

ОСОБЕННОСТИ МОНТАЖА GaN КРИСТАЛЛОВ СВЧ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

© И. С. Бенуни, О. Ю. Дьяконица, А. О. Климов, Н. А. Павлюк-Мороз,
Ал. В. Редька

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

Представлены результаты измерений СВЧ параметров и осуществлён анализ зависимостей выходных характеристик СВЧ усилителей мощности от качества пайки. Проведены рентгенографические исследования паяных соединений приборов. Объяснено образование пустот в паяном слое под элементами СВЧ усилителя.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, коэффициент усиления, смачиваемость, усилитель мощности, вакуумная пайка, рентгенография

Сведения об авторах: Бенуни Игорь Суренович; Дьяконица Олег Юрьевич, аспирант, [djakonisa_oj@pulsarnpp.ru](mailto:djakonica_oj@pulsarnpp.ru); Климов Алексей Олегович, аспирант, klimov_ao@pulsarnpp.ru; Павлюк-Мороз Никита Александрович; Редька Алексей Владимирович

FEATURES OF MICROWAVE GaN POWER AMPLIFIER DIES SOLDER BONDING

I. S. Benuni, O. Yu. Dyakonitsa, A. O. Klimov, N. A. Pavlyuk-Moroz, Al. V. Redka

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

Results of microwave parameter measurements and the analysis of microwave power amplifier output parameters' dependence on the soldering quality are presented. X-ray study of solder joints of the devices was performed. Formation of cavities in solder layer under the amplifier elements is explained.

Keywords: frequency response, gain, wettability, power amplifier, vacuum soldering, X-ray analysis

Data of authors: Benuni Igor Surenovich; Dyakonitsa Oleg Yurievich, postgraduate, djakonica_oj@pulsarnpp.ru; Klimov Aleksey Olegovich, postgraduate, klimov_ao@pulsarnpp.ru; Pavlyuk-Moroz Nikita Aleksandrovich; Redka Aleksey Vladimirovich

Введение

Твердотельные СВЧ усилители мощности (рис. 1) на основе транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) во многих радиотехнических системах определяют их важнейшие характеристики, такие как выходная и потребляемая мощность, коэффициент усиления, коэффициент полезного действия, полоса рабочих частот, массогабаритные параметры и параметры надёжности. Транзисторы на основе GaN имеют более высо-

кие рабочие напряжения питания (30-50 В), КПД (до 80 %), коэффициент усиления, выходную мощность, температурную (выше 300 °С) и радиационную стойкость, чем GaAs транзисторы. Следовательно, являются более привлекательными для применения в СВЧ усилителях мощности [1]. В то время как серийные GaAs транзисторы имеют удельную мощность около $P_{\text{вых.уд}} \sim 0,5-0,8$ Вт/мм, серийно выпускаемые GaN HEMT обладают $P_{\text{вых.уд}} = 3-10$ Вт/мм [2].

Конструктивно микромодуль СВЧ усилителя мощности или внутрисогласованный транзистор (ВСТ) представляет собой металлическое основание, выполненное, как правило, из сплава МД-40 или аналогичного по тепловому сопротивлению и коэффициенту температурного линейного расширения, на котором установлены теплоотвод, кристалл транзистора, поликоровые согласующие платы, согласующие керамические ёмкости, блокировочные ёмкости, СВЧ микрополосковые линии. Все навесные элементы устанавливаются на эвтектический сплав AuSn. Перемычки между элементами усилителя развариваются золотой проволокой в автоматическом (полуавтоматическом) режиме.

Особенности процесса сборки СВЧ усилителей

Сборка СВЧ усилителей является трудоёмким и ответственным технологическим этапом. От качества сборочных операций в значительной степени зависят стабильность электрических параметров и надёжность готовых изделий.

Сложность процесса сборки заключается в том, что каждый класс дискретных приборов имеет свои конструктивные особенности, которые требуют определённых сборочных операций и режимов их проведения.

Эксплуатационная надёжность СВЧ мощных транзисторов определяется главным образом их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии монтажа кристалла в корпус. При образовании скрытых дефектов (пустот, микротрещин, сколов) под кристаллом возникают участки с аномально высоким тепловым сопротивлением. Если площадь дефектов невелика по сравнению с площадью кристалла и не затрагивает активной структуры транзистора, то изделия имеют сравнительно низкий уровень теплового сопротивления. Но в процессе длительной эксплуатации в условиях экстремальных термоциклических воздействий такие изделия могут оказаться потенциально ненадёжными из-за развития микротрещин до активной структуры. Уровень остаточных термических напряжений во многом зависит от качества присоединения кристаллов к корпусу [4].

При анализе процессов монтажа усилителей были выявлены следующие особенности: необходимость подбора температурных режимов при пайке и сварке в зависимости от размеров и материалов элементов сборки; невозможность контроля равномерности распределения припоя по поверхности подложки; невозможность контроля смачиваемости и непропаев.

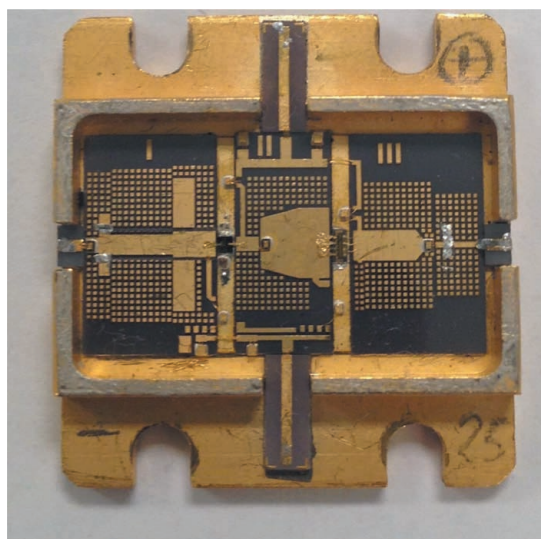


Рис. 1

Микромодуль СВЧ усилителя мощности с $P_{\text{вых. нмн}} > 30 \text{ Вт}$ [3]

Современная групповая пайка мощных СВЧ GaN транзисторов осуществляется в вакуумной печи оплавления с применением защитной атмосферы (чистого азота, водорода или формир-газа) и припоя Au80Sn20 путём ручной укладки кристаллов, микрополосковых линий, плат, ёмкостей и др. Температура плавления такого припоя равна 280 °С, что позволяет паять полупроводниковые кристаллы без риска разрушения или деградирования их структуры. Однако из-за большого поверхностного натяжения Au-Sn не растекается свободно по горизонтальной поверхности, несмотря на превосходную смачиваемость, поэтому кристаллы рекомендуется паять с прижимом и (или) с использованием притирки [5]. При укладке припоя и остальных элементов может наноситься флюс для исключения смещения кристаллов во время размещения корпусов в камере и для улучшения растекания припоя.

Однако применение флюса для активных приборов нежелательно из-за возможности его попадания на металлизацию кристалла и других элементов монтажа, что может приводить к преждевременному выходу прибора из строя во время эксплуатации. Кроме того, для вакуумных печей применение флюса не рекомендуется из-за загрязнения камеры.

Стоит отметить, что несовершенство паяемых поверхностей также существенно

снижает качество монтажа сборок. Поэтому актуальными являются проблемы снижения количества дефектов пайки, равномерности растекания припоя, улучшения смачиваемости паяемых поверхностей, точного позиционирования кристаллов во время пайки, решение которых позволит улучшить электрические и механические характеристики, а также обеспечить хорошую теплопроводность.

Кристаллы мощных СВЧ GaN транзисторов на своей лицевой поверхности имеют так называемые «воздушные мосты», что существенно сужает возможности традиционных методов пайки. Кроме того, малый размер кристалла и сверхплотный монтаж элементов усилителя внутри корпуса исключают возможность использования присосок («пирамидок») для прижима и притирки.

Рентгенографические исследования паяных соединений

После монтажа партии приборов в вакуумной печи оплавления было замечено, что некоторые приборы не обеспечивали достаточное усиление сигнала, а также довольно быстро выходили из строя. Отказавшие приборы для анализа и выявления причин выхода из строя были отправлены на рентгеновскую дефектоскопию.

На рис. 2 представлен рентгеновский контрастный снимок вышедшего из строя

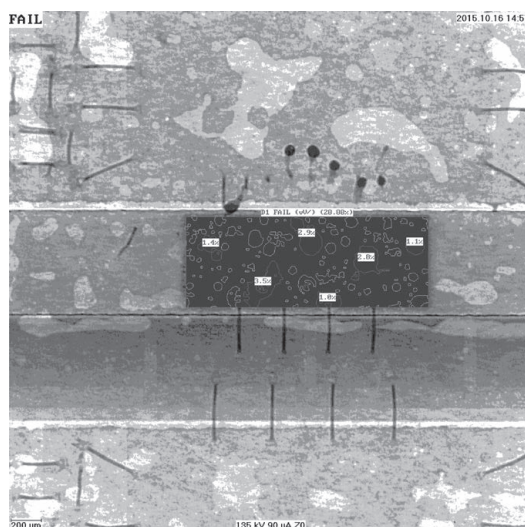


Рис. 2

Рентгеновский снимок вышедшего из строя кристалла

кристалла СВЧ транзистора. Площадь пустот составила почти 30 % от площади кристалла. Видно, что значительная их часть располагается как раз под активной структурой.

Как видно на снимке, качество пайки в вакуумной печи оплавления не удовлетворяет требованиям для мощных СВЧ транзисторов, что в конечном итоге приводит к снижению мощности транзисторов и их преждевременному выходу из строя.

Пустоты в паяных соединениях могут возникать из-за пузырьков газа, которые остаются в объёме припоя на этапе его затвердевания. Хотя в процессе оплавления припоя воздух может быть захвачен в область соединения, обычно считается, что газы, образующие пузырьки, в основном выделяются из флюсов при улетучивании растворителей как побочные продукты реакций активаторов с оксидами металлов и при разложении смол и прочих компонентов. Будут ли эти газы выходить из паяного соединения или останутся в них в виде пустот, зависит от множества причин, включая площадь и геометрию паяного соединения. Поскольку несмоченные области основания служат местом прикрепления пузырьков, паяемость оснований и активность флюса становятся факторами, влияющими на формирование пустот в паяном соединении.

Форма и размер газовых пустот определяются равновесием между давлением газа и поверхностным натяжением расплавлен-

ного припоя, поэтому они обычно имеют почти правильную сферическую форму и в целом гладкую внутреннюю поверхность. Исключения возникают, когда пузырёк прикреплен к одной из соединяемых поверхностей, которая не была смочена припоем, и когда равновесный диаметр превышает зазор соединения. Источники газа, образующего пустоты, могут быть различными, включая улетучивание влаги, захваченной дефектами медной металлизации платы, и разложение органических веществ, осажённых в процессе гальванической металлизации.

Из сказанного ранее следует, что важно обеспечить хорошее смачивание оснований, чтобы отсутствовали несмоченные области или области с неполным смачиванием, которые могут представлять собой точки для прикрепления пузырьков. Поверхностное натяжение расплавленного припоя настолько велико, что выталкивающей силы недостаточно для отрыва пустот от несмоченных областей. Пузырек, прикрепленный к несмоченной области, состоит из остатка флюса. При увеличенном времени пребывания выше ликвидуса в остатке флюса продолжают выделяться летучие соединения, и пока припой расплавлен, пустота будет расти.

Большинство пустот, остающихся после вакуумного оплавления, – это пустоты, прикрепленные к несмоченным областям [6].

На рис. 3 представлен рентгеновский контрастный снимок СВЧ ВСТ. Видно, что

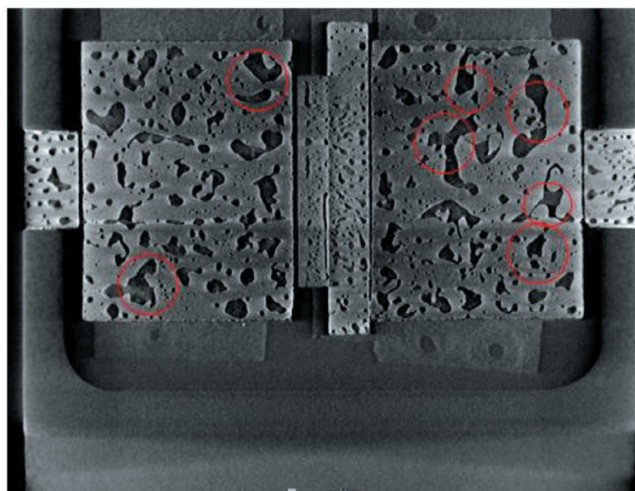


Рис. 3

Рентгеновский контрастный снимок СВЧ ВСТ

большинство крупных пустот под платами согласования имеет неправильную форму. В основании каждой такой пустоты чётко прослеживается остаток флюса (тёмные области).

Эксперимент по прижиму кристаллов

С целью исключения вышеописанных недостатков был опробован способ монтажа кристаллов [7]. Для реализации данного способа было предложено устройство, состоящее из двух губок с пропилами (рис. 4), механизма взаимного перемещения губок и механизма их вертикального перемещения с контролем усилия прижима. Преимущества данного устройства захвата кристаллов заключаются в следующем:

- возможность крепления предлагаемого устройства вместо присоски любой установки пайки, что позволяет передавать механические ультразвуковые колебания в процессе пайки;
- контролируемое усилие захвата кристаллов;
- исключение возможности разрушения кромок кристаллов за счёт специальной конфигурации рабочих поверхностей захватывающих губок;
- возможность осуществлять контроль качества облуживания путём неразрушающего снятия кристалла после пайки и дальнейшего визуального анализа площади пропайки;

– возможность осуществлять предварительное облуживание кристаллов за счёт надёжного захвата;

– возможность дополнительно прижимать кристаллы после пайки в вакуумной печи оплавления с целью удаления пустот.

Как видно из рисунка, наличие цилиндрических выемок на рабочих плоскостях устройства позволяет избежать сколов и разрушений при механическом захвате кристаллов.

На рис. 5 представлен контрастный рентгеновский снимок кристалла, припаянного с помощью прижима и УЗ притирки. Несмоченные припоем области можно объяснить плохой очисткой паяемой балки под кристаллом.

Для эксперимента было изготовлено 4 прибора. Для двух приборов была проведена притирка кристалла, в двух других притирка не проводилась. Затем были сняты АЧХ усилителей (рис. 6 и рис. 7) на малом входном сигнале и измерена выходная мощность (табл.).

Как видно из АЧХ транзисторов, увеличение коэффициента передачи чётко прослеживается уже на малом уровне входной мощности. В среднем в данной полосе частот K_p увеличивается на 2 дБ.

По измерениям выходной мощности усилителей на большом входном сигнале видно, что в приборах с непритёртыми кристаллами усиление существенно «просаживается». Причины деградации параметров, очевидно,

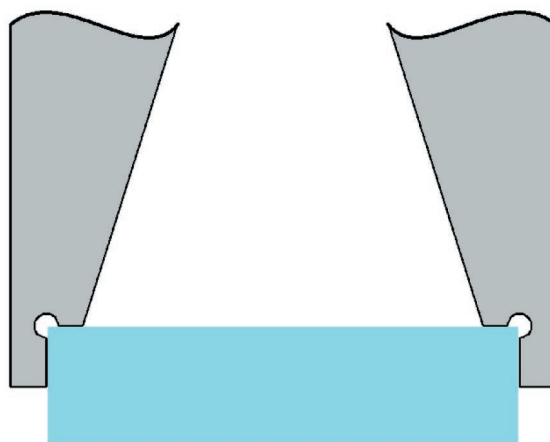


Рис. 4

Инструмент захвата и прижима кристаллов

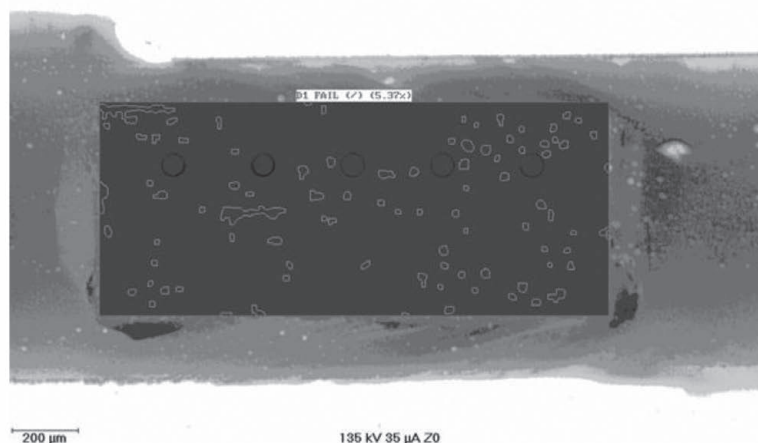


Рис. 5

Рентгеновский контрастный снимок притёртого кристалла

обусловлены наличием локальных участков активной структуры с аномально высокой температурой и повышенным тепловым сопротивлением кристалл-корпус за счёт дефектов под кристаллом, затрудняющих распространение теплового потока и вызывающих изменение электрических параметров усилителя.

После проведённых экспериментов можно сказать, что притирка кристаллов является неотъемлемой частью сборки полупроводниковых приборов. Благодаря этой операции улучшается выходная мощность (до 25 %), соответственно КПД и усиление.

Таким образом, дальнейшее продолжение работ должно быть направлено на количественные оценки допустимых раз-

меров, состава и расположения дефектов паяных соединений по отношению к СВЧ тракту, достижению СВЧ характеристик, коэффициента полезного действия и увеличению времени наработки на отказ полупроводниковых приборов.

Существующие конструкторские решения и технологические методы изготовления GaN СВЧ усилителей не позволяют в полной мере удовлетворить задачам проектирования и реализации новых оригинальных конструкций и микросборок с улучшенными электрическими, массогабаритными и тепловыми характеристиками, а также повышенной надёжностью. Поэтому задачи, связанные с совершенствованием

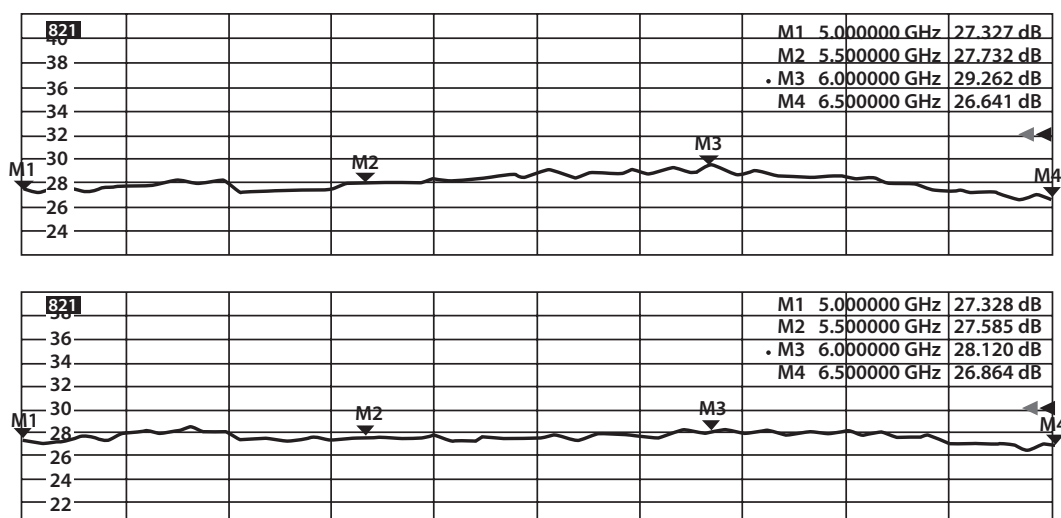


Рис. 6

АЧХ СВЧ усилителя без прижима кристалла

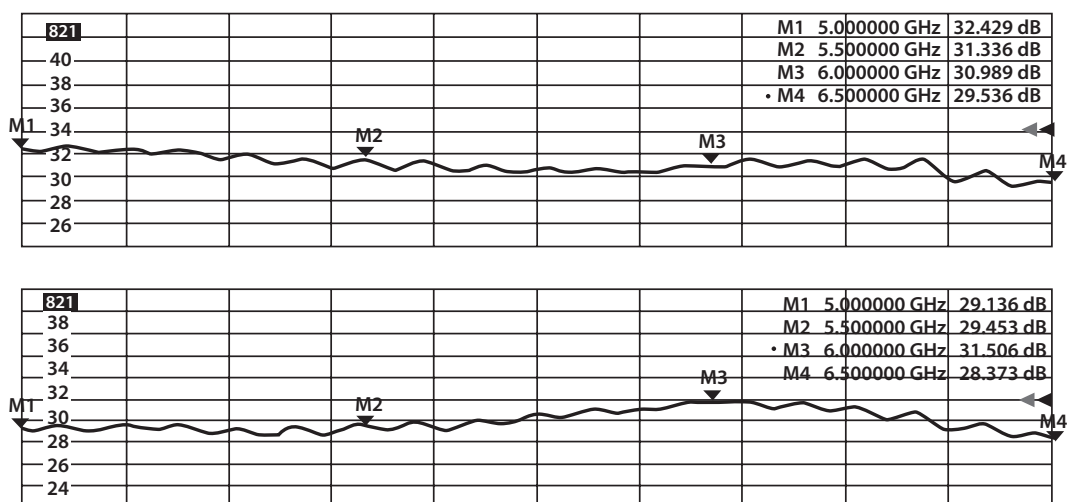


Рис. 7

АЧХ СВЧ усилителя с прижимом кристалла

конструкции и технологии СВЧ микросборок с целью улучшения их электрических и тепловых характеристик, а также повышением эксплуатационной надёжности, практически необходимы и актуальны.

Выводы

Установлено, что при монтаже плат и кристаллов вакуумной пайкой оплавлением высока вероятность образования газовых пустот в слое припоя, которые существенно ухудшают параметры СВЧ усилителей мощности.

Проведены эксперименты по прижиму и притирке кристаллов после первичной пайки. По результатам измерений выходных характеристик исследуемых приборов сделан вывод, что после притирки значительно увеличивается выходная мощность и не происходит быстрой деградации электри-

ческих параметров. После рентгенографии отмечено почти полное отсутствие дефектов под активной структурой кристаллов.

По итогам данной работы операция притирки была рекомендована как обязательная при монтаже СВЧ усилительных микросборок.

Литература

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторов для космических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 12., Ч. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 201-207.
2. Верхулевский К. Новые возможности с транзисторами на основе GaN компании Microsemi // Компоненты и технологии. – 2012. – № 9. – С. 161-164.
3. Дьяконица О. Ю., Редька Ал. В. Микромодуль СВЧ усилителя мощности // Материалы международной

Таблица

Выходная мощность усилителей при входной мощности, равной 18 дБм (63 мВт), при Q = 5 и τ = 10 мкс

№	u _з , В	I _с , мА	P _{вых} , Вт			
			f = 5 ГГц	f = 5,5 ГГц	f = 6 ГГц	f = 6,5 ГГц
1	-1,3	1,2	23,4	24,0	23,7	22,9
2	-1,7	1,3	22,6	23,4	23,1	23,0
1*	-1,3	1,2	30,7	31,3	31,6	29,5
2*	-1,7	1,2	30,2	30,6	31,0	28,4

- конференции «Микроэлектроника 2016», г. Алушта, 2016 г. – С.
4. Синкевич В. Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надёжности мощных транзисторов // Электронная промышленность. – 1990. – Вып. 6. – С. 19-26.
 5. Золото-олово уникальный сплав. – Режим доступа: www.ostecmaterials.ru/upload/iblock/e89/e89c21dfa9581c2508dba82ba03bf3a2.pdf (дата обращения: 14.08.2017).
 6. Keith Sweatman, Takatoshi Nishimura, Kenichiro Sugimoto, Akira Kita Контроль над механизмами образования пустот при пайке оплавлением // Технологии в электронной промышленности. – 2016. – № 6 – С. 46-54.
 7. Заявка 2016120298. Способ пайки кристаллов дискретных полупроводниковых приборов к корпусу / Давыдов А. Х., Климов А. О., Кравчук Г. Д., Павлюк-Мороз Н. А.
- References**
1. Gruzlov V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Electronic blocks based on microwave AlGaIn/GaN/SiC transistors for space applications. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. Issue 12, Part 2. Tula: TulGU Publ., 2016, pp. 201-207.
 2. Verkhulevskiy K. New possibilities with Microsemi GaN transistors. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2012, № 9.
 3. Dyakonitsa O. Yu., Redka An. V. Microwave power amplifier micro-module. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Mikroelektronika 2016»* [Proceedings of International Conference «Microelectronics 2016»], Alushta, 2016.
 4. Sinkevich V. F. Physical basis of the diagnosis of limit states and reliability of power transistors. *Elektronnaya promyshlennost* [Electronic Industry], 1990, Issue 6.
 5. Gold-tin – a unique alloy. – URL: www.ostecmaterials.ru/upload/iblock/e89/e89c21dfa9581c2508dba82ba03bf3a2.pdf (accessed 14 August 2017).
 6. Keith Sweatman, Takatoshi Nishimura, Kenichiro Sugimoto, Akira Kita, Controlling Voiding Mechanisms in the Reflow Soldering Process. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Electronic Industry Technologies], 2016, № 6.
 7. Application 2016120298. Method for discrete semiconductor device die solder bonding / Davydov A. Kh., Klimov A. O., Kravchuk G. D., Pavlyuk-Moroz N. A.