронизацию изображения с самыми скоротечными событиями. Однако и эта камера не позволяла проводить измерения с высокой разрешающей способностью, так как предельная разрешающая способность не может быть выше половины длины волны, контролируемой детектором.

В докладе [3] при участии автора настоящей статьи сообщалось о создании ИК микроскопа с использованием ФПУ на основе соединения $In_xGa_{(1-x)}As$, чувствительного к ИК-излучению с длинами волн до 1,7 мкм (при $x = 0,53$). ИК фотографии, полученные при использовании аппаратуры, указанной в [3], были представлены также в сообщении на конференции [4].

В работе [5] рассмотрены различные методы определения теплового сопротивления транзисторов.

Метод рамановской спектроскопии применительно к определению тепловых полей в GaN гетеротранзисторах детально рассмотрен в статье [6].

В статье [7] для контроля тепловых полей в GaN гетеротранзисторах использовался эффект измерения негативного дифференциального сопротивления выходных характеристик, связанных с саморазогревом GaN НЕМТ.

Отметим, что при температуре чёрного тела 150 °С ($T = 423K$) максимум излучения по закону Вина ($\lambda_{\max} = 2900/T$) соответствует 6,85 мкм. Поскольку спектральная чувствительность рассмотренных выше

матриц на основе InGaAs существенно смещена в коротковолновую область спектра, где излучаемая чёрным телом мощность резко изменяется с изменением температуры, можно ожидать высокой чувствительности при изменении температуры исследуемых объектов. Проведённые нами расчёты показали, что при изменении температуры на 1 градус (от 150 до 151 °С) сигнал, снимаемый с матрицы InGaAs, должен изменяться на 4,6 %. Для сравнения: для матрицы с чувствительностью в диапазоне 3-5 мкм сигнал при этих же условиях изменится на 2 %, а для матрицы, работающей в диапазоне 8-10 мкм, сигнал изменится всего на 1 %.

Схема и конструкция ИК микроскопа, работающего в коротковолновом ИК диапазоне (длина волны менее 1.7 мкм)

Блок-схема аппаратуры приведена на рис. 1.

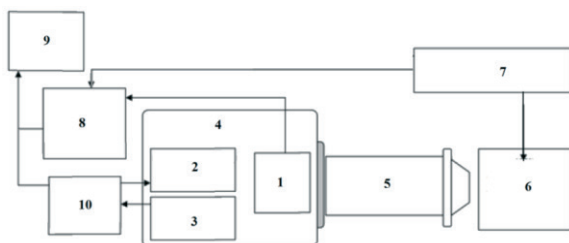


Рис. 1

Блок-схема аппаратуры для контроля тепловых полей GaN СВЧ гетеротранзисторов:

1 – ИК-сенсор на основе матрицы InGaAs; 2 – термоэлектрический холодильник;

3 – датчик температуры; 4 – герметичный корпус; 5 – стеклянный микрообъектив;

6 – исследуемый СВЧ гетеротранзистор; 7 – блок управления режимом работы СВЧ гетеротранзистора; 8 – блок обработки полученного сигнала и форматирование;

9 – ИВМРС с программой обработки;

10 – система стабилизации температуры

Предварительно держатель образца вместе со смонтированным кристаллом нагревался посторонним нагревателем до разных температур в диапазоне 150-250 °С. Температура и излучательная способность поверхности определялись при помощи пирометра.

Тепловые поля GaN СВЧ транзисторов

На рис. 2 и 3 приведены картины поверхности СВЧ GaN транзистора в видимом свете и в ИК-изображении.

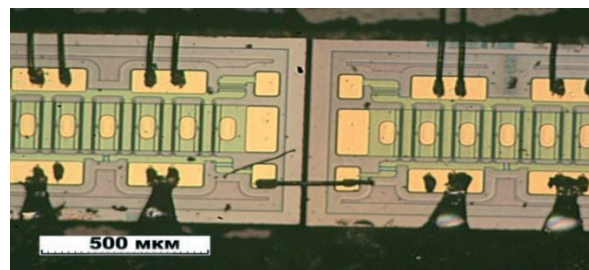


Рис. 2

Фотография поверхности GaN СВЧ транзистора, снятая под микроскопом

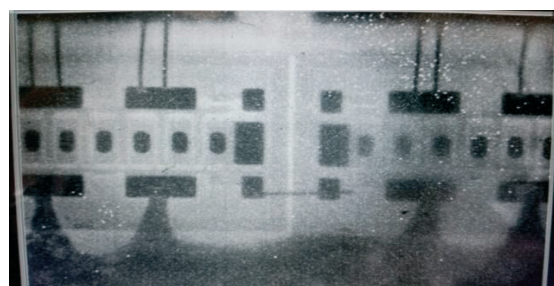


Рис. 3

Картина теплового поля СВЧ GaN транзистора, снятая при термоэлектрическом охлаждении матрицы InGaAs и при внешнем нагреве транзистора

На рис. 4 приведены тепловые поля транзисторов.

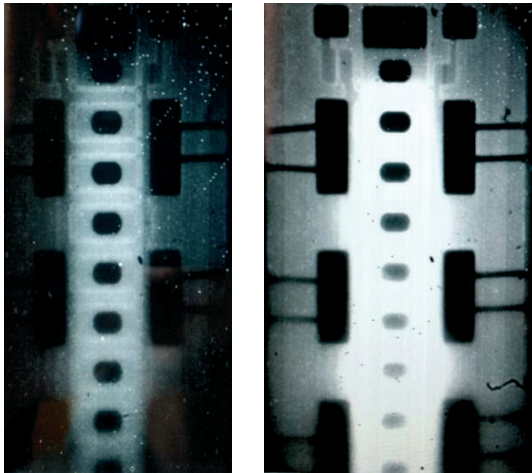


Рис. 4

Тепловые поля транзисторов при пропускании тока между истоком и стоком (затвор соединён с истоком); слева – при токе между истоком и стоком 3.8 А (напряжение 4 В), справа – при токе между истоком и стоком 4.2 А (напряжение 4.5 В)

Слева температура наиболее горячей (наиболее светлой) области – 180 °С; справа температура наиболее горячей (наиболее светлой) области – 220 °С.

Конструкция разработанного ИК микроскопа

После проведения опытов, о которых изложено в предыдущем разделе, была проведена модернизация макета ИК микроскопа [4, 7]. Как отмечено выше, существенным преимуществом ИК микроскопа является возможность использования стеклянных микрообъективов с различным увеличением.

Аппаратура работает следующим образом. Измеряемый транзистор закрепляется в держателе, и между истоком и стоком

транзистора подаётся напряжение питания, необходимое для нагрева транзистора. Предварительно для градуировки устройства производится внешний нагрев держателя корпуса транзистора, измеряются температура держателя корпуса транзистора и интенсивность сигнала в активной области транзистора.

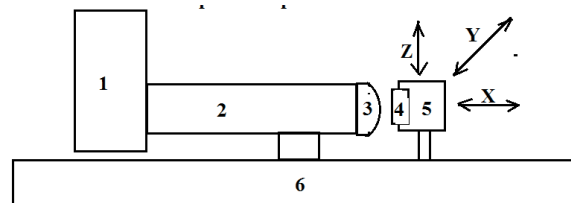


Рис. 5

Конструкция ИК микроскопа: 1 – ИК-сенсор с термоэлектрическим холодильником; 2 – тубус объектива; 3 – стеклянный объектив; 4 – измеряемый СВЧ транзистор с блоком подведения питания (в состав аппаратуры не входит); 5 – держатель СВЧ транзистора, выполненный с возможностью юстировки по двум горизонтальным осям (X и Y) и по вертикальной оси Z (в держателе СВЧ транзистора также имеется датчик температуры, измеряющий температуру корпуса транзистора); 6 – основание, на котором смонтированы указанные выше детали

Были опробованы микроскопные микрообъективы с кратностью 10X и 20X. Полученная картина теплового поля при использовании микрообъектива 20X приведена на рис. 6.



Рис. 6

Картина теплового поля, снятая при использовании микрообъектива с кратностью 20X

На рис. 7 приведена картина теплового поля центральных каналов GaN СВЧ транзистора при высокой разрешающей способности по размерам. Здесь также использовался микроскопный стеклянный объектив с кратностью 20X.

Видно, как уменьшается нагрев транзистора на краях «пальцев» исток-затвор-сток.

области ИК-спектра показывают, что материалы обладают высокой прозрачностью и, следовательно, малой излучающей способностью, что не позволяет измерять температуру в слоях нитрида галлия вблизи поверхности прибора. Для этой цели необходимо использовать или разрабатывать другие методы.

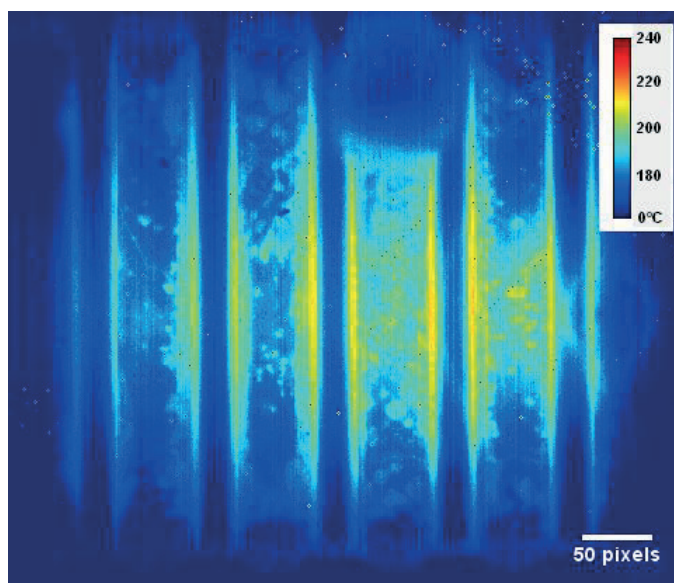


Рис. 7

Картина теплового поля GaN СВЧ гетеротранзистора в условном цвете

Выводы

Измерены тепловые поля GaN СВЧ гетеротранзисторов при использовании фотоприёмного устройства, работающего в ближней области ИК-спектра. Возможность использования стеклянных микроскопных объективов резко увеличивает разрешающую способность: можно зафиксировать тепловые поля в области каналов между истоком и стоком.

Вместе с тем проведённые измерения прозрачности материалов в ближней

Литература

1. Батавин, В.В. Оптические методы исследования и контроля в электронной технике / В.В. Батавин, Ю.А. Концевой // Электронная промышленность, 1979. – № 1-2. – С. 63-73.
2. Смирнов, А.М. Особенности работы на ИК микроскопе FLIR. Исследование тепловых полей в мощных импульсных СВЧ транзисторах в динамическом режиме / А.М. Смирнов, Д.А. Евстигнеев // Материалы XIII научно-технической конференции «Пульсар-2014»; Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 8-10 октября 2014, Москва. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2014. – С. 271-273.

3. Аболдуев, И.М. О возможности контроля тепловых полей GaN СВЧ транзисторов по коротковолновому ИК-излучению / И.М. Аболдуев, М.Е. Гусев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой // Материалы XIV научно-технической конференции, «Пульсар-2015»; Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 7-9 октября 2015, Москва. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С. 202-205.
4. Аболдуев, И.М. Контроль тепловых полей GaN СВЧ транзисторов / И.М. Аболдуев, И.С. Бенуни, М.Е. Гусев, Ю.А. Концевой, Ан. В. Редька // Материалы XV научно-технической конференции «Пульсар-2017»; Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 27-29 сентября 2017. – М.: АО «НПП «Пульсар», 2017. – С. 218-220.
5. Зенин, В. Влияние марки припоя и способов пайки кристаллов на параметры силовых полупроводниковых приборов на примере транзисторов КП767В / В. Зенин, О. Хишко // Компоненты и технологии, 2009. – № 8. – С. 146-151.
6. Yanli, Liu, Determination of temperature-dependent stress state in thin AlGaIn layer of AlGaIn/GaN HEMT heterostructures by near-resonant raman scattering / Liu Yanli, Liu, Yang Xifeng, Chen Dunjun, Hai Lu, Rong Zhang, Youdou Zheng // Advances in Condensed Matter Physics. – 2015. – <https://www.hindawi.com/journals/acmp/2015/918428/abs/>
7. Kuzmík, J. Determination of channel temperature in AlGaIn/GaN HEMTs grown on sapphire and silicon substrates using DC characterization method / J. Kuzmík, P. Javorka, A. Alam, M. Marso, M. Heuken, P. Kordo // IEEE Transaction on Electron Devices. – 2002. – vol.49. – no.8. – pp. 1496-1498.
3. *Funktsionalniye Bloki REA*” [Pulsar-2014. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Moscow: S&PE Pulsar JSC Publ. – 2014. – pp.271 – 273.
3. Abolduev I.M., Gusev M.E., Kolkovskiy Yu.V., Kontsevoy Yu.A. On the Method of Microwave GaN Transistor Thermal Field Monitoring Using Short-wavelength IR Radiation // Proceedings of XIV Scientific and Technical Conference “Pulsar-2015. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-2015. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Moscow: S&PE Pulsar JSC Publ. – 2015. – pp.202 – 205.
4. Abolduev I.M., Benuni I.S., Gusev M.E., Kontsevoy Yu.A., Redka An.V. Microwave GaN Transistors Thermal Field Monitoring // Proceedings of XV Scientific and Technical Conference “Pulsar-2017. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye Funktsionalniye Bloki REA” [Pulsar-2017. Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment]. – Moscow: S&PE Pulsar JSC Publ. – 2017. – pp.218 – 220.
5. Zenin V., Khishko O. Effect of the Brand of Solder and Die Soldering Method on the Parameters of Power Semiconductor Devices on the Example of KP767V Transistors. // *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies]. – 2009. – no.8. – pp.146 – 151.
6. Yanli, Liu, Yang Xifeng, Chen Dunjun, Hai Lu, Rong Zhang, Youdou Zheng Yanli, Liu, Determination of Temperature-Dependent Stress State in Thin AlGaIn Layer of AlGaIn/GaN HEMT Heterostructures by Near-resonant Raman Scattering // Advances in Condensed Matter Physics. – 2015. – <https://www.hindawi.com/journals/acmp/2015/918428/abs/>
7. Kuzmík, J., Javorka P., Alam A., Marso M., Heuken M., Kordo P. Determination of channel temperature in AlGaIn/GaN HEMTs grown on sapphire and silicon substrates using DC characterization method // IEEE Transaction of Electron Devices. – 2002. – vol.49. – no.8. – pp. 1496 – 1498.

References

1. Batavin V.V., Kontsevoy Yu.A. Optical methods of research and monitoring in electronic engineering // *Elektronnaya Promyshlennost* [Electronic Industry]. – 1979. – no.1-2. – pp.63-73.
2. Smirnov A.M. Features of FLIR IR microscope operation. Dynamic mode power microwave transistors thermal fields monitoring // Proceedings of XIII Scientific and Technical Conference “Pulsar-2014. Tverdotelnaya Elektronika, Slozhniye