

УДК 621.396

## Тепловой анализ работы мощной ГИС СВЧ-диапазона

© Авторы, 2017

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2017

**В.А. Иовдальский** – д.т.н., зав. лабораторией, АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино, Моск. обл.); доцент, Московский технологический университет (МИРЭА)

**Н.В. Ганюшкина** – сотрудник, АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино)

**В.П. Марин** – академик АПК, д.т.н., профессор, Московский технологический университет (МИРЭА)

**В.С. Серегин** – д.т.н., ген. директор – ген. конструктор, ЗАО «НПО «НИИТАЛ» (Москва)

**И.А. Соколов** – к.т.н., ген. директор – ген. конструктор, АО «НИИ «Микроприбор» им. Г.Я. Гуськова (Москва)

Приведены результаты исследования взаимодействия тепловых полей четырех кристаллов полевых транзисторов с диодами Шоттки фрагмента гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона с параллельным сложением мощности. Показано, что увеличение коэффициента теплопроводности хорошо электро- и теплопроводящей пластины (дополнительного теплоотвода) приводит к общему снижению уровня температур пластины за счет увеличения эффекта интегрального теплоотвода и охлаждению транзисторов, контактирующих с пластиной. Кроме того, отмечено, что с ростом коэффициента теплопроводности наблюдается смещение максимума температур с верхнего кристалла транзистора на нижний.

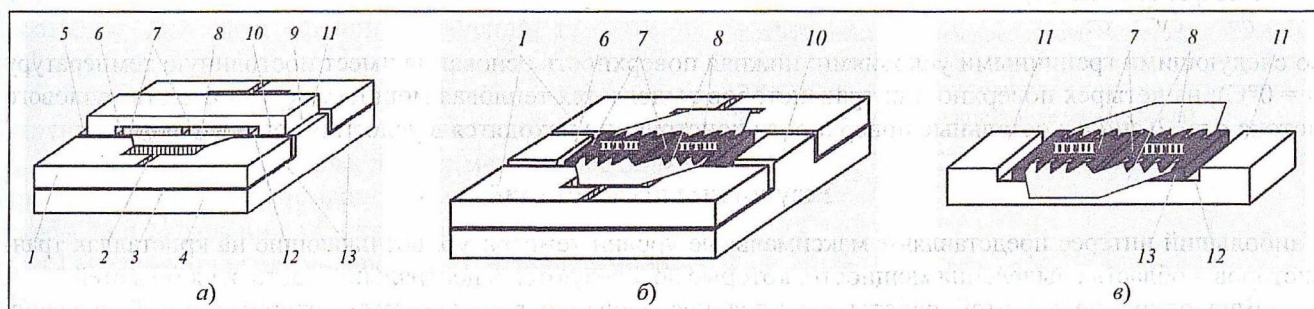
**Ключевые слова:** кристалл ПТШ, золотой балочный вывод, ГИС СВЧ-диапазона, тепловые поля, максимальная температура нагрева.

The results of investigating the interaction of thermal fields of four Schottky FET crystals of microwave HIC fragment with parallel power addition are presented. It is shown that the increase of the heat conductivity factor of electro- and thermal plate (of additional heat sink) is leading to total decrease of the plate temperature level due to integrated heat sink effect increase and cooling of transistors contacting with the plate. Besides, with the increase of the heat conductivity factor the offset of temperature maximum from the upper transistor crystal to the lower one is observed.

**Keywords:** Schottky FET crystal, gold beam lead, microwave HIC, thermal fields, maximal thermal temperature.

Ужесточение требований к характеристикам радиоэлектронных изделий заставляет разработчиков искать новые возможности их улучшения. Наличие санкций со стороны стран-производителей микроэлектронных компонентов затрудняет использование их продукции, а отставание отечественных производителей комплекующих микроэлектронных компонентов от мирового уровня заставляют их потребителей искать новые технические решения. В этих условиях наработки отечественных специалистов, в частности, по сложению мощности транзисторов в каскадах усилителей мощности СВЧ-диапазона, становятся актуальными [1–3].

Ранее [4] уже приводилась конструкция многокристального составного полевого транзистора с диодами Шоттки (ПТШ), которая предполагает суммирование мощности четырех кристаллов транзисторов. В ней использован принцип сложения мощности кристаллов ПТШ с балочными выводами, каждый из которых присоединяется к контактным площадкам сразу двух кристаллов. Затем эти пары кристаллов соединяются параллельно через балочные выводы, которые, в свою очередь, присоединяются к пленочным проводникам микрополосковой платы гибридной интегральной схемы (ГИС) (рис. 1).



**Рис. 1.** Топология фрагмента предложенной мощной ГИС СВЧ (а) и его составных частей (б,в): 1 – диэлектрическая подложка; 2 – топологический рисунок металлизации; 3 – экранная заземляющая металлизация; 4 – металлическое теплоотводящее основание; 5 – отверстие в диэлектрической подложке; 6 – выемка в металлическом основании; 7 – кристаллы транзисторов; 8 – плоские балочные выводы кристаллов транзисторов; 9 – выступ на металлическом теплоотводящем основании; 10 – монтажные площадки; 11 – металлическая хорошо электро- и теплопроводящая пластина (дополнительный теплоотвод); 12 – канавка в металлической хорошо электро- и теплопроводящей пластине; 13 – хорошо электро- и теплопроводящее связующее вещество

Отличительной особенностью конструкции является применение балочных выводов, которые предназначены для присоединения по меньшей мере двух кристаллов ПТШ [5]. Такое присоединение кристаллов предполагает их установку на строго определенном месте и с фиксированным расстоянием между ними. Это позволяет сократить длину внутрисхемных соединительных проводников и тем самым улучшить электрические характеристики ГИС за счет уменьшения паразитной индуктивности.

Однако близкое расположение кристаллов (всех четырех) вызывает их тепловое влияние друг на друга, поскольку при работе они выделяют тепло. Поэтому определенный интерес представляет анализ такого взаимодействия.

Цель работы – исследовать взаимодействие тепловых полей четырех кристаллов ПТШ фрагмента ГИС СВЧ-диапазона с параллельным сложением мощности.

### Разработка тепловой модели

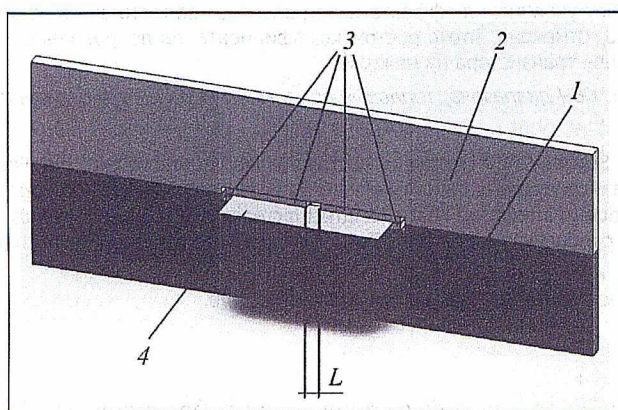


Рис. 2. Общий вид модели фрагмента (половины) конструкции: 1 – основание; 2 – хорошо электро- и теплопроводящая пластина (дополнительный теплоотвод); 3 – кристаллы транзисторов; 4 – золотой балочный вывод;  $L$  – горизонтальное расстояние между парами транзисторов

Аналогичная работа проводилась для ГИС с двумя кристаллами, соединенными параллельно через балочные выводы с интегральным теплоотводом [6]. Поэтому предлагаемую конструкцию можно рассмотреть как модель фрагмента конструкции, в которой используются две пары двухъярусных (расположенных один над другим) транзисторов 3 (рис. 2). Области тепловыделения кристаллов в паре обращены друг к другу. Нижние транзисторы контактируют с основанием 1 из MD-50, а верхние – с металлической хорошо электро- и теплопроводящей пластиной 2, материал которой варьировался в широком диапазоне изменения коэффициента теплопроводности ( $\lambda = 160 \dots 2000$  Вт/(м·К)). Между собой транзисторы имеют контакт через золотой балочный вывод 4.

В данной работе было проведено параметрическое исследование влияния горизонтального расстояния между парами транзисторов  $L$  в диапазоне  $0,01 \dots 0,3$  мм на их тепловой режим.

### Описание метода решения

Для нахождения температурных полей использовалась вычислительная программа, осуществляющая решение дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов. В данной постановке рассматривалась трехмерная стационарная задача, описываемая уравнением

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

со следующими граничными условиями: нижняя поверхность основания имеет постоянную температуру ( $t = 0^\circ\text{C}$ ); на четырех поверхностях транзисторов выделяется тепловая мощность  $Q$  (плотность теплового потока  $q = -\lambda(dt/dn)$ ); остальные поверхности конструкции находятся в условиях теплоизоляции.

### Результаты исследований

Наибольший интерес представляют максимальные уровни температур, возникающие на кристаллах транзисторов в областях выделения мощности, которые локализуются в центральной части этих областей.

Еще одной целью этой работы является исследование влияния температурных полей соседних групп транзисторов друг на друга в зависимости от расстояния между ними, что тоже приводит к изменению максимальных температур на кристаллах.

Для наглядности результатов минимальный уровень температур устройства, приходящийся на нижнюю поверхность основания, был выбран равным  $0^\circ\text{C}$ . Эта точка отсчета позволяет интерпретиро-

вать все рассчитанные температуры любой точки конструкции как температурные перепады относительно нижней поверхности основания.

При проведении исследований из-за весьма незначительных изменений результатов при малых мощностях точность численного расчета температур для выявления закономерностей выбиралась достаточно высокой (до сотых долей градусов). Это позволило установить характер поведения температурных кривых. Обработанные результаты в виде графиков представлены на рис. 3–7.

Как видно из рис. 3, максимальная температура верхних кристаллов транзистора зависит от материала электро- и теплопроводящей пластины (дополнительного теплоотвода): чем больше его коэффициент теплопроводности, тем меньше разогревается кристалл. Увеличение горизонтального расстояния между транзисторами  $L$  тоже способствует незначительному понижению этой температуры, так как уменьшается влияние температурных полей соседних пар транзисторов. Чем меньше коэффициент теплопроводности, тем динамичнее это влияние. Об этом говорит крутизна наклона кривой к оси абсцисс.

Поведение максимальных температур нижних транзисторов аналогично кривым на рис. 3, но изменение материала электро- и теплопроводящей пластины (то есть изменение коэффициента теплопроводности) оказывает более слабое влияние на нижние транзисторы, которые лежат на основании из MD-50. Это приводит к тому, что с увеличением коэффициента теплопроводности максимальная температура нижнего кристалла транзистора  $t_{H \max}$ , плавно приближаясь по уровню к более высокому значению  $t_{B \max}$ , начиная с некоторой величины  $\lambda > 500$  Вт/(м·К) сравнивается с ней и при дальнейшем увеличении  $\lambda$  становится выше нее. Это наглядно показывает рис. 4,а, на котором изображены температурные зависимости  $t_{B \max}$ ,  $t_{H \max}$  от коэффициента теплопроводности материала электро- и теплопроводящей пластины (дополнительного теплоотвода) для двух крайних значений  $L$  (0,01 и 0,3 мм).

Зависимость перепада максимальных температур верхнего и нижнего кристаллов транзистора ( $t_{B \max} - t_{H \max}$ ) от горизонтального расстояния между соседними транзисторами  $L$  для различных материалов верхней скобы при выделении мощности с одного кристалла  $Q = 1$  Вт представлена на рис. 4,б. Перепад температур с изменением  $\lambda$  меняет свой знак:

$$(t_{B \max} - t_{H \max}) > 0, \text{ если } \lambda \leq 500 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

$$(t_{B \max} - t_{H \max}) \leq 0, \text{ если } \lambda > 500 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Увеличение горизонтального расстояния  $L$  между соседними транзисторами тоже приводит к снижению

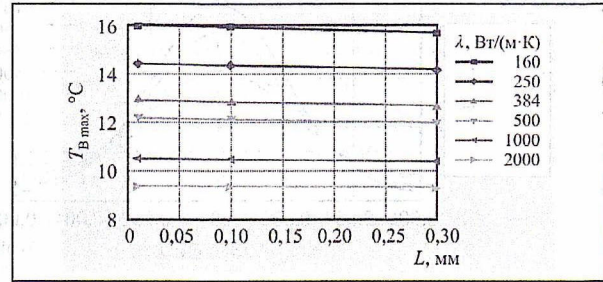


Рис. 3. Графики зависимостей максимальной температуры верхнего кристалла транзистора  $t_{B \max}$  от горизонтального расстояния между соседними парами транзисторов  $L$  для различных материалов дополнительного теплоотвода ( $\lambda = 160 \dots 2000$  Вт/(м·К));  $Q = 1$  Вт на каждом кристалле транзистора

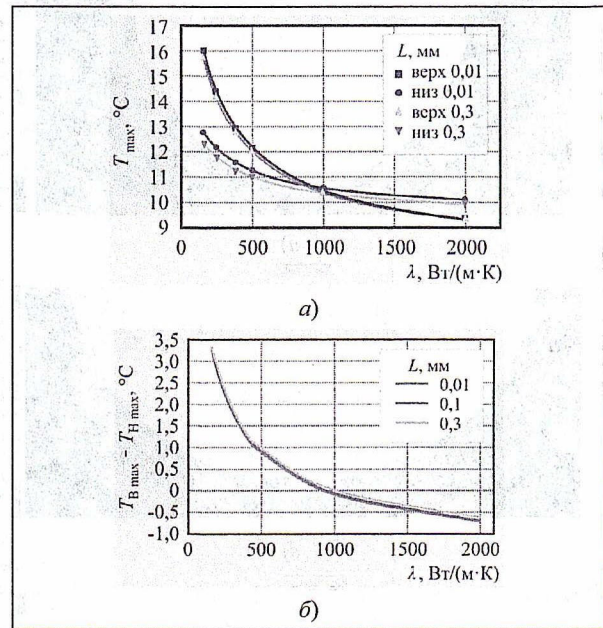


Рис. 4. Графики зависимостей максимальных температур верхнего и нижнего кристаллов транзистора  $t_{B \max}$ ,  $t_{H \max}$  (а) и перепада максимальных температур верхнего и нижнего кристаллов транзистора ( $t_{B \max} - t_{H \max}$ ) (б) от коэффициента теплопроводности материала дополнительного теплоотвода  $\lambda$  для различных горизонтальных расстояний между соседними парами транзисторов  $L$  ( $Q = 1$  Вт на каждом кристалле транзистора)

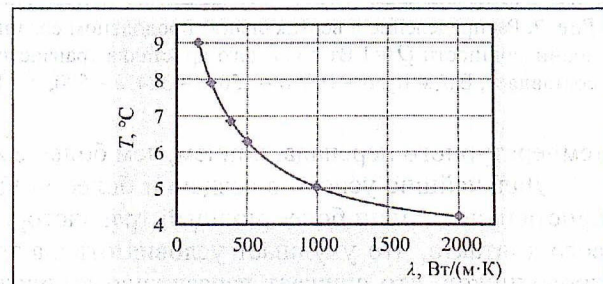


Рис. 5. График зависимости максимальных температур  $T$  верхней кромки скобы от ее коэффициента теплопроводности  $\lambda$  для горизонтального расстояния  $L = 0,15$  мм между соседними парами транзисторов ( $Q = 1$  Вт на каждом кристалле транзистора)

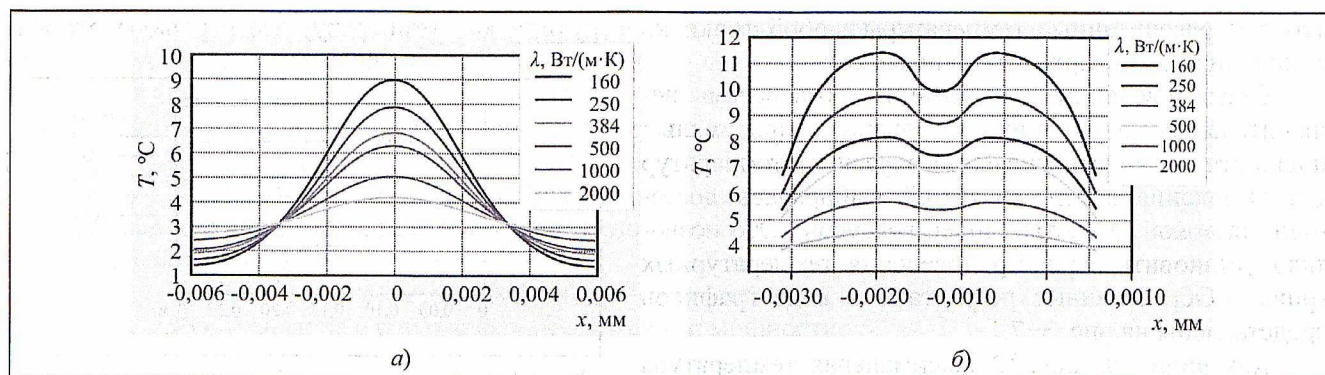


Рис. 6. Графики распределения температур  $T$  по верхней кромке дополнительного теплоотвода для случая  $L = 0,2$  мм (а) и  $L = 0,3$  мм (б) в зависимости от коэффициента теплопроводности  $\lambda$  дополнительного теплоотвода ( $Q = 1$  Вт на каждом кристалле транзистора)

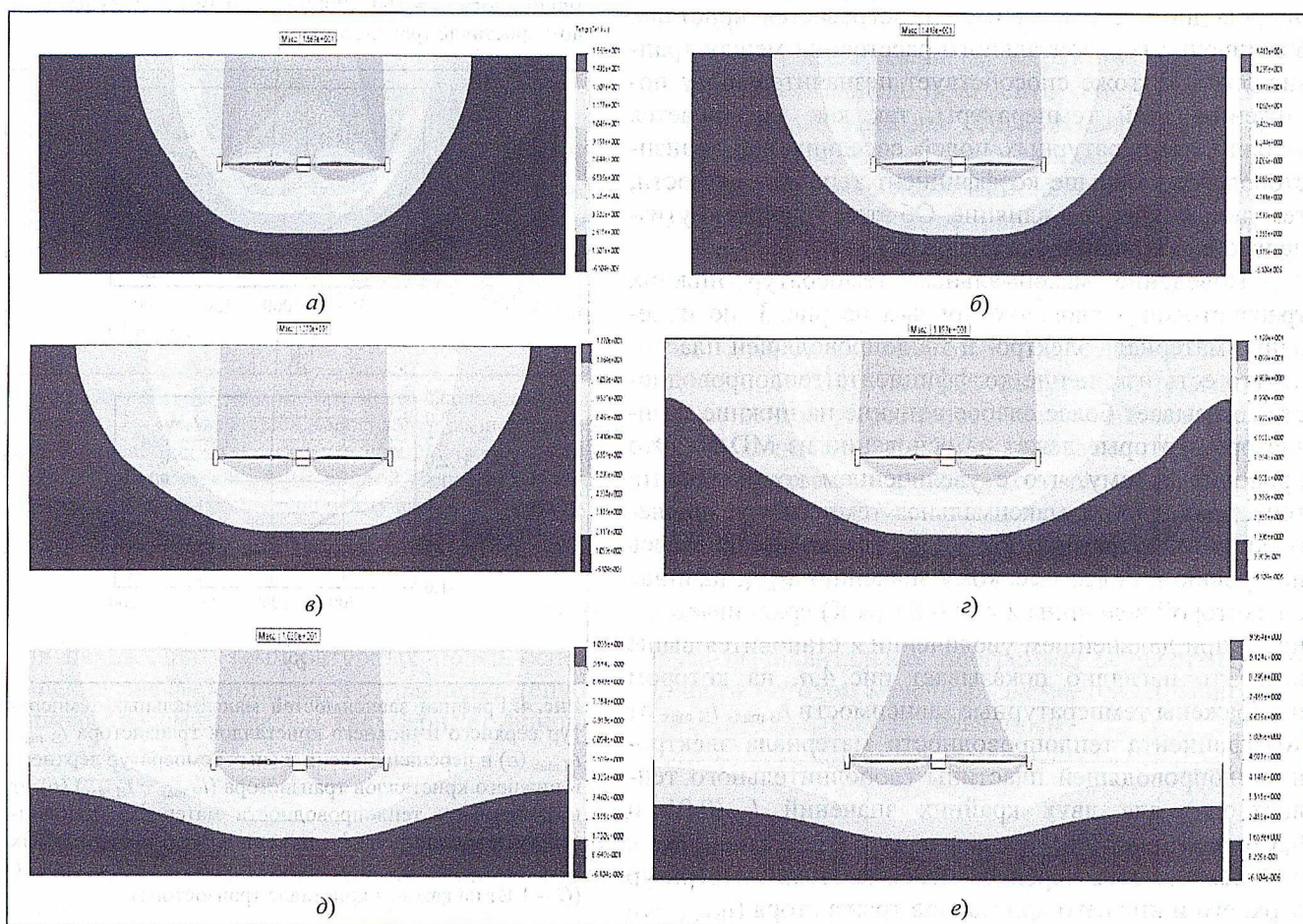


Рис. 7. Распределение в вертикальном продольном срединном сечении конструкции тепловых полей, возникающих при выделении мощности  $Q = 1$  Вт с каждого кристалла транзисторов для  $L = 0,3$  мм; теплопроводность дополнительного теплоотвода составляет, Вт/(м·К): а – 160, б – 250, в – 384, г – 500, д – 1000, е – 2000

температурного перепада, причем, чем больше  $\lambda$ , тем сильнее эта тенденция.

Дальнейшие успехи в создании более мощных транзисторов приведут к замене группы из четырех кристаллов на один более мощный транзистор. В этом случае значительно сокращается площадь теплового контакта, что ухудшает условия отвода тепла. Вместе с этим сокращается длина соединительных проводников, что снижает паразитную индуктивность схемы. Однако более мощные кристаллы также

могут быть объединены в группу для суммирования мощности, и, таким образом, разработанная конструкция имеет перспективы для использования.

- Увеличение коэффициента теплопроводности электро- и теплопроводящей пластины приводит к снижению ее уровня температур за счет увеличения эффекта интегрального теплоотвода. Это ведет к охлаждению транзистора, контактирующего с пластиной дополнительного теплоотвода.

С ростом коэффициента теплопроводности электро- и теплопроводящей пластины наблюдается смещение максимума температур с верхнего кристалла транзистора на нижний.

Разработанная конструкция ГИС СВЧ предполагает использование кристаллов более мощных транзисторов (до нескольких десятков ватт), появляющихся в последнее время.

## Литература

1. Пат. РФ № 2298255. Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / *Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Моргунов В.Г.*; приоритет 12.08.05.
2. *Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Трегубов В.Б., Молдованов Ю.И., Кочуба А.М.* Улучшение характеристик ГИС выходного каскада усилителя мощности СВЧ-диапазона // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2015. № 4(527). С. 63–67.*
3. *Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Пчелин В.А.* Сложение мощности ПТШ в ГИС усилительных каскадов СВЧ-диапазона // LAP LAM-BERT. Academic Publishing. Omni Scriptum GmbH and CO.KG. Heinrich-Bucking-Str. 6-8. 66121 Saarbrücken. Deutschland. 06.07.2015. P. 120.
4. *Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.А., Гринберг Д.С.* Многокристальный составной ПТШ для ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2015. № 4(527). С. 74–76.*
5. Пат. РФ № 2541725ю МПК Н 01 L 23/48. Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора СВЧ / *Иовдальский В.А., Дудинов К.В., Моргунов В.Г., Кудрова Т.С.*; приоритет 23.07.2013.
6. *Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Моргунов В.Г., Герасименко С.В.* Тепловой анализ работы мощной ГИС с интегральным теплоотводом от кристаллов полупроводниковых приборов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2012. № 2(513). С. 57–74.*

Поступила 10 января 2017 г.

## The thermal analysis of power microwave HIC operation

© Authors, 2017  
© Radiotekhnika, 2017

**V.A. Iovdalsky** – Dr. Sc. (Eng.), Head of Department, JSC «RPC «Istok» named after Shokin (Fryazino, Moscow reg.); Associate Professor, Moscow Technological University (MIREA)

**N.V. Ganyushkina** – Employee, JSC «RPC «Istok» named after Shokin (Fryazino)

**V.P. Marin** – Academic APK, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Moscow Technological University (MIREA)

**V.S. Seregin** – Dr. Sc. (Eng.), General Director – General Designer, JSC «SPA «NIITAL» (Moscow)

**I.A. Sokolov** – Ph. D. (Eng.), General Director – General Designer, JSC «NII «Micropribor» named after G.J. Guskov (Moscow)

The results of investigating the interaction of thermal fields of four Schottky FET crystals of microwave HIC fragment with parallel power addition are presented. It is shown that the increase of the heat conductivity factor of electro- and thermal plate (of additional heat sink) is leading to total decrease of the plate temperature level due to integrated heat sink effect increase and cooling of transistors contacting with the plate. Besides, with the increase of the heat conductivity factor the offset of temperature maximum from the upper transistor crystal to the lower one is observed. The developed microwave HIC design involves the use of crystals of more powerful transistors (up to several tens of watts), appearing in recent years.

## References

1. Pat. RF № 2298255. Moshhnaya gibridnaya integral'naya sxema SVCh-diapazona / *Iovdal'skij V.A., Pchelin V.A., Lapin V.G., Morgunov V.G.*; prioritet 12.08.05.
2. *Iovdal'skij V.A., Pchelin V.A., Lapin V.G., Tregubov V.B., Moldovanov Yu.I., Koczyuba A.M.* Uluchshenie xarakteristik GIS vy'odnogo kaskada usilitelya moshhnosti SVCh-diapazona // *E'lektronnaya texnika. Ser. 1. SVCh-texnika. 2015. № 4(527). S. 63–67.*
3. *Iovdal'skij V.A., Ganyushkina N.V., Pchelin V.A.* Slozhenie moshhnosti PTSh v GIS usilitel'ny'x kaskadov SVCh-diapazona // LAP LAM-BERT. Academic Publishing. Omni Scriptum GmbH and CO.KG. Heinrich-Bucking-Str. 6-8. 66121 Saarbrücken. Deutschland. 06.07.2015. P. 120.
4. *Iovdal'skij V.A., Lapin V.G., Pchelin V.A., Grinberg D.S.* Mnogokristal'ny'j sostavnoj PTSh dlya GIS usilitelej moshhnosti SVCh-diapazona // *E'lektronnaya texnika. Ser. 1. SVCh-texnika. 2015. № 4(527). S. 74–76.*
5. Pat. RF № 2541725yu MPK N 01 L 23/48. Vy'vodnaya ramka dlya mnogokristal'nogo poluprovodnikovogo pribora SVCh / *Iovdal'skij V.A., Dudinov K.V., Morgunov V.G., Kudrova T.S.*; prioritet 23.07.2013.
6. *Iovdal'skij V.A., Ganyushkina N.V., Morgunov V.G., Gerasimenko S.V.* Teplovoj analiz raboty' moshhnoj GIS s integral'ny'm teplotvodom ot kristallov poluprovodnikovyx priborov // *E'lektronnaya texnika. Ser. 1. SVCh-texnika. 2012. № 2(513). S. 57–74.*