Исследование теплового режима СВЧ усилителей мощности X диапазона

В.П. Тимошенко, А.И. Хлыбов, Д.В. Родионов, А.Г. Ефимов, Ю.А. Чаплыгин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, valeri04@hotmail.com

Аннотация — Проведено исследование теплового режима СВЧ усилителя для прямо-передающего модуля АФАР X диапазона. Представлены экспериментальные результаты измерения температуры на кристалле GaAs усилителя, полученные с помощью ИК-камеры SC5700, и результаты компьютерного моделирования распределения тепла. Показано, что использование скважности более 30% при длительности импульса 2,5 мкс может привести к значительному перегреву транзисторов выходного каскада. Даны рекомендации по способу отвода тепла от кристалла усилителя. Результаты эксперимента хорошо совпадают с результатами компьютерного моделирования. Даны рекомендации по оптимизации/выбору длительности импульса и скважности для усилителей модуля АФАР X-диапазона.

Ключевые слова — СВЧ, прямо-передающий модуль АФАР, тепловое моделирование, усилитель мощности.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные радиолокационные системы нового поколения, а также радиолокаторы космического базирования используют активные фазированные антенные решетки (АФАР), выполненные по модульному принципу с целью снижения массогабаритных характеристик и возможности достижения сложных тактико-технических системных требований. В связи с этим актуальной становится задача повышения интеграции, многофункциональности и надежности узлов АФАР, которая состоит из набора СВЧ модулей.

Модуль радиолокационной АФАР содержит канал передачи и канал приема. Для управления амплитудой в приемном и передающем каналах служат аттенуаторы (АТТ), а для управления фазой — многоэлектродные фазовращатели (ФВ). Для перевода последовательного кода управления в параллельный служат преобразователи кодов [1-2].

Современные модули АФАР X диапазона (рис. 1) включают несколько функциональных блоков, в которых наиболее напряженным с точки зрения теплового режима является выходной усилитель мощности. В табл. 1 и 2 приведены электрические параметры усилителей мощности на основе GaAs и GaN, предлагаемые ведущими мировыми компаниями в X диапазоне.

Рис. 1. Структурная схема модуля АФАР

Анализ параметров усилителей, приведенных в табл. 1, и, в частности, мощности и коэффициента полезного действия (КПД) усилителей на основе GaAs показывает, что, например, при КПД=30% и мощности выходного сигнала 10 Вт на самом кристалле усилителя рассеивается мощность 20 Вт. Основная часть этой мощности приходится на транзисторы выходных каскадов. В связи с этим передатчики модулей АФАР и, в частности, усилители мощности работают в импульсном режиме со скважностью обычно не превышающей 50%. Однако даже в этом случае при больших длительностях импульса питания наблюдается спад выходной мощности сигнала за счет локального разогрева транзисторов выходного каскада (см. рис. 2). В конечном итоге длительность выходного импульса или его скважность влияет на разогрев транзисторов каскадов усилителя, что в свою очередь приводит к деградации выходной мощности.

II. ЦЕЛЬ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является исследование теплового режима усилителя мощности для топологической оптимизации кристалла, уменьшения внутри кристаллической электротермической обратной связи, определения необходимости использования систем отвода тепла, а также минимизация межкристаллических тепловых эффектов.

В качестве объекта исследования использован кристалл ИМС усилителя мощности X-диапазона компании TRANSCOM, размещенного на многослойной печатной плате (Rogers марка RO 4003 рис. 2). На верхнем, первом слое металлизации сформированы копланарные линии с полосой пропускания не менее 25 ГГц, соединенные с входом и выходом усилителя. Также на первом и последнем слоях металлизации выполнена разводка шин питания

и смещения. Второй и третий металлические слои являются нулевыми шинами и обеспечивают развязку СВЧ сигнала. По всей поверхности платы имеются сквозные металлизированные отверстия, соединяющие области нулевых шин первого и четвертого слоя со вторым и третьим слоями. Соединения между шинами питания и смещения в разных уровнях выполнены также с помощью данных отверстий.

Таблица 1

Электрические параметры GaAs усилителей мощности X-диапазона [3] (выходная мощность не менее 10 Вт)

f , ГГц	$P_{1дБ}$, дБм	$P_{нас}$, дБм	КПД, %	K_y , дБ	U , В	I , А	Марка	Фирма, страна
8-10	42	43	30	29	10	4	МААРGM0079	M/A-COM, США
8,5-11	–	40	32	22 нас.	10	–	MA08509D	
8,5-10,5	–	≥40,5 имп.	≥43	17	8	≤5,5	МААР-015036	
8,5-11,5	–	40 имп.	35	36	8	≤5,5	МААР-015035	
8,5-11	–	40,5	37	21,5	8	≤4,5	XP1006-FA	Mimix Тайвань
7,5-11,5	41,6	–	28	30	12	3	TGA2517-GSG	TriQuint США
8,5-10,5	38,5	40	35	25	8	3	AM07511542-WM	AMCOM США
9-10	–	40	40	21	9	3,2	RFHA5966A	RFMD, США
9-10,5	–	41	40	18	8	2,1	CHA8100	ОММIS, Франция
8-12	40 имп.	40,5 имп.	36	≥21	≤9	≤5	CGY21239AUH/C1	
8-12	41 имп.	41,2 имп.	36	≥22	8,5	≤5	CGY21239AUH/C1	
9,5-10,5	40	–	23	≥5	9	4	TIM0910-10	
9,5-10,5 10,7-11,7	41	–	31	≥6	9	4,5	TIM0910-15L TIM1011-15L	

Таблица 2

Электрические параметры GaN усилителей мощности X-диапазона (выходная мощность более 10 Вт)

f , ГГц	$P_{1дБ}$, дБм	$P_{нас}$, дБм	КПД, %	K_y , дБ	U , В	I , А	Марка	Фирма, страна
до 18	–	40.1	73.3	21	28	0.25	TGF2013-2-02	Qorvo, США
до 12	–	40.8	68.8	24.	32	0.05	QPD1022	
до 12	–	43	50	11	32	0.1	TGF2978-SM	
до 12	–	44	50	11	32	0.15	TGF2979-SM	
6-18	–	43	20	18	20	2,5	TGA2963-CP	
7,9-11	–	42	38	18	24	0.6	QPA1010	
7,9-11	–	44.5	37.5	19.5	24	1.5	QPA1011	
7,9-11	–	47	34	24	28	0.65	TGA2238-CP	
7,9-11	–	50	35	22	28	1.3	TGM2635-CP

Рис. 2. Спад мощности выходного импульса (50 Ом нагрузка) в зависимости от длительности импульса питания (длительность импульса 2.5мкс, скважность 15%, частота=60 кГц, импульсный ток потребления 462мА)

Рис. 3. Исследование растекания тепла на кристалле СВЧ усилителя мощности (скважность 15%, температура среды 22° C); а)- кристалл усилителя мощности фирмы TRANSCOM, б)-экспериментальные исследования на базе ИК - камеры SC5700, в)-компьютерное моделирование

Кристалл усилителя мощности смонтирован на металлическую площадку с использованием теплоэлектропроводящего клея. Непосредственно под

кристаллом выполнены 12 сквозных металлизированных отверстий, соединенных со всеми слоями металлизации платы. Данные

металлизированные отверстия за счет высокой теплопроводности снижают общее тепловое сопротивление кристалл - основание платы. Оценка теплового сопротивления одного отверстия получена из выражения:

$$R_T = 4L / (G\pi d^2) = 121 \text{ K/Вт.}$$

где L - длина отверстия (1.5 мм), $G = 394 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (коэффициент теплопроводности для меди), $d = 0,2 \text{ мм}$ диаметр отверстий.

III. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

На рис. 3 показан кристалл усилителя, максимальные температуры в трех точках (табл. 3, 4), а также экспериментальные измерения температуры с помощью ИК-камеры SC5700 и компьютерное температурное моделирование кристалла.

Полная мощность P_{tot} , рассеиваемая кристаллом, преобразуемая в тепло, определяется выражением:

$$P_{tot} = P_{in} + I_{dd}U_{dd} - P_{out} \quad (2)$$

где P_{in} , P_{out} - входная и выходная мощность, соответственно; $I_{dd}U_{dd} = P_{vdd}$ - мощность отдаваемая источником питания.

Как видно из рис. 2 и 3 выходная мощность радиочастотного сигнала зависит от температуры транзисторов выходного каскада (см. точку 1 на рис. 3). Проведены исследования зависимости выходной мощности от температуры основания (рис. 4). Она зависит от потребляемого тока, являющегося функцией скважности и длительности импульсов питания. При этом при повышении скважности импульсов питания рабочая температура транзисторов выходного каскада значительно повышается. Так, например, при скважности 30%, температура под затвором транзистора достигает более 70 °C (см. рис. 5).

Рассеивание тепла, выделяемого на кристалле GaAs усилителя, обеспечивается через тело самого кристалла (толщина подложки кристалла 100 мкм) и металлизированную плату на основе материала Roger. Проведены экспериментальные исследования зависимости температуры обратной стороны платы от мощности, рассеиваемой на кристалле. При выделяемой тепловой мощности 8 Вт, что соответствует почти 50% скважности импульсов питания, температура обратной стороны платы будет соответствовать 165 °C (температура среды 22 °C). Это однозначно требует использования металлического теплоотвода.

Рис. 4. Спад мощности выходного сигнала в зависимости от температуры основания платы

Рис. 5. Зависимость температуры от скважности импульсов питания

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Скважность импульсов питания влияет на термический разогрев каскадов мощного СВЧ усилителя. При 15% скважности температура подзатворной области транзисторов достигает 55 °C (внешняя температура 22 °C). В случае непрерывной работы усилителя при входном сигнале $f_{in}=10 \text{ ГГц}$ температура канала может составлять более 180 °C. Повышенная температура кристалла влияет на продолжительность безотказной работы транзисторов и металлизации входных/выходных трактов (электромиграция).

2. Отвод тепла с кристалла достигается уменьшением толщины GaAs подложки до 70-100 мкм с последующей металлизацией обратной стороны и формированием сквозных отверстий, а также посадкой кристалла на теплопроводящее металлизированное или металлическое основание с помощью электро-теплопроводящего припоя или клея (тепловое сопротивление металлизированного отверстия диаметром 200 мкм составляет $R_T=121 \text{ K/Bm}$).

3. Растекание тепла вбок по поверхности кристалла наиболее эффективно в случае нанесения металлизации на поверхности кристалла, что доказывает невысокая температура на поверхности микрополосковых линий.

4. При скважности импульсов до 30% для повышения эффективности охлаждения кристалла сквозные металлизированные отверстия в плате необходимо располагать непосредственно под активными транзисторными структурами кристалла усилителя.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (Договор № 16-29-09588\18).

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Приемно-передающие модули АФАР сайт компании Микран <http://www.micran.ru/productions/svch/aesa/> (дата проверки ресурса 23.04.2018).
- [2.] V, Timoshenkov, Y. Chaplgin, A. Khlybov, D. Rodionov, A. Efimov X - band power amplifier for Active Electronically Scanned Array Antenna, Proceedings of the 2018 IEEE Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2018 ElConRus), 29 Jan 1Feb. 1-3, 2018, DOI [10.1109/EIConRus.2018.8317343](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317343)
- [3] Field Proven GaN solution from Qorvo <http://studylib.net/doc/18318119/field-proven-gan-solutions-from-qorvo%C2%AE> (дата проверки ресурса 23.04.2018).

Thermo Researching of X-band Microwave Amplifier

V. Timoshenkov, A. Khlybov, D. Rodionov, A. Efimov, Yu. Chaplgin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, valeri04@hotmail.com

Abstract — Modern new generation radar systems use the active phased array antenna (APAA), which are modularly designed to reduce the weight and size characteristics and the ability to achieve complex tactical and technical system requirements. In this connection, the task of increasing the integration, multifunctionality and reliability of APAA units, which consists of a set of microwave modules, becomes topical.

The APAA module contains a transmission channel and a receive channel. Attenuators (ATT) are used to control the amplitude in the receiving and transmitting channels. Multi-phase phase shifters (FV) are used for control of the phase, and code converters are used to translate the serial control code into parallel one. [1-2].

APAA X-band modules include several functional units, in which the most intense from the point of view of the thermal regime is the output power amplifier [3].

Analysis of the parameters of amplifiers such as the power consumption and efficiency of GaAs amplifiers shows that, for example, at an efficiency of 30% and an output power of 10 W, the total power dissipation of the 20W dissipates on the amplifier itself. The main part of this power comes from the transistors of the output stage. In this regard, the transmitters of APAA modules and, in particular, the power amplifiers operate in a pulsed mode with a duty cycle usually not exceeding 50%. However, even in this case, for long duration of the power pulse, the output power of the signal decreases because of the local heating of the output stage transistors. Ultimately, the duration of the output pulse or its duty cycle affects the heating of the transistors of the amplifier stages, which in turn leads to degradation of the output power.

The purpose of this work is to study the thermal conditions of the power amplifier for topological optimization of the crystal, to reduce the internal electrothermal feedback, to

determine the need for using heat removal systems, and to minimize intercrystal thermal effects.

As the object of the study, the X-band amplifier of the company TRANSCOM is placed on a multilayer printed circuit board (Rogers RO 4003) was used. The thermal mode of the microwave amplifier for the APAA X-band transmit-receive module was studied. The experimental results of measuring the temperature on a GaAs crystal of an amplifier obtained with the SC5700 IR camera and the results of computer simulation of heat distribution are presented. It is shown that the use of a duty cycle of more than 30%, with a pulse duration of 2.5 μ s can lead to significant output stage transistors overheating. Recommendations for removing heat from the crystals of the amplifier are presented. The results of the experiment are in good agreement with the results of computer simulation. Recommendations for optimization / selection of the pulse width and duty cycle for the amplifiers of the APAA X-band module are formulated.

Keywords — microwave, module of active phased array antenna, thermo simulation, power amplifier.

REFERENCES

- [1]. Priemo peredavushchie moduli Micran (Transmit receive modules of the active phased array antenna Micran company) <http://www.micran.ru/productions/svch/aesa/> (access date: 09.10.2014)
- [2.] V, Timoshenkov, Y. Chaplgin, A. Khlybov, D. Rodionov, A. Efimov X - band power amplifier for Active Electronically Scanned Array Antenna, Proceedings of the 2018 IEEE Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2018 ElConRus), 29 Jan 1Feb. 1-3, 2018, DOI [10.1109/EIConRus.2018.8317343](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317343)
- [3] Field Proven GaN solution from Qorvo <http://studylib.net/doc/18318119/field-proven-gan-solutions-from-qorvo%C2%AE> (access date: 09.10.2014).