

УДК 621.382.2/3

Метод построения МИС СВЧ ограничителей мощности для повышения порога сгорания

Груша А. В., Крутов А. В., Ребров А. С.

*АО «Научно-производственное предприятие “Исток” имени А. И. Шокина»
ул. Вокзальная, 2А, г. Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация
info@istokmw.ru*

Получено: 3 июня 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В работе показан метод построения МИС СВЧ ограничителя мощности, целью которого является повышение порога сгорания. Рассмотрена классическая двухкаскадная схема на антипараллельных p - i - n -диодах. Идея повышения порога сгорания ограничителя мощности заключается в перераспределении токов между каскадами так, чтобы на первом и втором каскадах ток достигал насыщения при значениях 0,41—0,45 А/100 мкм. Для этого был проведен расчет следующих схем: отношение емкости диодов первого каскада ко второму 1:1, 2:1, 3:1 и 4:1. Рассчитанные схемы были изготовлены на основе p - i - n -диодной GaAs технологии АО «НПП “Исток” им. Шокина», высота барьера диода 1,1 В / 1 мА, пробивное напряжение 45 В / 100 мкА. Показаны результаты зондовых измерений S -параметров ограничителей мощности и измерения динамических характеристик кристаллов в оснастке. Разработанные приборы в диапазоне частот от 1 до 16 ГГц имеют потери меньше 0,8 дБ и КСВН по входу и выходу меньше 2. Порог сгорания в непрерывном режиме на частоте 10 ГГц составил: для топологии 1:1 — 45,3 дБм, 2:1 — 48,3 дБм и для топологии 3:1 — 49,6 дБм. В тех же условиях, были исследованы ряд серийных МИС СВЧ ограничителей мощности зарубежных фирм. Удельная мощность сгорания для технологии АО «НПП “Исток” им. Шокина» составила ~20 Вт / 100 мкм периферии, что превышает уровень исследованных зарубежных аналогов.

Ключевые слова: p - i - n -диод, МИС СВЧ, ограничитель мощности, GaAs, порог сгорания, допустимая мощность, ток насыщения, удельная мощность сгорания.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Груша А. В., Крутов А. В., Ребров А. С. Метод построения МИС СВЧ ограничителей мощности для повышения порога сгорания // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 1. С. 79—92.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Груша, А. В. Метод построения МИС СВЧ ограничителей мощности для повышения порога сгорания / А. В. Груша, А. В. Крутов, А. С. Ребров // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 79—92.

1. Введение

Ограничители СВЧ мощности (ОМ) используются для защиты входных цепей приемного тракта приемопередающих модулей, где широко применяются сверхмалощумящие транзисторы и монолитные интегральные схемы (МИС СВЧ) малощумящих усилителей, которые весьма чувствительны к воздействию помехового сигнала высокого уровня мощности, с точки зрения электрической прочности.

Сигналы помехи делятся на синхронизированные и несинхронизированные. Синхронизированная помеха исходит в известный момент времени от передающего канала. Активное применение в приемопередающих модулях широкополосных усилителей высокой мощности, более 20 Вт, изготовленных по технологиям арсенида галлия и нитрида галлия, предъявляет соответствующие требования для защиты от этой мощности. Несинхронизированная помеха, поступает извне на вход приемника в случайный момент времени.

Обеспечить защиту от данных помех может пассивный ограничитель мощности. ОМ на *p-i-n*-диодах обладают низкими начальными потерями в широкой полосе частот и достаточно низким уровнем просачиваемой мощности.

На сегодняшний день известны и применяются технологические, конструктивные и схемотехнические принципы повышения порога сгорания монолитных ограничителей мощности.

К технологическим принципам относится как технология роста гетероструктуры, так и технология изготовления диода. Компания ООО «Коннектор-Оптикс» обладает молекулярно-лучевой эпитаксией *p-i-n*-гетероструктуры на арсениде галлия с концентрацией носителей в n^+ слое до 10^{19} см⁻³. Увеличение концентрации влияет на параметры диода; так, ток насыщения в n^+ слое определяется выражением

$$I_S = q \cdot N_d \cdot A \cdot P \cdot v_S$$

где N_d — концентрация носителей в n^+ слое; q — заряд электрона; A — толщина n^+ слоя; P — периметр n^+ слоя; τ — время жизни носителей заряда.

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» существует технологический процесс квазивертикальных *p-i-n*-диодов (рис. 1) с базой диода 1,5 мкм и

толщиной подложки арсенида галлия 100 мкм. Высота барьера *p-i-n*-диода при токе 1 мА составляет 1,1 В, пробивное напряжения — 45 В при токе 100 мкА. Помимо диодов, процесс позволяет изготавливать воздушные мосты, катушки индуктивности, МДМ-конденсаторы, тонкопленочные резисторы и сквозные металлизированные отверстия.

Отличительной особенностью квазивертикального диода от вертикального в том, что существует паразитное сопротивление, возникающее из-за того, что анод отстоит на некотором расстоянии от катода (рис. 1) и растекание тока происходит с анода на боковую периферию катода. Мощность, рассеиваемая на диоде, зависит от полного сопротивления диода, и определяется выражением [1]

$$P_{\text{diss}}(\text{Вт}) = \left(\frac{1}{2 \cdot R_{\text{diode}} + Z_0} \right)^2 \cdot (4 \cdot Z_0 \cdot R_{\text{diode}}) \cdot P_{\text{in}}(\text{Вт})$$

где R_{diode} — полное сопротивление диода; Z_0 — импеданс источника; P_{in} — входная мощность.

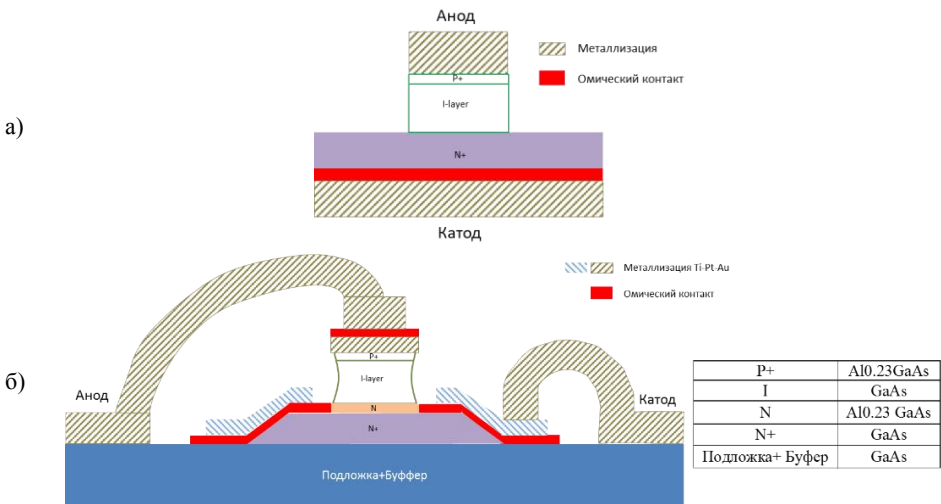


Рис. 1. Поперечное сечение вертикального а) и квазивертикального б) *p-i-n*-диода.

Fig. 1. Cross section vertical a) and quasi-vertical b) *p-i-n* diode

Для снижения этого паразитного сопротивления применяется технологическая операция «изготовление самосовмещенного катода», позволяющая уменьшить расстояния между анодом и катодом.

Другим технологическим методом обладает компания *Macom* — гибридно-монокристаллическая технология *MMIC* [2], которая объединяет вертикальные диоды на подложке из стекла. При этом вертикальные *p-i-n*-

диоды могут иметь разную толщину базы. Вывод катода на обратную сторону позволяет эффективно отводить тепло.

Конструктивным методом увеличения порога сгорания является увеличение периферии диода за счет оптимизации формы анода [3, 4]. Выбор оптимальной формы проводится так, чтобы при одном и том же значении площади фигуры периметр имел большее значение. Также возможны оригинальные конструктивные решения, например, уменьшение толщины подложки в области диода для улучшения отвода тепла.

К схемотехническим принципам относится построение ограничителя, на основе распределенного ограничения с использованием делителей-сумматоров мощности [1]. Это позволяет снизить нагрузку на диоды, но при этом начальные потери и рабочий диапазон частот будут зависеть от конструкции делителей-сумматоров.

В АО «НПП “Исток” им. Шокина» на регулярной основе для аттестации партий серийно выпускаемых и экспериментальных ограничителей мощности проводятся измерения по определению порога сгорания ОМ. Анализ массива измерений ограничителей мощности и тестовых единичных диодов, показал следующее:

- прямой ток вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода в непрерывном режиме перед сгоранием имеет область насыщения;
- удельный ток насыщения диода I_{ds} находится в пределах 0,41—0,45 А / 100 мкм для существующей технологии (на рис. 2 показана типичная ВАХ *p-i-n*-диода);
- существует прямо пропорциональная зависимость порога сгорания ограничителя мощности от прямого тока насыщения диода;
- ток насыщения диода зависит от периферии анода.

На основе этих данных в данной работе была поставлена задача по определению возможности повышения порога сгорания в МИС СВЧ ограничителях мощности.

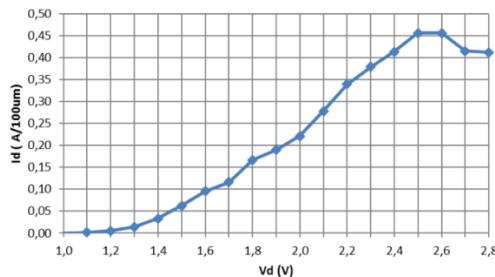


Рис. 2. ВАХ *p-i-n*-диода.

Fig. 2. IV *p-i-n* diode

2. Моделирование ограничителя мощности

Моделирование схемы ограничителя мощности было проведено в *Advanced Design System* с использованием нелинейной масштабируемой *SPICE* модели *p-i-n*-диода. Расчет проведен для классической схемы двухкаскадного ограничителя мощности на антипараллельных *p-i-n*-диодах, включенных через отрезок линии $\lambda/4$ (рис. 3), где первый каскад ограничивает поступающую мощность, а второй каскад отвечает за уровень проходящей мощности.

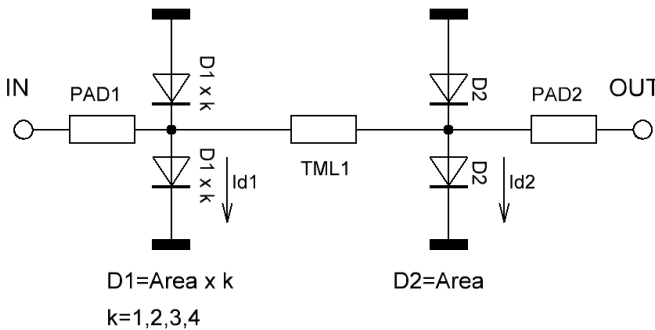


Рис. 3. Принципиальная схема ограничителя мощности

Fig. 3. Power limiter schematic

При анализе методом гармонического баланса на вход ограничителя мощности подавали непрерывную мощность от 30 до 50 дБм на частоте 10 ГГц и фиксировали изменение токов I_{d1} и I_{d2} (рис. 3), протекающих через диод в каждом каскаде. Исходная схема — соотношение емкости диодов первого каскада ко второму 1:1. Исходный размер анода был выбран 60×16 мкм. В симметричной структуре при возрастании мощности до 45 дБм ток на первом каскаде I_{d1} достигает насыщения I_{ds} , в то время как ток на втором каскаде I_{d2} равен $\approx I_{ds}/3$ (рис. 4).

Идея повышения порога сгорания ограничителя мощности заключается в перераспределении токов между каскадами так, чтобы при мощности сгорания на первом и втором каскадах ток достигал насыщения I_{ds} .

Критерием схемы являлась постоянная общая емкость, поэтому, чтобы сохранить частотные свойства при увеличении периферии диодов первого каскада в k раз, количество диодов увеличивали до k . Для того, чтобы добиться равенства токов, был проведен расчет следующих схем — отношение емкости диодов первого каскада ко второму 2:1, 3:1 и 4:1. Таким образом, в первом каскаде антипараллельное включение диодов становится последовательно параллельным включением. Результат модели-

рования ограничителей мощности сведен в таблицу. В таблице 1 показаны границы удельных значений токов, протекающих через диоды и соответствующие им мощности предполагаемых порогов сгорания.

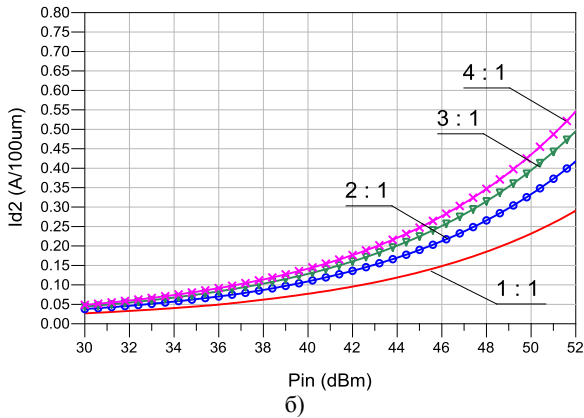
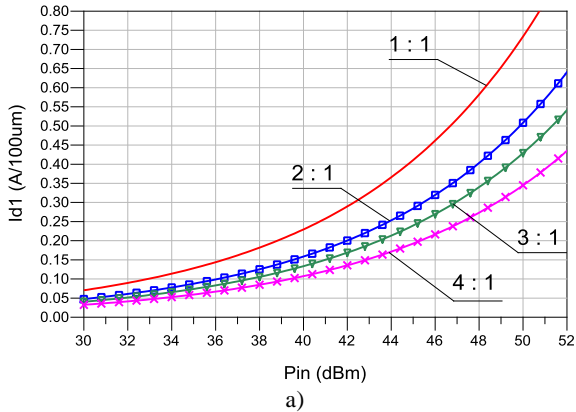


Рис. 4. Моделирование зависимости тока диода от входной мощности на частоте 10 ГГц:
а) диод первого каскада; б) диод второго каскада.

Fig. 4. Simulation diode current vs Pin at 10 GHz
a) first stage diode; b) second stage diode

Из данных результатов видно, что в схеме 4:1 и равенстве току на первом каскаде (I_{ds1}) току насыщения (I_{ds}), ток на втором каскаде значительно превышает ток I_{ds} . При соотношении 3:1 и равенстве тока $I_{d1}=I_{ds}$ ток на втором каскаде приближен к току I_{ds} . Оптимальным вариантом является соотношение 3,5:1, однако такое соотношение нельзя реализовать с сохранением частотных свойств. Также в результате моделирования были определены предполагаемые пороги сгорания ограничителей.

Таблица 1. Результаты моделирования.

Table 1. Simulation results

Схема ¹	Ток диода 1-го каскада				Ток диода 2-го каскада				P _{in} (дБм)
	Periph ² (мкм)	Area ³ (мкм ²)	I _{d1} (А/100мкм)	Равенство току I _{ds}	Periph ² (мкм)	Area ³ (мкм ²)	I _{d2} (А/100мкм)	Равенство току I _{ds}	
1 : 1	152	960	0,411-0,451	= I _{ds}	152	960	0,133-0,145	<< I _{ds}	45,0- 45,8
2 : 1	272	1920	0,412-0,453	= I _{ds}			0,272-0,297	<< I _{ds}	48,2- 49,0
3 : 1	392	2880	0,410-0,449	= I _{ds}			0,377-0,413	≈ I _{ds}	49,6- 50,4
4 : 1	512	3840	0,415-0,435	= I _{ds}			0,522-0,546	>> I _{ds}	51,6- 52,0

Примечания.

1. Соотношение емкостей в каскадах;
2. Periph — периферия анода;
3. Area — площадь анода.

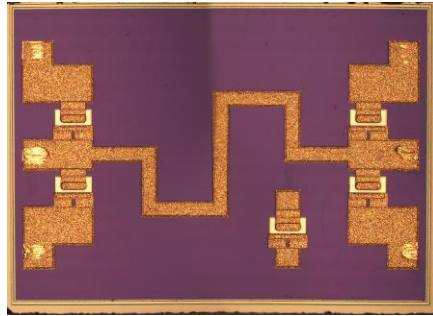
3. Экспериментальные результаты

Результатом моделирования стало изготовление МИС СВЧ ограничителей мощности в конфигурации 1:1, 2:1 и 3:1 на технологической базе АО «НПП “Исток” им. Шокина». Фотографии топологий ограничителей показаны на рис. 5. В топологии предусмотрен отдельно стоящий тестовый диод (идентичный рабочему) для подтверждения зависимости порога сгорания ограничителя мощности от тока насыщения диода. Непосредственно близкое расположение позволяет гарантировать идентичность характеристик диодов. Для снижения паразитной емкости вывод металлизации с анода и катода осуществляется через воздушный мост.

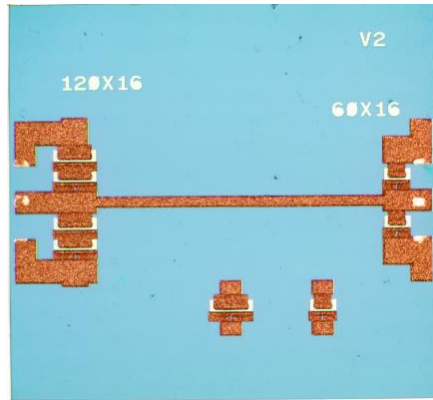
Отличительной особенностью в топологии 3:1 является наличие в первом каскаде двух заземляющих отверстий для катода и двух для анода. Это необходимо для снижения индуктивности заземления, так как ширина анода составляет 180 мкм.

Габаритные размеры кристалла с топологией 1:1 составили 1,12×0,82 мм. Две другие топологии были включены в состав множественных проектов на пластине, поэтому их габаритные размеры составили 1,62×1,5 мм и не являются оптимальными.

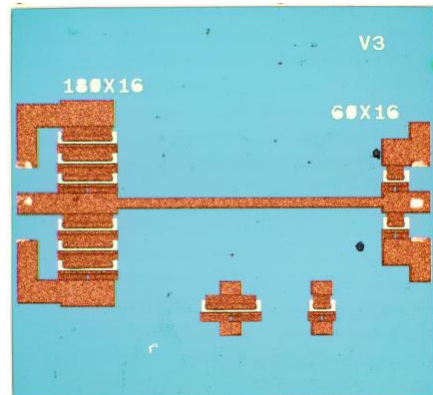
На рис. 6 показаны зондовые измерения малосигнальных параметров ограничителей мощности, проведенные на пластине, при температуре окружающей среды +25 °С. Приборы в диапазоне частот от 1 ГГц до 16 ГГц имеют потери меньше 0,8 дБ и КСВН по входу и выходу меньше 2.



а)



б)



в)

Рис. 5. Фотографии изготовленных кристаллов МИС СВЧ ограничителей мощности:
а) 1:1; б) 2:1; в) 3:1.

Fig. 5. Fabricated MMIC power limiter photo
а) 1:1; б) 2:1; в) 3:1

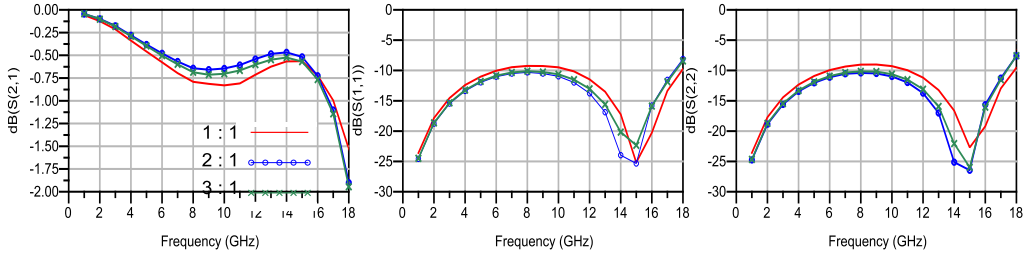


Рис. 6. Измеренные S-параметры.

Fig. 6. Measured S-parameters

Для измерений в режиме большого сигнала прибор был смонтирован на металлическое основание размером $7,5 \times 12 \times 2,0$ мм из сплава молибден-медь, с помощью теплопроводящего клея. Теплопроводность основания $167 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, теплопроводность клея $50 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Измерения динамической характеристики проводили на стенде, структурная схема показана на рис. 7. Стенд позволяет проводить измерения мощности, подводимой к образцу, проходящую через образец и отраженную. Измерение отраженной мощности показывает сколько мощности рассеивается на кристалле, что дает возможность оценить тепловую нагрузку ограничителя мощности.

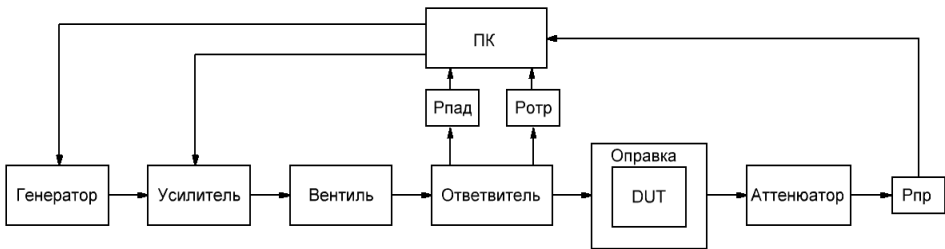


Рис. 7. Структурная схема стенда высокого уровня мощности для измерения динамической характеристики.

Fig. 7. Block diagram of the high-power dynamic measurement setup

Определение порога сгорания проводили по методике, ступенчатого повышения непрерывной мощности с последующим возвратом к низкому уровню сигнала на каждом шаге для проверки целостности прибора [5]. Температура окружающей среды при измерениях $+25^\circ\text{C}$. Частота измерений 10 ГГц , время воздействия 10 секунд , мощность повышали до сгорания прибора.

Результаты измерений динамических характеристик ограничителей мощности показаны на рис. 8.

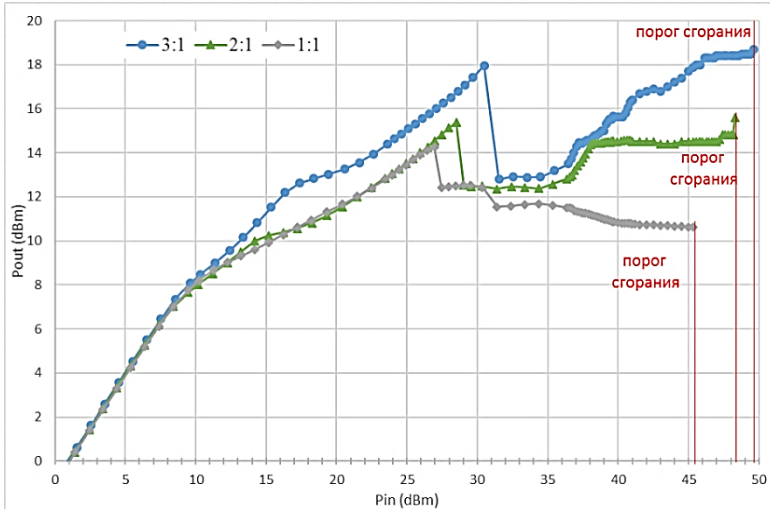


Рис. 8. Измеренные динамические характеристики.

Fig. 8. Measured dynamic characteristics

Порог сгорания для топологии 1:1 составил 45,3 дБм, для 2:1 — 48,3 дБм и для топологии 3:1 — 49,6 дБм. Полученные значения подтверждают прямопропорциональную зависимость порога сгорания от периферии диода. При этом максимально допустимая входная мощность, обеспечивающая наработку на отказ 100 тыс. ч., на 4 дБ меньше порога сгорания. Разброс порога сгорания не превышает 10 % при измеренных 5 образцов каждого типа. Проходящая мощность для топологий 1:1, 2:1 и 3:1 не превысила 14,5 дБм, 16 дБм и 19 дБм соответственно.

Полученные результаты измерений порогов сгорания ограничителей мощности имеют хорошее совпадение с расчетными значениями.

Исходя из данных по порогу сгорания полученных в этой работе и исследований серийно выпускаемых на предприятии приборов была определена удельная мощность сгорания $p-i-n$ -диода, которая характеризует технологию. Удельная мощность сгорания составляет ~ 20 Вт / 100 мкм периферии.

Так же, в тех же условиях, были исследованы ряд серийных образцов ограничителей мощности зарубежных фирм. А именно, *NDAC12019*, *NDAC12035*, *NDAC12027* фирмы *Neditek* (Китай) и *TGL2209* фирмы *Qorvo* (США). Все рассмотренные МИС СВЧ нормированы на импульсную максимально допустимую входную мощность. Однако в случае, когда длительность импульса мощности превышает тепловую постоянную времени арсенида галлия, тогда можно считать данный режим непрерывным.

Тепловая постоянная времени слоя проводника на теплоотводе с бесконечной теплопроводностью выражается уравнением [6]

$$t = 4 L^2 c_v / \pi^2 k$$

где L — толщина слоя [см]; k — коэффициент теплопроводности (для GaAs $k \approx 0,04$ Вт/(°С · мм); c_v — коэффициент теплоемкости (для GaAs $c_v \approx 1,7$ Дж/(см³ · °С).

Из вышеприведенного выражения следует, что для GaAs толщиной 100 мкм тепловая постоянная времени составляет 170 мкс.

В таблице 2 показаны результаты, полученные в данной работе в сравнении с зарубежными приборами.

Таблица 2. Сравнение параметров ограничителей мощности.

Table 2. Comparison of parameters of power limiters

Параметр	Диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	КСВН (вход/выход)	Просачивающаяся мощность, мВт	Заявленная максимально допустимая входная мощность, Вт	Найденный порог сгорания, Вт	Удельная мощность сгорания, Вт/100мкм	Площадь кристалла, мм ²
Схема 1:1	1,0—16,0	< 0,8	< 2,0	13—28	13,5 CW	33,8	~22	0,92
Схема 2:1	1,0—16,0	< 0,8	< 2,0	12—40	27 CW	67,6	~24	2,43
Схема 3:1	1,0—16,0	< 0,8	< 2,0	17—80	36 CW	91,2	~23	2,43
NDAC12019 Neditек (Китай)	8,0—12,0	0,4—0,5	< 1,4	35—80	30 PW ¹	17,5	~8,8	2,03
NDAC12027 Neditек (Китай)	8,5—10,5	0,65—0,85	< 1,4	55—65	50 PW ²	66,2	~10,2	1,96
NDAC12035 Neditек (Китай)	8,0—12,0	0,6—0,8	< 1,6	64—100	100 PW ³	42,5	~9,6	7,84
TGL2209 Qorvo (США)	8,0—12,0	0,3—0,5	< 1,7	40—100	50 PW ⁴ 10 CW	8,5	~5,7	4
TGL2210-SM Qorvo (США)	0,05—6,0	< 0,55	< 1,7	25—40	100 PW ⁴ 85 CW	—	—	QFN 4×4
Статья [1]	2,0—5,0	0,3—0,4	< 1,4	12—40	100 CW	—	—	5

Примечания.

1. Длительность импульса 6 мс, коэффициент заполнения 40 %;
2. Длительность импульса 2 мс, коэффициент заполнения 30 %;
3. Длительность импульса 3 мс, коэффициент заполнения 30 %;
4. Длительность импульса 10 мкс, коэффициент заполнения 10 %.

3. Заключение

В работе показан подход к расчету МИС СВЧ ограничителя мощности на $p-i-n$ -диодах с повышенным порогом сгорания. Повышение уровня допустимой входной мощности реализовано за счет перераспределения токов, протекающих их через диоды в двухкаскадной схеме. Было определено, что оптимальное реализуемое соотношение емкости первого каскада ко второму является 3:1.

По технологии АО «НПП “Исток” им. Шокина были изготовлены схемы с соотношениями 1:1, 2:1, 3:1. Проведены зондовые измерения S -параметров ограничителей мощности и измерения динамических характеристик кристаллов в оснастке. Полученные значения порогов сгорания имеют хорошее совпадение с расчетными значениями. Подтверждена прямая зависимость порога сгорания от периферии диода. Удельная мощность сгорания составила для технологии АО «НПП “Исток” им. Шокина» ~20 Вт / 100 мкм периферии, что превышает уровень исследованных зарубежных аналогов.

Список литературы

1. Bouchez J., Nguyen T. [et al.] A 2–5 GHz 100W CW MMIC Limiter using a Novel Input Topology // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). 2013. P. 1—4.
2. Boles T., Bukowski J., Brogle J. Monolithic High Power 300 Watt, S-Band, HMIC PIN Diode Limiter // IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). 2019. P. 1—5.
3. Груша А. В., Крутов А. В., Ребров А. С. МИС СВЧ ограничителя мощности с уровнем проходящей мощности менее 14 мВт в диапазоне частот 8—12 ГГц // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 32—33.
4. Smith D. G., Heston D. D., Heimer B., Decker K. Designing Reliable High-power Limiter Circuits with GaAs PIN Diodes // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2002. Vol. 2. P. 1245—1247.
5. Крутов А. В., Ребров А. С. Экспериментальное определение уровня допустимой входной мощности для монолитных интегральных схем защитного устройства. В сб. : 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2010 (Севастополь, 13—17 сент. 2010 г.). 2010. С. 143—144.
6. Carslow H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat in Solids. Oxford : Oxford University Press, 1959.

Информация об авторах

Груша Александр Васильевич, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Российская федерация.

Крутов Александр Владимирович, ведущий инженер-конструктор, АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Российская федерация.

Ребров Александр Сергеевич, начальник лаборатории, АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Российская федерация.

Design Method for Increase Power Burn Out MMIC Power Limiter

A. V. Grusha, A. V. Krutov, and A. S. Rebrov

*Scientific and production enterprise "Istok" n. a. A. I. Shokin, JSC
Vokzalnaya st., 2A, Fryazino, Moscow region, 141190, Russian Federation
info@istokmw.ru*

Received: June 1, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The article shows the method of constructing the MMIC power limiter. The purpose of this research is to increase the burnout level. We considered a classical two-stage circuit on anti-parallel p-i-n diodes. The idea of increasing the burnout level is to redistribute currents, so that at the burnout power at the first and second stages, the current is equal to the saturation current – 0.41–0.45 A / 100 μm . To do this, a simulation of the circuits was carried out – the ratio of the capacity of the first to the second stage 1:1, 2:1, 3:1 and 4:1. The design circuits were manufactured at p-i-n diode GaAs technology of JSC RPC "Istok" named after Shokin, the height of the diode barrier is 1,1 V / 1 mA, the breakdown voltage is 45 V / 100 μA . The results of probe measurements S-parameters of power limiters and measurements of dynamic characteristics in the fixture are presented. Devices in the frequency range from 1 GHz to 16 GHz have losses less than 0.8 dB and VSWR input and output less than 2. The burnout level in continuous power at a frequency of 10 GHz was: for topology 1:1 — 45.3 dBm, 2:1 — 48.3 dBm and for topology 3:1 — 49.6 dBm. Under the same conditions, serial MMIC power limiters of foreign company were investigated. The burnout power density was ~20 W / 100 μm of the periphery, for the JSC RPC "Istok" named after Shokin technology, which exceeds the level of the investigated foreign analogues.*

Keywords: *p-i-n diode, MMIC, power limiter, GaAs, burnout level, high power handling, saturation current, burnout power density.*

For citation (IEEE): A. V. Grusha, A. V. Krutov, and A. S. Rebrov, "Method for Constructing MIS Microwave Power Limiters to Increase the Combustion Threshold," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 79–92, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.06. (In Russ.).

References

- [1] J. Bouchez, T. Nguyen, V. Zomorrodian, E. Reese, and D. Sturzebecher, "A 2–5GHz 100W CW MMIC Limiter Using a Novel Input Topology," *2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2013, doi: 10.1109/csics.2013.6659191.
- [2] T. Boles, J. Bukowski, and J. Brogle, "Monolithic High Power 300 Watt, S-Band, HMIC PIN Diode Limiter," *2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*, 2019, doi: 10.1109/comcas44984.2019.8958017.

- [3] A. V. Grusha, A. V. Krutov, and A. S. Rebrov, “MMIC power limiter with a transmitted power level of less than 14 mW in the frequency range of 8–12 GHz,” *Microwave and Telecommunication Technologies*, 2021, no. 3. pp. 32–33. (In Russ.).
- [4] D. Smith, D. Heston, J. Heston, B. Heimer, and K. Decker, “Designing reliable high-power limiter circuits with GaAs PIN diodes,” *2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278)*, 2002, doi: 10.1109/mwsym.2002.1011885.
- [5] A. V. Krutov and A. S. Rebrov, “Experimental determination of power handling level for MMIC limiter,” *2010 20th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”*, 2010, doi: 10.1109/crmico.2010.5632979. (In Russ.).
- [6] H. S. Carslow and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*. Oxford : Oxford University Press, 1959.

Information about the authors

Alexander V. Grusha, Lead engineer, JSC RPC “Istok” n. a. Shokin, Russian Federation.

Alexander V. Krutov, Lead engineer-constructor, JSC RPC “Istok” n. a. Shokin, Russian Federation.

Alexander S. Rebrov, Chief of the laboratory, JSC RPC “Istok” n. a. Shokin, Russian Federation.