ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4(527)

2015

4(527).indd 1 17.12.2015 11:26:18

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(527) **2015** **Издается с 1950 г.**

Главный редактор
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **В.И. Бейль**, **Ю.А. Будзинский**, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**,
Б.Ф. Горбик, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, к.т.н. **Н.П. Зубков**,
д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **А.С. Котов**,
д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.Г. Лапин**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, д.т.н. **Н.А. Лябин**, **В.М. Малыщик**,
д.т.н., профессор **П.П. Мальцев** (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
д.т.н., профессор **В.П. Мещанов** (ОАО «ЦНИИИА»),
к.т.н. **А.Г. Михальченков** (МКУ «Дирекция Наукограда» г. Фрязино),
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **В.Ю. Мякиньков**, д.ф.-м.н. **А.И. Панас** (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**, к.ф.-м.н. **С.А. Плешанов**, **Е.Н. Покровский**,
к.т.н. **О.В. Поливникова**, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н., профессор **Р.А. Силин.**, д.т.н. **К.Г. Симонов**,
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*),
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»),
д.т.н., профессор **Н.Д. Урсуляк**

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 11 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2015 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(527) **2015** **Founded in 1950 г.**

Editor-in-chief
D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **V.I. Beyl'**, **U.A. Budzinsky**, C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**,
B.F. Gorbik, D.T.Sc. **A.D. Zakurdaev**, C.T.Sc. **N.P. Zubkov**,
D.T.Sc. **S.S. Zyrin**, C.T.Sc. **A.S. Kotov**, D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**,
C.T.Sc. **V.G. Lapin**, D.T.Sc. **M.I. Lopin**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**, **V.M. Malyschik**,
D.T.Sc., professor **P.P. Maltsev** (IMWF SE RASc), C.T.Sc. **P.M. Meleshkevich**,
D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»),
C.T.Sc. **A.G. Mikhalchenkov** (MBD «Directorate of the Science Town» Fryazino),
D.T.Sc. **S.P. Morev** (FSUE «RPC «Torij»), **O.A. Morozov** (JSC «RPC «Magratep»),
C.T.Sc. **V.U. Myakinkov**, D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas** (IRE named after V.F. Kotelnikov RASc),
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**, C.Ph.M.Sc. **S.A. Pleshanov**, **E.N. Pokrovsky**,
C.T.Sc. **O.V. Polivnikova**, C.T.Sc. **A.V. Potapov**, D.T.Sc., professor **R.A. Silin**,
D.T.Sc. **K.G. Simonov**, **V.P. Stebunov** (executive secretary),
D.T.Sc. **M.M. Trifonov** (JSC RPC «Istok-System»),
D.T.Sc., professor **N.D. Ursulyak**

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 11, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published»

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin»

СОДЕРЖАНИЕ

ТРУДЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ АО «НПП «ИСТОК» им. ШОКИНА»

«СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА, 2015. НАУКА. ТЕХНОЛОГИЯ. ПРОИЗВОДСТВО»

(13 – 14 мая 2015 года, г. Фрязино)

Часть II

Галина Н.М., Дюбуа Б.Ч., Литвинюк И.Ю., Поливникова О.В., Соколов А.М., Ткаченко О.Н. – Возможные причины нестабильности сигнала атомно-лучевой трубки в системе «ГЛОНАСС-М»..... 8

Каргин А.Н., Соколов А.М. – Взаимодействие кислорода с поверхностью оксидного катода в магнетроне..... 13

Григорьев А.Д., Морозов С.Н. – Проектирование усилительного клистрона *W*-диапазона..... 22

Григорьев А.Д., Иванов А.С., Ильин В.А., Лучинин В.В., Титов В.Н. – Проектирование лампы бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов..... 28

Журавлев К.С., Гуляев Д.В., Бакаров А.К., Торопов А.И., Протасов Д.Ю., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю. – Свойства DA-pHEMT AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктур для мощных СВЧ-транзисторов..... 35

Данилин Н.С., Булаев И.Ю., Бражников М.А., Соловьев М.К. – Модернизация космической электронной инфраструктуры на основе альянса систем частного применения кристаллов в корпусе..... 41

Щитов А.М., Дюков Д.И., Чеченин Ю.И. – Широкополосные умножители частоты КВЧ-диапазона на интегральных диодных микросборках..... 50

Пчелин В.А., Трегубов В.Б., Корчагин И.П., Далингер А.Г., Манченко Л.В., Красник В.А., Малыщик В.М. – Гибридно-интегральные малогабаритные усилители мощности..... 57

4(527).indd 4 17.12.2015 11:26:18

Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Трегубов В.Б., Молдованов Ю.И., Коцюба А.М., Гринберг Д.С. – Улучшение характеристик ГИС выходного каскада усилителя мощности СВЧ-диапазона..... 63

Иовдальский В.А., Манченко Л.В., Давронов С.К. – Совершенствование геометрии плоских выводов кристаллов компонентов ГИС СВЧ-диапазона..... 67

Иовдальский В.А., Дудинов К.В., Давронов С.К. – Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора СВЧ..... 70

Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.Г., Гринберг Д.С. – Многокристальный составной ПТШ для ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона 74

Иовдальский В.А., Манченко Л.В. – Дальнейшее совершенствование конструкции внутрисхемных соединений ГИС СВЧ-диапазона 77

Иовдальский В.А., Виноградов В.Г., Манченко Л.В., Земляков В.Е., Лапин В.Г. – Совершенствование конструкции ГИС малошумящего усилителя СВЧ-диапазона 85

Пархоменко М.П., Еремин И.С., Колесникова В.М. – Выбор рабочего вида колебаний прямоугольного резонатора при определении малых изменений диэлектрической проницаемости веществ..... 91

Косарев Р.А., Прокофьев Б.В., Фрейдович И.А. – Электродинамическая система мощного 26-лучевого клистрона..... 103

Тематический указатель..... 107

Алфавитный указатель..... 110

МАТЕРИАЛЫ ПУБЛИКУЮТСЯ В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ

4(527).indd 5 17.12.2015 11:26:18

CONTENTS

PROCEEDINGS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
JSC "RPC "ISTOK" NAMED AFTER SHOKIN"

"MICROWAVE ELECTRONICS, 2015. SCIENCE. TECHNOLOGY. PRODUCTION"
(May 13 – 14, 2015, Fryazino)

Part II

Galina N.M., Djubua B.Ch., Litvinyuk I.U., Polivnikova O.V., Sokolov A.M., Tkachenko O.N. – Possible reasons of atomic-beam tube signal instability in “GLONASS-M” system.... 8

Kargin A.N., Sokolov A.M. – Interaction of oxygen with oxide cathode surface in magnetron..... 13

Grigoryev A.D., Morozov S.N. – The designing of a *W*-band amplifying klystron..... 22

Grigoryev A.D., Ivanov A.S., Ilyin V.A., Luchinin V.V., Titov V.N. – The designing of millimeter and submillimeter ranges traveling-wave tubes (TWT)..... 28

Zhuravlev K.S., Gulyaev D.V., Bakarov A.K., Toropov A.I., Protasov D.U., Ber B.Ya., Kazantsev D.U. – The properties of DA-pHEMT AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures for high-power microwave transistors..... 35

Danilin N.S., Bulayev I.U., Brazhnikov M.A., Solovyov M.K. – Modernization of space electron infrastructure based on alliance of the customized application systems of the chips in the package..... 41

Shchitov A.M., Dyukov D.I., Chechenin U.I. – EHF wideband frequency multipliers on integrated diode microassemblies..... 50

Pchelin V.A., Tregubov V.B., Korchagin I.P., Dalinger A.G., Manchenko L.V., Krasnik V.A., Malyshchik V.M. – Small-size hybrid integrated power amplifiers..... 57

Iovdalsky V.A., Pchelin V.A., Lapin V.G., Tregubov V.B., Moldovanov U.I., Kotsyuba A.M., Grinberg D.S. – The improvement of HIC output stage characteristics of a microwave power amplifier..... 63

4(527).indd 6 17.12.2015 11:26:18

Iovdalsky V.A., Manchenko L.V., Davronov S.K. – The improvement of flat leads geometry of microwave HIC component chips..... 67

Iovdalsky V.A., Dudinov K.V. Davronov S.K. – A lead frame for a microwave multichip semiconductor device..... 70

Iovdalsky V.A., Lapin V.G., Pchelin V.G., Grinberg D.S. – Multichip composite Shottky-gate FET for microwave HIC power amplifiers..... 74

Iovdalsky V.A., Manchenko L.V. – Further improvement of microwave HIC in-circuit connections design..... 77

Iovdalsky V.A., Vinogradov V.G., Manchenko L.V., Zemlyakov V.E., Lapin V.G. – The improvement of microwave HIC low-noise amplifier design..... 85

Parkhomenko M.P., Eremin I.S., Kolesnikova V.M. – The choice of operating oscillation mode of rectangular resonator while defining small changes in dielectric permeability of substances..... 91

Kosarev R.A., Prokofyev B.V., Freydovich I.A. – Electrodynamic system of high-power 26-beam klystron..... 103

Subject index..... 107

Alphabetical index..... 110

4(527).indd 7 17.12.2015 11:26:19

УДК 621.38

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СИГНАЛА АТОМНО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ В СИСТЕМЕ «ГЛОНАСС-М»

Н. М. Галина, Б. Ч. Дюбуа,
И. Ю. Литвинюк, О. В. Поливникова, А. М. Соколов, О. Н. Ткаченко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Проведена работа по выяснению причин изменения работы выхода ленты ионизатора. Даны рекомендации по технологии изготовления ленты ионизатора, которые должны способствовать стабилизации ионного тока в изделии.

КС: лента ионизатора, работа выхода, стабильность параметров

The work on finding out the reasons of changing the work function of ionizer tape has been performed. Recommendations on ionizer tape manufacturing technology are given. They must contribute to stabilization of ion current in the product.

Keywords: ionizer tape, work function, stability of parameters

К выпускаемым атомно-лучевым трубкам (АЛТ), являющимся стандартами частоты, предъявляются жесткие требования по метрологическим характеристикам и сроку службы. Важным узлом АЛТ является индикатор. В результате поверхностной ионизации атомов цезия на танталовой ленте ионизатора и последующего усиления тока должен быть получен стабильный сигнал ионного тока. Суточная нестабильность выходного сигнала квантовых стандартов частоты должна быть на уровне менее $1{\cdot}10^{-13}$, срок службы – не менее 120 тыс. ч.

Стабильность тока положительных ионов цезия зависит не только от стабильности и равномерности рабочей температуры ленты ионизатора и стабильности ее геометрии, но и от стабильности работы выхода ионизирующей поверхности. Работа выхода, в свою очередь, зависит от состояния поверхности материала, примесного состава, атомно-кристаллической структуры. Она может меняться в зависимости от процессов, происходящих на поверхности ленты ионизатора в высоком вакууме: диффузии, миграции, перестройки поверхности, а также от вакуума, т. е. электронно-оптическая система индикатора весьма уязвима, зависит от технологии изготовления индикатора и условий его эксплуатации (материалов, их обработки, вакуумных условий и пр.).

Катодным отделом АО «НПП «Исток» им. Шокина» была проведена работа по стабилизации работы выхода ленты ионизатора, которая потребовала изучения как поверхностных, так и объемных свойств материала ионизатора, а также условий обработки и работы ленты ионизатора. В процессе исследования производился замер и анализ изменения холодного сопротивления, температуры, тока накала ленты ионизатора.

При изменении работы выхода ленты ионизатора меняется не только степень ионизации цезия, но и контактная разность потенциалов между управляющими электродами. Изменение контактной разности потенциалов возможно и при адсорбции цезия на электродах [1]. Степень

4(527).indd 8 17.12.2015 11:26:19

ионизации цезия α определяется уравнением Саха-Ленгмюра [2]: $\alpha = \frac{1}{2}\exp\frac{e(\varphi - v_i)}{KT}$, $\alpha = \frac{n_p}{n_a}$, где n_p – десорбция цезия в виде ионов, n_a – десорбция цезия в виде атомов.

Ионный ток j_p, идущий от поверхности, равен: $j_p = en_p = en\beta$, где β – коэффициент ионизации, равный n_p/n, $n = n_a + n_p$, поэтому $\beta = \alpha / (1+ \alpha)$.

Исследование стабильности параметров было проведено на реальной конструкции ионизатора, помещенной в стеклянную колбу, в которой можно было измерять температуру ленты. На рис. 1 представлена зависимость β от температуры при различных значениях работы выхода.

Зависимость $d\beta/dT$ от работы выхода представлена на рис. 2. Зная изменение ионного тока от температуры, можно отслеживать изменение работы выхода ионизатора.

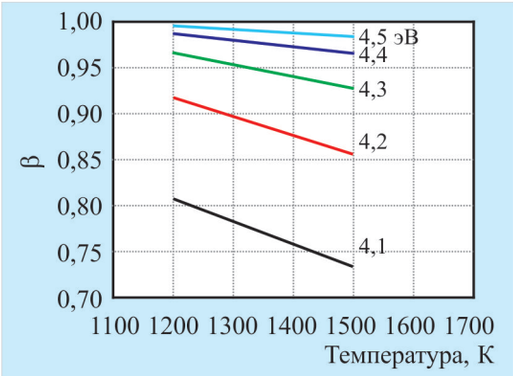


Рис. 1. Зависимости β от температуры при различных значениях работы выхода

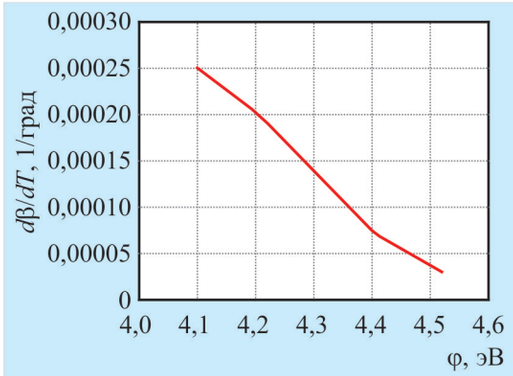


Рис. 2. Зависимость $d\beta/dT$ от работы выхода

Первоначальное значение работы выхода лент ионизатора составляло 4,3…4,4 эВ (для поликристаллического тантала оно равно 4,0…4,2 эВ). Значение работы выхода в высоком вакууме при прогреве до 1000 °С (10^{-7}…10^{-8} мм рт. ст., кривые *1*…*3* на рис. 3) менялось до 4,1 эВ в течение 500 ч, затем наблюдалась ее последующая медленная стабилизация в течение 1000…2000 ч. При дальнейшем прогреве величина работы выхода существенно не менялась. Прогрев лент ионизатора в недостаточно хороших условиях сопровождается некоторым увеличением работы выхода (кривые *4* и *5* на рис. 3) и сохранением ее в течение всего времени испытания на уровне 4,4 эВ. Это может быть связано с адсорбцией на поверхности ленты электроотрицательных атомов и молекул газовой среды.

Получена значительная зависимость работы выхода от вакуумных условий в диоде. На рис. 4 показано изменение работы выхода в течение 2…3 мин при ухудшении вакуумных условий и ее восстановление при возврате вакуумных условий.

На рис. 5 показано изменение коэффициента ионизации в процессе срока службы в лампах с хорошим вакуумом.

В диодах с плохим вакуумом наблюдался рост холодного сопротивления R_x лент ионизатора, в диодах с хорошим вакуумом при испытании в течение 6000 ч холодное сопротивление лент ионизатора стабильное (рис. 6). Это объясняется тем, что в диодах с плохим вакуумом происходит рекристаллизация материала.

Тантал – наиболее пластичный материал из группы тугоплавких материалов, но при этом склонен к интенсивному поглощению газов (азота, кислорода, водорода, углерода), в результате

4(527).indd 9 17.12.2015 11:26:19

чего становится хрупким. Поэтому наиболее подходящая атмосфера при нагреве тантала – глубокий вакуум.

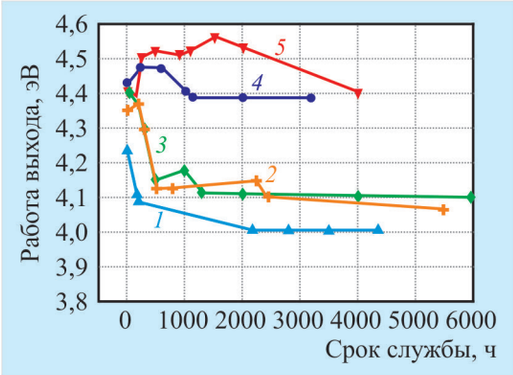


Рис. 3. Изменение работы выхода ленты ионизатора в течение срока службы

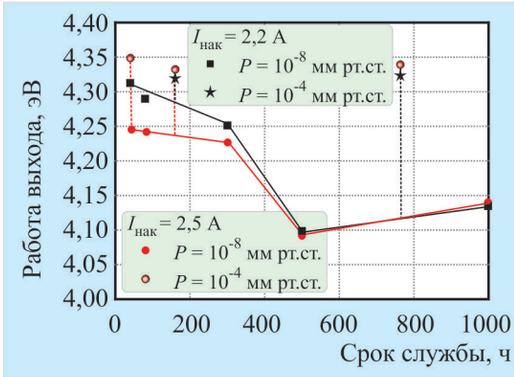


Рис. 4. Изменение работы выхода при изменении вакуумных условий

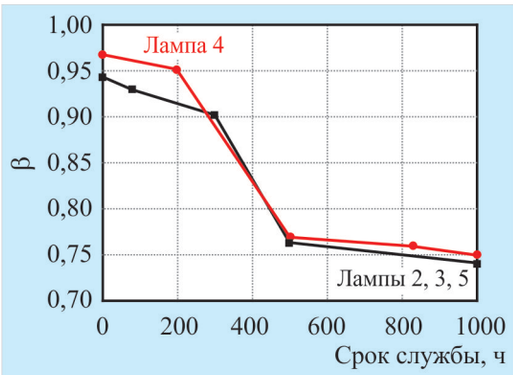


Рис. 5. Изменение коэффициента ионизации в процессе срока службы

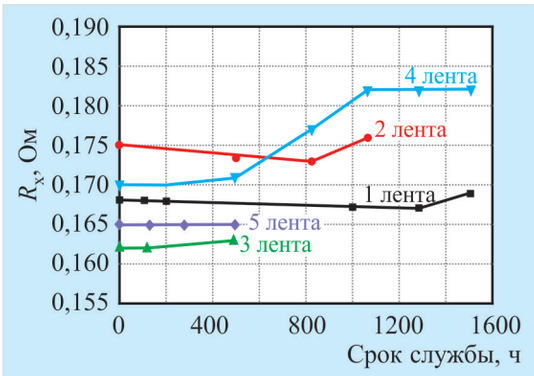


Рис. 6. Изменение R_x в течение срока службы

На рис. 7 показана поверхность ленты ионизатора, проработавшей в приборе 26 тыс. ч, на которую насыпался графит. Видны разрушения ленты.

Науглероживание тантала – практически необратимый процесс. В связи с большими трудностями глубокой очистки тантала от избыточного углерода требуется устранять источники загрязнения материала на стадии его изготовления, а также необходимо модернизировать технологию нанесения графита. Осыпание графита происходит обычно в местах, где поверхность имеет закругления, неровности, плохую доступность. Там нанесенный графит может иметь трещины, наплывы, шелушиться.

Анализ АЛТ, срок службы которой составил 40 тыс. ч, показал, что лента ионизатора в процессе эксплуатации претерпела большие изменения:

– произошло изменение ее геометрических размеров, формы – она выгнулась (рис. 8)

– произошли значительные изменения поверхности материала в центральной части ленты, видимых изменений не наблюдалось лишь на концах ленты (рис. 9).

То есть к вышеуказанным проблемам добавляется также проблема сохранения пластичности и формоустойчивости ленты ионизатора, структуры материала.

4(527).indd 10 17.12.2015 11:26:19

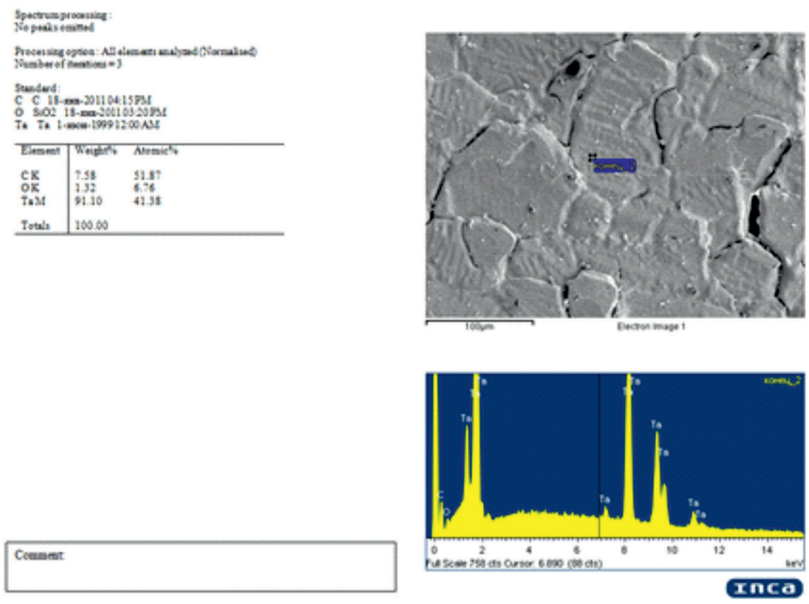


Рис. 7. Изменение поверхности ленты ионизатора в процессе работы

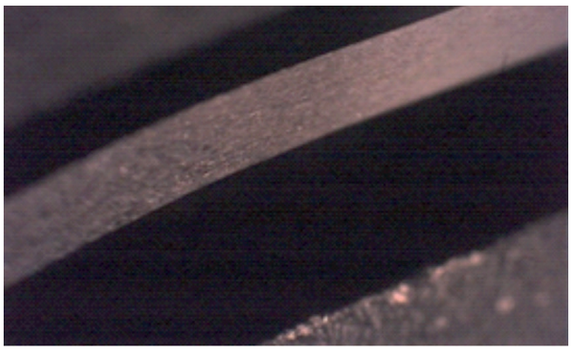


Рис. 8. Деформация ленты ионизатора в процессе работы

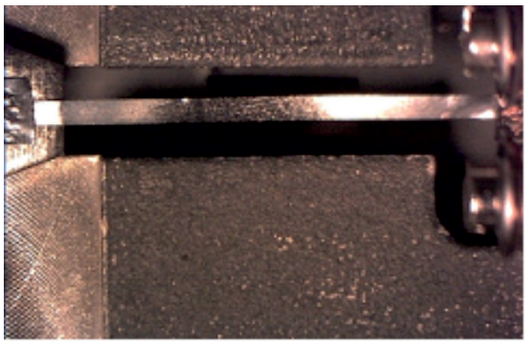


Рис. 9. Изменения поверхности ленты ионизатора в процессе работы

Лента ионизатора в АЛТ представляет собой танталовую ленту шириной 1,1 мм и толщиной 30 мкм, закрепленную с одной стороны на танталовую пружину толщиной 0,1 мм, с другой – на жесткую мельхиоровую пластину толщиной 1,5 мм. Рабочая часть ленты составляет 5 мм при общей длине до мест ее крепления 17 мм.

При пропускании тока накала наиболее сильно разогревается центральная часть ленты, при этом лента, благодаря пружине, на которую она крепится, должна обратимо расширяться, но если конструкция ее крепления «заклинит» и не даст свободного расширения, то деталь может деформироваться и даже разрушиться.

Для повышения стабильности работы выхода ленты ионизатора были проработаны следующие моменты технологии ее изготовления и обработки:

1) на ленте были выполнены ребра жесткости для увеличения формоустойчивости;

2) были отработаны режимы тепловой обработки ленты с целью сохранения ее пластичности, стабильности структуры и состояния ее поверхности.

4(527).indd 11 17.12.2015 11:26:20

Согласно существующим технологическим картам, обезгаживание ленты ионизатора производилось после химической обработки в установках ВЧ-отжига при температуре 1200 °С в течение 30 мин, затем дважды производился прогрев ленты в приборе во время откачки при температуре выше 1200 °С по 20…40 мин. Как было показано выше, данный режим не является оптимальным для очистки тантала от примесей и газов.

С водородом тантал образует гидриды. Максимально объем тантала поглощает более 700 объемов водорода. При температуре 800…1000 °С гидрид разлагается с выделением водорода. При насыщении водородом тантал охрупчивается, возрастает его твердость и электросопротивление. Водород поглощается с максимальной скоростью при температуре примерно 500 °С. При нагревании в вакууме выше 600 °С поглощенный водород почти весь выделяется и прежние механические свойства тантала восстанавливаются. Водородсодержащий тантал может быть отдегазирован в высоком вакууме (при 800…1000 °С, 10^{-6} мм рт. ст.).

Труднее очистить тантал от кислорода. При содержании кислорода до 1,2 % (ат.) пластичность тантала снижается в 3-4 раза. Вредное влияние на пластичность лент ионизатора оказывает та часть кислорода, которая образует с танталом окислы, расположенные по границам зерен, что ослабляет его межзеренную прочность. Кислород выделяется из твердых растворов Та–О лишь при температуре выше 1900…2000 °С в условиях высокого вакуума, но длительный прогрев при такой температуре приводит к рекристаллизации тантала.

Содержание азота также снижает пластичность тантала. При температуре ниже 1350 °С азот поглощается очень медленно, при более высокой температуре образуется нитрид (TaN), который плавится при 3087 °С. Значительная дегазация азота происходит в высоком вакууме лишь при температуре выше 1700 °С.

Снижать содержание примесей в тантале при отжиге в наших условиях сложно, так как для этого необходимы высокий вакуум (не ниже 10^{-8} мм рт. ст.) и высокая температура (выше 2000 °С). Следует учитывать, что в тантале с увеличением температуры отжига или времени отжига происходит значительный рост зерна, снижающий пластичность материала. Поэтому выбор режима отжига является одним из основных процессов в технологии изготовления ленты.

В связи со всем вышеизложенным, было предложено проводить отжиг лент ионизатора в экспериментальных диодах на откачных постах, где незначительное ухудшение вакуума, не превышающее $(2…4)\cdot10^{-7}$ мм рт. ст., происходило лишь иногда при подаче на ленту тока накала, соответствующего температуре 800 °С.

Число перегибов лент ионизатора поперек проката до разрушения, отожженных в таких условиях, при увеличении температуры от 1100 до 1800 °С в течение 10 мин колебалось незначительно, увеличение времени отжига с 10 до 30 мин при температуре 1300…1600 °С также уже не вызывало такого снижения пластичности, как у лент, отожженных в вакууме 10^{-6} мм рт. ст.

Предсказать поведение ленты в процессе длительной работы сложно, особенно при температурах, приближенных к температуре рекристаллизации. Как показали испытания лент в экспериментальных диодах, в процессе длительного прогрева происходит изменение структуры поверхности танталовой ленты ионизатора – укрупнение зерна в центральной части ленты, которая имеет наибольшую температуру. Причем с повышением температуры выше 1000 °С изменения поверхности усиливаются. Процесс температурного воздействия должен быть выбран таким образом, чтобы разупрочнение межзеренных границ происходило как можно медленнее. Порог рекристаллизации при продолжительности отжига 10…30 мин может наступить для тантала уже при 1000 °С.

4(527).indd 12 17.12.2015 11:26:20

Лента ионизатора работает в АЛТ при температуре 1000 °С, что на грани температуры рекристаллизации тантала. Следовательно, допустимо применять лишь отжиг для снятия напряжений материала и не прибегать к высокотемпературной обработке танталовой ленты, так как водород уходит при более низкой температуре, а для удаления других примесей и газов необходимы температуры, которые вызовут разупрочнение тантала, существенно более сильное, чем обусловленное их присутствием. Отжиг же в вакууме не хуже 10^{-7} мм рт. ст. при температуре 1000 °С в течение 10 мин и дальнейшая эксплуатация при рабочей температуре (1000 °С) в течение 500…2000 ч обеспечат оптимальные стабильные параметры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисов, А. А.** Об ускоренной оценке надежности атомно-лучевых трубок «Успех-3АМ» в составе бортовых синхронизирующих устройств космических аппаратов / А. А. Борисов, В. М. Исаев, О. И. Обрезан, Д. С. Трофимов, Ю. А. Турутин, С. В. Щербаков, Г. И. Дульский, Л. В. Панченко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 3 (506) . – С. 4.

2. **Добрецов, Л. Н.** Эмиссионная электроника / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. – М.: Наука, 1966. – С. 452.

3. **Зандберг, Э. Я.** Поверхностная ионизация / Э. Я. Зандберг, Н. И. Ионов. – М.: Издательство наука, 1969. – С. 107.

Статья поступила 24 августа 2015 г.

УДК 621.385.6

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КИСЛОРОДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ОКСИДНОГО КАТОДА В МАГНЕТРОНЕ

А. Н. Каргин

ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

А. М. Соколов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Рассмотрены физические явления на поверхности оксидного катода в магнетроне. Предложена физическая модель, учитывающая эффект выделения кислорода под действием электронной бомбардировки катода. Модель основана на теории поверхностей и объясняет ухудшение эмиссии катода накоплением кислорода в вакуумной полости магнетрона, когда испаряющихся с катода веществ недостаточно для поглощения кислорода. В результате наблюдается отравление катода кислородом, адсорбированным на его поверхности, ухудшение термоэлектронной эмиссии и, как следствие, изменение частоты генерации магнетрона. Для исключения этих эффектов рабочая температура катода должна быть выше некоторого порогового значения.

КС: оксидный катод, магнетрон, кислород

Physical phenomena on the surface of oxide cathode in magnetron have been considered. A physical model taking into account the effect of oxygen emission due to cathode electron bombardment effect was suggested. The model is based on the theory of surfaces and explains the cathode emission degradation by accumulation of oxygen in magnetron vacuum cavity when there are not enough substances evaporating from the cathode for oxygen absorption.

4(527).indd 13 17.12.2015 11:26:20

As a result the cathode poisoning by oxygen adsorbed on its surface, degradation of thermal electron emission are observed, and as a consequence, there occurs the magnetron oscillation frequency change. To eliminate such effects the cathode operating temperature must be higher than a certain threshold value.

Keywords: oxide cathode, magnetron, oxygen

1. ВВЕДЕНИЕ

Оксидный катод все еще применяется в современных ЭВП СВЧ, в том числе в магнетронах импульсного и непрерывного действия. Интерес к физическим процессам, происходящим при длительной работе, стимулируется необходимостью обеспечения надежности и долговечности ЭВП СВЧ. Известно, что эмиссия оксидного катода существенно зависит от состава остаточных газов в вакуумной полости [1]. Снижение эмиссии в результате взаимодействия с остаточными газами принято называть отравлением оксидного катода.

Наш интерес к проблеме отравления был вызван необходимостью повышения долговечности миниатюрного магнетрона непрерывного действия, работающего в спутниковой системе глобального мониторинга [2]. Проблема заключалась в установлении причин изменения частоты генерации и поиске мер, позволяющих увеличить наработку до отказа. Испытания в реальном времени не могли дать необходимые результаты из-за большой продолжительности (не менее 5…10 тыс. ч) при отсутствии теории, позволяющей поставить целенаправленный эксперимент. В ранней работе [3] предложена модель и кратко описана картина физических процессов, происходящих в магнетроне при длительной работе. Модель основана на теории поверхностей, описывающей явления на границе газ – твердое тело в высоком вакууме. В настоящей статье приведены расчеты и результаты экспериментов, поддерживающие модель отравления катода кислородом, выделяющимся при обратной электронной бомбардировке катода.

2. АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА

Вакуумный прибор представляет собой систему электродов, связанных друг с другом через газообразную фазу. Катод нельзя рассматривать изолированно, поскольку он взаимодействует с окружающими газами и находится в динамическом равновесии с веществами внутри вакуумной оболочки. Его срок службы зависит от состава и условий работы других электродов и вакуумной оболочки.

В зависимости от характера взаимодействия молекул твердого тела (адсорбента) и газа (адсорбата) различают физическую адсорбцию и хемосорбцию. Физическая адсорбция играет существенную роль при условии, когда температура газа понижается ниже критической $T_{крит}$ (для кислорода, например, $T_{крит}$ = 155 К). Как правило, рабочая температура катода выше критической температуры остаточных газов, следовательно, в ЭВП следует рассматривать хемосорбцию, сопровождающуюся образованием связи между молекулами адсорбента и адсорбата. Прочность связи вновь образованной молекулы с поверхностью катода оценивается такой характеристикой, как время жизни до испарения.

Адсорбция представляет собой динамический процесс: через некоторое время связь разрывается и молекулы покидают поверхность адсорбента. Время адсорбции τ, в течение которого молекула находится на поверхности адсорбента, определяется уравнением Френкеля [4, 5]:

4(527).indd 14 17.12.2015 11:26:20

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \tag{1}$$

где τ_0 – время молекулярного колебания (порядка 10^{-13} …10^{-12} с); Q – энергия связи молекулы с поверхностью, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная (R = 8,314 Дж/(моль·К)).

Обычно теоретический анализ проводится на упрощенной модели: хемосорбцию рассматривают как реакцию молекул адсорбата с адсорбентом, энергетически подобную реакции образования двухатомной молекулы. Поэтому в расчетах энергию поверхностной связи заменяют энергией связи в соответствующем соединении [4].

В настоящее время принята трактовка отравления оксидного катода как взаимодействие кислородсодержащих газов с атомами щелочно-земельных металлов (в основном бария), приводящее к снижению концентрации поверхностных донорных центров и испарению вновь образованной окиси BaO. Теплота термической диссоциации BaO, принимаемая за энергию связи, составляет 482 кДж/моль. При рабочей температуре катода $T_к$ = 1120 К и $\tau_о$ = 10^{-13} с время адсорбции составит $3{,}1 \cdot 10^9$ с (примерно 100 лет). Процесс отравления был бы необратим, однако на практике наблюдается восстановление эмиссии оксидного катода после отравления кислородом. Таким образом, простой расчет времени адсорбции опровергает гипотезу образования окиси BaO, поставленную под сомнение еще опытами Вагенера. Образующееся соединение должно иметь достаточно малую теплоту адсорбции, допускающую обратимое отравление, наблюдаемое экспериментально [6].

Определим теплоту адсорбции на основе модели Ленгмюра [4]. В состоянии динамического равновесия процесс адсорбции газа на поверхности твердого тела описывается уравнением:

$$\theta = \frac{bp}{1+bp}, \tag{2}$$

где θ – доля поверхности, покрытой адсорбированными молекулами газа; b – константа Ленгмюра; p – парциальное давление газа.

Константа Ленгмюра зависит от температуры и энергии поверхностной связи:

$$b = b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \tag{3}$$

где b_0 – множитель, определяемый видом адсорбируемого газа.

При низких давлениях остаточных газов, характерных для ЭВП ($bp \ll 1$), степень адсорбции пропорциональна давлению:

$$\theta \approx bp = b_0 p \exp\left(\frac{Q}{RT}\right). \tag{4}$$

Для высоковакуумных систем изотермы Ленгмюра $\theta(p)$ представляют собой семейство прямых линий, угол наклона которых определяется константой b.

Допустим, что в атмосфере кислорода эмиссия катода начинает падать при степени адсорбции $\theta = \theta_1$. Тогда из уравнения (4) определим давление начала отравления:

$$p_1 = \frac{\theta_1}{b_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)}. \tag{5}$$

4(527).indd 15 17.12.2015 11:26:20

В полулогарифмическом масштабе $\lg p \div 1/T$ это соотношение представлено прямой:

$$\lg p_1 = \lg\left(\frac{\theta_1}{b_0}\right) - \frac{Q}{RT}\lg e = \lg\left(\frac{\theta_1}{b_0}\right) - \frac{D}{T}, \qquad (6)$$

где e – основание натурального логарифма ($\lg e = 0{,}434$); D – константа, определяющая угол наклона прямой φ:

$$D = \mathrm{tg}\varphi = \frac{Q\lg e}{R}. \qquad (7)$$

Характеристика (6) соответствует известной зависимости отравляющего давления кислорода от температуры оксидного катода, приведенной на рис. 1 [7]. Экспериментальные точки хорошо

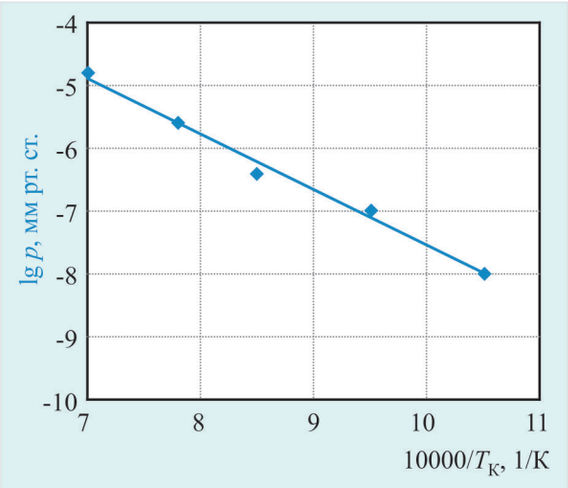


Рис. 1. Давление кислорода в точке начала отравления оксидного катода [7]

укладываются на прямую линию, по наклону которой ($D = 9700$ К) можно определить энергию адсорбции кислорода на поверхности:

$$Q = \frac{R}{\lg e} D = 19{,}1D = 185 \text{ кДж/моль}. \qquad (8)$$

Тогда при $T_к = 1120$ К расчетное время адсорбции τ составит $4{,}2\cdot10^{-5}$ с, при $T_к = 300$ К время τ увеличивается до $1{,}6\cdot10^{19}$ с, т. е. десорбция практически отсутствует, и связывание кислорода на холодном катоде протекает до полного заполнения вакансий (до состояния $\theta = 1$).

Посмотрим, какое же именно химическое соединение имеет энергию связи, близкую к найденному значению теплоты адсорбции. Известно, что окислы щелочно-земельных металлов активно присоединяют кислород, образуя перекиси, термически менее устойчивые, чем окислы. Для перекиси BaO_2 зависимость давления термической диссоциации имеет следующий вид [6]:

$$\lg p = 11{,}83 - \frac{7500}{T}. \qquad (9)$$

Тогда из соотношения (8) при $D = 7500$ К получим теплоту диссоциации $Q = 143$ кДж/моль. Результат довольно близок к энергии адсорбции 185 кДж/моль, определенной по характеристике

4(527).indd 16 17.12.2015 11:26:20

отравления [7]. Следовательно, можно предполагать, что при адсорбции кислорода на поверхности оксидного катода образуются соединения, энергетически эквивалентные перекисям (BaO_2, CaO_2, SrO_2).

Могут ли незначительные количества адсорбированного кислорода существенно повлиять на работу выхода катода? Известно, что оксидный катод является полупроводником, который в первом приближении можно представить как окись BaO, содержащую избыток бария [1]. По данным Адамсона, изучавшего адсорбцию кислорода на поверхности окиси ZnO с избытком цинка, поверхностный потенциал изменяется на 1 В при увеличении степени адсорбции до $\theta = 0{,}003$ [4]. Таким образом, оксидный катод является чувствительным детектором кислорода, отзываясь увеличением работы выхода на наличие малого количества кислорода в полости прибора. Наши эксперименты подтвердили факт уменьшения термоэлектронной эмиссии в магнетронах, у которых частота генерации изменилась в процессе длительной работы.

Рассмотрим, откуда же появляется кислород в откачанном и хорошо тренированном приборе.

3. ЭЛЕКТРОННАЯ БОМБАРДИРОВКА КАТОДА В МАГНЕТРОНЕ

Отличительная особенность магнетрона с оксидным катодом состоит в том, что в режиме генерации с поверхности катода кислород непрерывно выделяется под действием обратного электронного тока. При бомбардировке электронами происходит диссоциация окислов металлов с выделением кислорода:

$$MeO + e \rightarrow Me + 1/2\ O_2\uparrow, \qquad (10)$$

причем скорость выделения кислорода увеличивается с ростом энергии электронов, но практически не зависит от температуры мишени [8].

Продукты диссоциации – металл и кислород, образованные при электронной бомбардировке, существенно различаются поведением на поверхности катода. Время адсорбции атомов кислорода при рабочей температуре катода мало ($\tau = 10^{-4}\ldots10^{-5}$ с), и они покидают его поверхность. Из-за большой теплоты испарения $Q_{исп}$ время жизни атомов металла несравнимо выше. Например, для бария $\tau = 5{,}4\cdot10^4$ с = 150 ч.

С оксидного катода испаряются в основном окислы BaO, в меньшей степени CaO и SrO. Оседая на внутренних деталях магнетрона, они адсорбируют атомы кислорода и образуют соединения типа перекисей. Благодаря низкой температуре корпуса, обычно не выше 400 К, время адсорбции атомов кислорода в таком соединении столь велико ($\tau = 1{,}5\cdot10^{11}$ с для BaO_2 при $T = 400$ К), что кислород оказывается необратимо связанным на холодных стенках оболочки и его поглощение продолжается до полного заполнения вакансий.

Таким образом, продукты испарения катода, осевшие на холодных стенках, являются хорошим газопоглотителем. Однако для связывания выделяющегося кислорода с катода должно испаряться соответствующее количество вещества. С уменьшением температуры катода наступает момент, когда испаряется ровно столько вещества, сколько необходимо для реакции с поступающим кислородом. Говоря языком теории поверхностей, скорость образования новых вакансий (на холодных стенках) сравнивается со скоростью поступления адсорбата, а при дальнейшем снижении температуры катода нарушение динамического равновесия приводит к накоплению газа в вакуумной полости.

Описанные явления иллюстрирует рис. 2, на котором схематично представлены температурные зависимости скорости выделения кислорода и испарения компонентов катода

4(527).indd 17 17.12.2015 11:26:21

(в условных единицах). Точка пересечения прямых определяет некоторую равновесную температуру $T_{к0}$, при которой скорости выделения и поглощения кислорода равны.

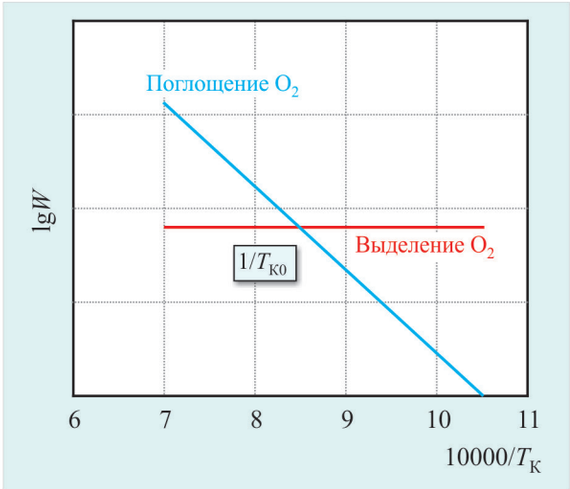


Рис. 2. Скорость выделения и поглощения кислорода
в магнетроне с оксидным катодом в зависимости от температуры

При низкой температуре катода испаряющихся веществ (BaO, CaO, SrO) недостаточно и в вакуумной полости прибора накапливается избыточный кислород. Его парциальное давление растет, что приводит к росту адсорбции кислорода θ на поверхности катода, увеличению работы выхода и падению эмиссии. Адсорбционное равновесие не может установиться, поскольку под действием электронной бомбардировки в полость непрерывно поступает кислород. Довольно быстро наступает отказ прибора из-за снижения эмиссии, хотя расчетная долговечность катода по испарению активного вещества еще не достигнута.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При низкой внешней добротности исследуемого магнетрона эффект падения эмиссии проявляется в смещении частоты генерации. При проведении испытаний на долговечность синхронизированного магнетрона М1 [2] был обнаружен значительный дрейф частоты генерации, соизмеримый с рабочей полосой ±20 МГц (рис. 3). Параметрический отказ фиксировался при уходе частоты генерации на 20…25 МГц. Магнетрон, выйдя из заданной полосы синхронизации, продолжал работать еще многие тысячи часов, доказывая, что ресурс катода еще не исчерпан.

Анализ приборов, испытанных на долговечность, показал, что резонансная частота анодного блока изменилась незначительно (2…3 МГц). Следовательно, дрейф частоты вызван изменением реактивной электронной проводимости магнетрона. При исследованиях была обнаружена существенная зависимость частоты генерации от эмиссионной способности катода. Уход частоты при снижении напряжения накала для различных образцов приборов М1 составлял от 20 до 40 МГц. На основе этих данных можно предположить, что изменение частоты генерации вызывается снижением эмиссии катода в процессе испытаний, однако механизм явления поначалу оставался неизвестным.

4(527).indd 18 17.12.2015 11:26:21

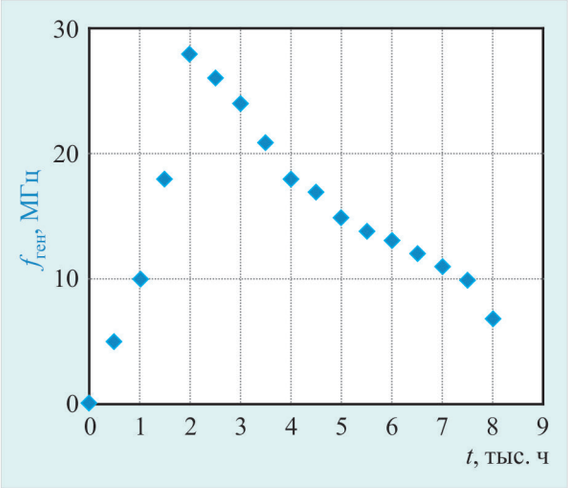


Рис. 3. Частота генерации магнетрона исходной конструкции в процессе испытаний

Из описанной выше модели низкотемпературного отказа следует:

– процесс накопления кислорода протекает с наибольшей скоростью при пониженной температуре катода;

– после удаления кислорода из вакуумной полости эмиссия восстанавливается.

При снижении температуры катода на 60…70 °С ниже равновесного значения $T_{к0}$, когда скорость испарения оксидов снижается на порядок, скорость накопления кислорода становится практически равной скорости реакции диссоциации. Оценочные расчеты, выполненные на основе данных Варго и Шеферда [8], показали, что давление отравления в исследуемом приборе достигается примерно через 60 ч.

Для проверки физической модели были поставлены специальные эксперименты на макетах с ускорением процессов отравления катода.

Прибор № 1 испытывался в динамическом режиме при глубоком недокале ($U_н$ = 3,5 В, $I_а$ = 40 мА), что соответствовало снижению температуры катода на 100° – заведомо ниже равновесного значения. Для проверки эмиссии катода прибор снимали со стенда и определяли характеристическое напряжение накала $U_н(\Theta)$[1] . Снижение эмиссии происходило в течение 40…50 ч (рис. 4). Однако при испытании в диодном режиме (без магнитов) в течение 100 ч при том же накале $U_н$ = 3,5 В и токе анода $I_а$ = 40 мА снижения эмиссии не наблюдалось.

Прибор № 2 имел нагреваемый геттер из пористого титана и испытывался по следующей программе:

- динамический режим: $U_н$ = 3,5 В, $I_а$ = 40 мА, $U_{гет}$ = 0 (96 ч);
- измерения $U_н(\Theta)$ в диодном режиме;
- диодная тренировка с геттером: $U_{гет}$ = 7,5 В, $U_н$ = 5,0 В, $I_а$ = 40 мА (48 ч);
- измерения $U_н(\Theta)$ в диодном режиме.

[1] $U_н(\Theta)$ определяется как напряжение накала в точке перегиба эмиссионной характеристики, Θ – температура катода в этой точке, называемая характеристической [1].

4(527).indd 19 17.12.2015 11:26:21

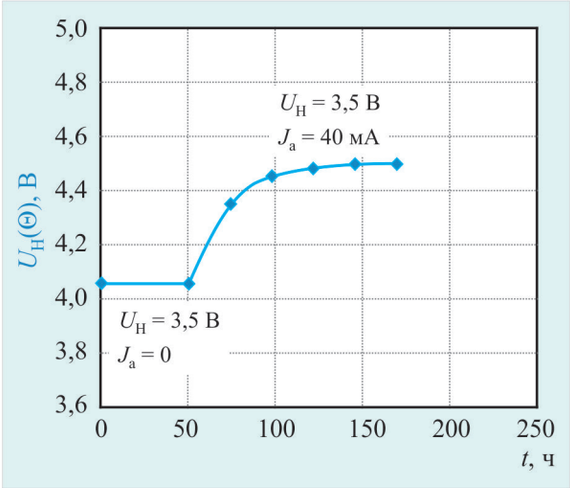


Рис. 4. Изменение напряжения $U_н(Θ)$ макета №1 в режиме недокала:
от 0 до 50 ч – диодный режим

Эксперимент показал, что через 40…50 ч $U_н(Θ)$ увеличивается до 4,3 В (рис. 5), одновременно частота генерации f_0 смещается вверх на 20…30 МГц, что указывает на отравление катода в динамическом режиме. После откачки геттером эмиссия восстанавливается и частота возвращается к начальному значению. При последующих циклах повторяется описанная картина. Также было установлено, что состояние отравления сохраняется длительное время после испытания: пониженная эмиссия макета № 2 осталась на прежнем уровне после хранения в течение 5 месяцев.

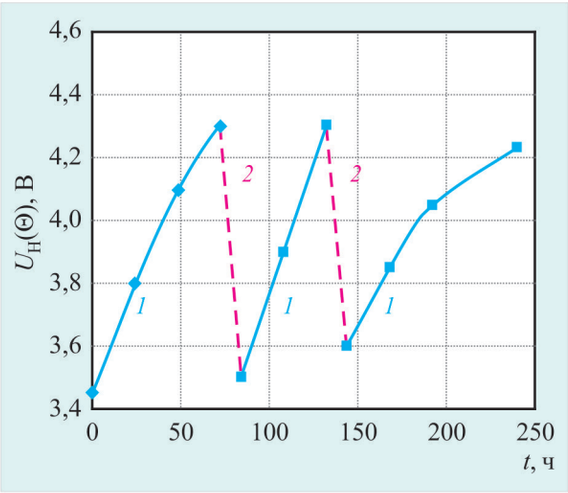


Рис. 5. Изменение напряжения $U_н(Θ)$ макета № 2 в процессе испытаний
последовательно в динамическом и диодном режиме:
1 – $J_а$ = 42 мА, $U_н$ = 3,5 В (динамический режим);
2 – $J_а$ = 42 мА, $U_н$ = 5,0 В (диодный режим)

Проведенные эксперименты позволяют предполагать, что не остаточные газы, а именно кислород, выделяющийся в динамическом режиме, отравляет катод.

4(527).indd 20 17.12.2015 11:26:21

В исследуемом магнетроне при плотности мощности электронной бомбардировки катода 1,5 Вт/см^2 равновесная температура оказалась довольно высокой (≈ 790 °С ярк.) и существенно превышала значение, требуемое для обеспечения тока эмиссии. Для предотвращения накопления кислорода нужно поднять рабочую температуру катода на 25…30 °С выше равновесного значения, чтобы удвоить скорость испарения оксидного покрытия и обеспечить полное поглощение кислорода. Запас активного вещества катода позволял это сделать, использование же встроенного геттера или вакуумного насоса в описанном случае неприемлемо из-за увеличения габаритов магнетрона и необходимости дополнительного источника питания.

На рис. 6 показаны результаты испытаний доработанного магнетрона с повышенной температурой катода. Магнетрон М1 был испытан в динамическом режиме при оптимальном напряжении накала $U_н$ = 4,6 В ($T_к$ ≅ 840 °С ярк.), отказ наступил через 37 тыс. ч из-за падения эмиссии в результате исчерпания запаса активного вещества катода. График рис. 6 демонстрирует удовлетворительную стабильность частоты генерации магнетрона. Монотонный рост величины $U_н(\Theta)$ отражает постепенное снижение эмиссии катода из-за испарения активного вещества. В результате гарантированный ресурс магнетрона был увеличен с 5 000 до 10 000 ч и подтвержден успешной эксплуатацией на борту спутника.

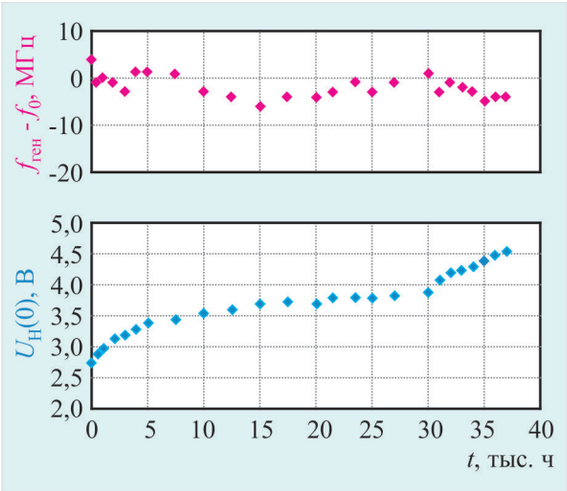


Рис. 6. Параметры доработанного магнетрона М1 в процессе испытаний: частота генерации – вверху; характеристическое напряжение накала – внизу

Заметим, что в импульсном режиме средняя скорость выделения кислорода уменьшается обратно пропорционально скважности $Q_и$ и равновесие достигается при более низкой температуре катода, благодаря испарению активного вещества в паузе между импульсами. Следовательно, при сопоставимой плотности тока ресурс импульсных магнетронов может быть в $Q_и$ раз выше, чем ресурс магнетронов непрерывного действия.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель, описывающая физические эффекты, происходящие в магнетроне с оксидным катодом при длительной работе и обусловленные выделением кислорода под действием электронной бомбардировки катода. Модель, основанная на теории поверхностных явлений и опирающаяся на экспериментальные факты, позволяет объяснить изменение частоты

4(527).indd 21 17.12.2015 11:26:21

генерации магнетрона накоплением избыточного кислорода в вакуумной полости в случае, когда испаряющегося с катода вещества недостаточно для поглощения кислорода. В результате наблюдается отравление катода кислородом, адсорбированным на его поверхности, падение тока эмиссии и изменение частоты генерации. Для поддержания эмиссии необходимо устанавливать температуру катода не ниже равновесного значения либо принимать специальные меры для удаления избыточного кислорода. Реализованное предложение по повышению рабочей температуры катода позволило увеличить минимальную наработку магнетрона непрерывного действия до 10 000 ч и обеспечить стабильность частоты генерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никонов, Б. П.** Оксидный катод / Б. П. Никонов. – М.: Энергия, 1979.

2. **Каргин, А. Н.** Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи / А. Н. Каргин // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 62 – 66.

3. **Каргин, А. Н.** Явления на поверхности оксидного катода в магнетроне // А. Н. Каргин, А. М. Соколов // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 69 – 70.

4. **Адамсон, А.** Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979.

5. **Де Бур, Я.** Динамический характер адсорбции / Я. Де Бур. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1962.

6. **Герман, Г.** Оксидный катод / Г. Герман, С. Вагенер. – М.: Гостехиздат, 1949.

7. **Астраханцева, Н. Ф.** Взаимодействие оксидного катода с углекислым газом / Н. Ф. Астраханцева, Б. П. Никонов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1975. – Вып. 9. – С. 56 – 63.

8. **Варго, П.** Диссоциация окислов щелочно-земельных металлов, вызываемая электронной бомбардировкой / П. Варго, В. Шеферд; пер. с англ. под ред. Б. Н. Попова и А. Р. Шульмана // Эффективные термокатоды. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – Вып. 2.

Статья поступила 24 августа 2015 г.

УДК 621.385.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА *W*-ДИАПАЗОНА

А. Д. Григорьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

С. Н. Морозов

ЗАО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург

Представлены результаты предварительного проектирования усилительного клистрона *W*-диапазона с выходной мощностью в импульсе 1 кВт, рабочей полосой частот 1 ГГц, ускоряющим напряжением 10 кВ и коэффициентом усиления 35 дБ. Проектирование проведено с учетом возможности использования полученных результатов на более высоких частотах.

КС: *усилительный клистрон, многозазорные резонаторы, миллиметровые волны, ленточный электронный поток*

4(527).indd 22 17.12.2015 11:26:21

The results of preliminary designing of a W-band amplifying klystron with the output power in the pulse 1kW, operating frequency band 1 GHz, accelerating voltage 10 kV and gain 35 dB have been presented. The designing was conducted taking into account the possibility of using the obtained results at higher frequencies.

Keywords: amplifying klystron, multigap resonators, millimeter waves, stripe electron flow

1. ВВЕДЕНИЕ

Потребность в мощных когерентных источниках электромагнитного излучения быстро возрастает. Такие источники необходимы для зондирования атмосферы Земли [1] и других планет [2], для создания скоростных помехозащищенных линий связи, радиолокационных систем радиовидения [3], для питания малогабаритных ускорителей заряженных частиц [4] и для многих других приложений.

Существующие в настоящее время мощные генераторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: гиротроны, многорезонаторные магнетроны, лазеры на свободных электронах – часто не удовлетворяют требованиям разработчиков по качеству спектра генерируемого сигнала, возможности его модуляции, по массе и габаритам. В связи с этим в США и Европе проводятся работы по продвижению «классических» усилителей СВЧ (клистронов, ламп бегущей волны О-типа) в высокочастотную область микроволновых частот – в миллиметровый и терагерцовый диапазоны. Так, в настоящее время фирма CPI (США-Канада) выпускает достаточно большую номенклатуру клистронов с распределенным взаимодействием (использующих многозазорные резонаторы) миллиметрового диапазона для радиолокационных станций. В качестве примера приведем широкополосный клистрон с распределенным взаимодействием VKB2475 *W*-диапазона (рис.1) [5]. Клистрон имеет выходную мощность 1 кВт в импульсе на частоте 94,5 ГГц, среднюю

Рис. 1. Клистрон VKB2475 фирмы CPI

4(527).indd 23 17.12.2015 11:26:22

мощность 150 Вт. Полоса усиливаемых частот составляет 1 ГГц по уровню -1 дБ, ускоряющее напряжение – 17,1 кВ, коэффициент усиления – более 45 дБ, запирающее напряжение сетки – минус 3 кВ. Этот прибор используется в радиолокационных системах высокого разрешения и в системах наблюдения за атмосферой. Фирма производит также генераторы на клистронах с распределенным взаимодействием на частоты до 220 ГГц. В России подобные приборы не выпускаются. В связи с этим была поставлена цель работы – продемонстрировать возможность разработки мощного клистрона *W*-диапазона с использованием имеющейся на предприятиях электронной промышленности технологии.

2. ПАРАМЕТРЫ ПРОЕКТИРУЕМОГО КЛИСТРОНА

Исходя из имеющегося опыта разработки и доступных технологических возможностей, были определены следующие параметры проектируемого прибора (таблица).

Параметр	Значение
Рабочая частота f_0, ГГц	94
Выходная мощность в импульсе $P_{вых}$, кВт	1
Рабочая полоса частот Δf по уровню -3 дБ, МГц	1000
Ускоряющее напряжение U_0, кВ	10
Коэффициент усиления G, дБ	>40

Как видно, при той же выходной мощности и рабочей полосе частот, что и аналог, проектируемый прибор имеет значительно более низкое ускоряющее напряжение, что снижает требования к источнику питания и к волновому (характеристическому) сопротивлению резонаторов. В то же время увеличивается ток луча, что предъявляет более жесткие требования к электронно-оптической системе прибора.

Принимая полный КПД клистрона η равным 15 %, получаем постоянную составляющую тока электронного луча $I_0 = 0{,}67$ А. Расчет показывает, что для создания цилиндрического луча с таким током требуется слишком высокая компрессия электронной пушки (более 180) и индукция магнитного поля более 1,5 Тл. В связи с этим было принято решение использовать ленточный электронный луч, несмотря на то, что для такого луча нужны специальная электронная пушка и специальная конструкция резонаторов. Основные данные для проектирования электронно-оптической и резонаторной систем следующие: волновое число в свободном пространстве $k_0 = \omega_0/c = 1{,}97$ мм$^{-1}$, где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая частота, c – скорость света в вакууме. Электронная постоянная распространения $\beta_e = \omega_0/v_e = 9{,}84$ мм$^{-1}$, где v_e – постоянная составляющая скорости электронов, поперечная постоянная распространения $\gamma = \sqrt{\beta_e^2 - k_0^2} = 9{,}64$ мм$^{-1}$.

Толщину пролетного канала определяем исходя из допустимого провисания поля в зазорах. Поскольку продольная составляющая электрического поля в плоском зазоре изменяется по закону $\mathrm{ch}(\gamma x)/\mathrm{ch}(\gamma a/2)$ (где x – поперечная координата, отсчитываемая от плоскости симметрии канала, a – толщина канала), принимая допустимое уменьшение поля в плоскости симметрии по сравнению с границей канала равным 0,75, получаем толщину канала $a = 0{,}16$ мм. Допустим, коэффициент заполнения канала потоком b/a равен 0,6. Тогда толщина луча $b = 0{,}1$ мм. Ширину луча w выбираем равной 1 мм. Таким образом, площадь поперечного сечения ленточного луча $S = 0{,}1$ мм^2, а плотность тока в луче $J_0 = 670$ А/см^2. Принимая допустимую плотность тока с ка-

4(527).indd 24 17.12.2015 11:26:22

тода J_c = 20 А/см^2, получаем площадь катода S_c = 3,35 мм^2 и коэффициент компрессии пушки ξ = 33,5. Это большое, однако достижимое значение.

Значение индукции магнитного поля, необходимое для сопровождения луча в пролетном канале, определяем по формуле для полностью экранированного катода

$$B_b = \sqrt{\frac{mI_0}{ebw\varepsilon_0 v_e}},$$

где e, m – заряд и масса электрона, ε_0 – диэлектрическая постоянная, v_e – скорость электронов. Подставив соответствующие значения, получаем бриллюэновскую индукцию B_b = 0,3 Тл. Реальное магнитное поле в 1,5…2 раза больше бриллюэновского, что приемлемо.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ

Резонаторы проектируемого прибора должны обладать требуемым значением собственной частоты и волнового сопротивления, высокой собственной добротностью и иметь конструкцию, позволяющую их изготовить с заданной точностью. Наиболее жесткие требования предъявляются к выходному резонатору прибора, который должен обеспечивать эффективный отбор энергии от сгруппированного электронного потока. Для оценки необходимого значения волнового сопротивления выходного резонатора примем отношение амплитуды первой гармоники конвекционного тока в выходном резонаторе к постоянной составляющей тока луча χ = 1,1. Для полного отбора энергии от потока необходимо выполнение условия $\rho M^2 Q_l \chi I_0 = U_0$, где M – коэффициент взаимодействия в зазоре резонатора. Примем значение угла пролета в зазоре резонатора $\theta_0 = \pi/2$, что соответствует значению коэффициента взаимодействия M = 0,9. Тогда длина зазора резонатора d = 0,16 мм. В результате получаем необходимое значение волнового сопротивления выходного резонатора ρ_{out} = 180 Ом.

Полученное значение не может быть реализовано в однозазорном резонаторе для ленточного луча. В связи с этим были выбраны многозазорные резонаторы на основе двухсторонней широкой гребенчатой замедляющей системы (ЗС). В качестве рабочего был выбран 2π-вид колебаний, так как на этом виде активная составляющая электронной проводимости положительная и самовозбуждение выходного резонатора невозможно. Период ЗС определяется из условия $\beta_e D = 2\pi$, откуда D = 0,6 мм.

На рис. 2 показан выходной резонатор, спроектированный с помощью программы MEMFIS [6]. При моделировании использовалась сетка, содержащая более 120 000 тетраэдров. Резонатор

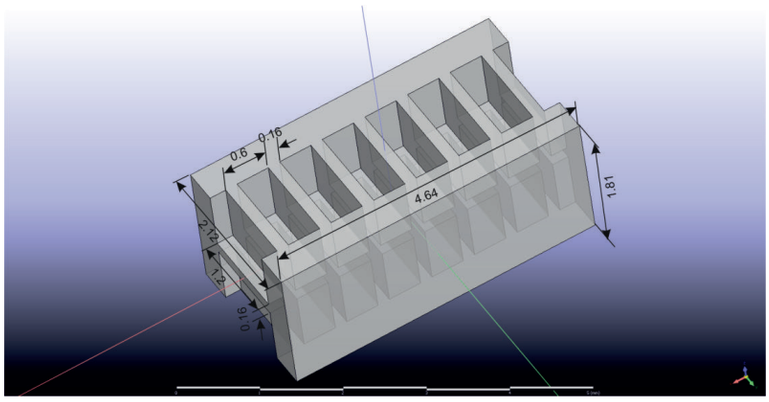
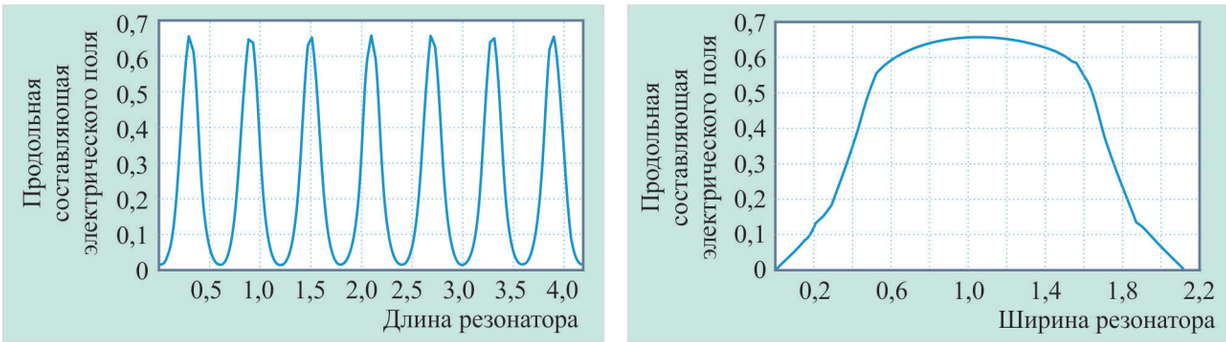


Рис. 2. Выходной резонатор

4(527).indd 25 17.12.2015 11:26:22

имеет семь зазоров длиной 0,16 мм, разделенных металлическими ламелями толщиной 0,44 мм. Ширина пролетного канала – 1,2 мм, толщина – 0,16 мм. Ширина резонатора – 2,1 мм, высота – 1,8 мм. Расчетное значение собственной частоты – 94,8779 ГГц, волновое сопротивление на оси симметрии –194 Ом, собственная добротность для резонатора, выполненного из меди, $Q_0 = 1100$. Ближайшие паразитные виды колебаний имеют собственные частоты 88,6947 и 100,358 ГГц, т. е. разделение частот достаточное для того, чтобы исключить влияние этих видов колебаний на работу прибора.

На рис. 3 показано распределение продольной составляющей электрического поля рабочего вида колебаний по длине резонатора (рис. 3, *а*) и по его ширине (рис. 3, *б*). Как видно, поле во всех зазорах имеет практически одинаковую амплитуду. На расстоянии от оси резонатора ±0,5 мм напряженность поля составляет 0,92 от ее значения на оси. Такая высокая равномерность поперечного распределения поля позволяет использовать электронный луч шириной 1 мм без существенного снижения усредненного волнового сопротивления резонатора.



а) *б*)

Рис. 3. Распределение продольной составляющей электрического поля рабочего вида колебаний по длине (*а*) и ширине (*б*) резонатора

Связь выходного резонатора с нагрузкой осуществляется с помощью волновода нестандартного сечения 2,4×0,3 мм^2, подсоединенного к боковой стенке резонатора (рис. 4, *а*). Для расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) резонатора в его конструкцию добавлена коаксиальная линия со штырем, расположенная в продольной плоскости. Линия возбуждается коаксиальным портом. Второй порт расположен в торце выходного волновода. Размеры штыря выбраны таким образом, чтобы минимизировать возмущение поля резонатора. Расчетная АЧХ показана на рис. 4, *б*. Ширина резонансной кривой по уровню -3 дБ составляет 1037 МГц, что

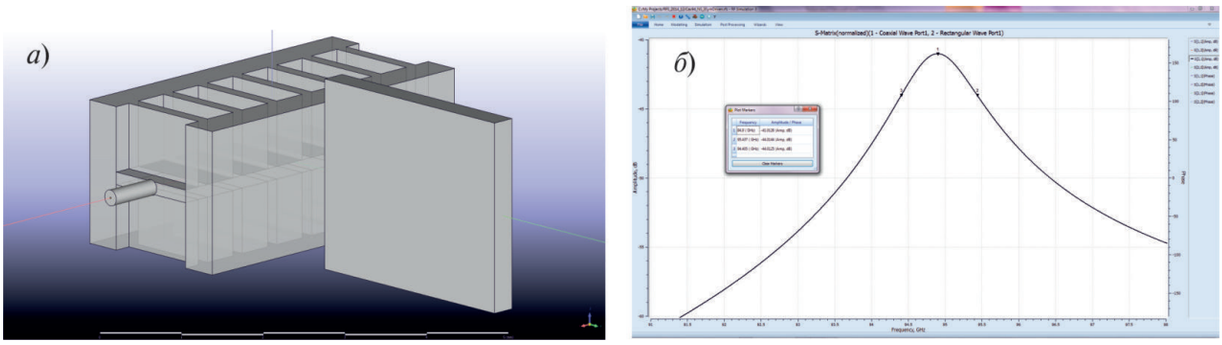


Рис. 4. Выходной резонатор с элементами связи (*а*) и АЧХ резонатора (*б*)

4(527).indd 26 17.12.2015 11:26:22

соответствует нагруженной добротности 91. Отметим, что использование пассивного резонатора позволит получить ширину рабочей полосы частот выходной системы 1 ГГц по уровню -1 дБ.

Входной и четыре промежуточных (рис. 5) резонатора имеют конструкцию, аналогичную выходному резонатору, но количество зазоров уменьшено до трех. Волновое сопротивление этих резонаторов – 48 Ом. Для связи входного резонатора с источником сигнала также используется волновод.

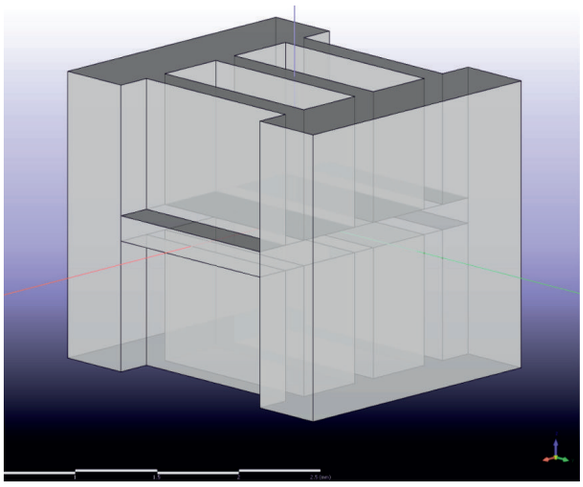


Рис. 5. Промежуточный резонатор

Подстройка частоты выходного и промежуточного резонаторов может осуществляться изменением положения боковой стенки, выполненной в виде гибкой диафрагмы. Для выходного резонатора крутизна перестройки составляет 9,5 МГц/мкм. Крутизна перестройки промежуточных резонаторов – 10,5 МГц/мкм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены параметры электронного потока и спроектированы резонаторы для мощного усилительного клистрона *W*-диапазона. Показано, что резонаторная система клистрона может быть изготовлена с помощью существующей электроискровой технологии металлообработки, так как погрешности изготовления могут быть компенсированы механической подстройкой частоты резонаторов. В настоящее время ведется проектирование электронно-оптической системы прибора и группирователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Li, L.** A 94-GHz cloud radar system on a NASA high-altitude ER-2 aircraft / L. Li, J. M. Heimsfield, P. E. Racette, L. Tian. // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2005. – Vol. 21. – P. 1378 – 1388.

2. **Roitman, A.** State-of-the-Art W-band extended interaction klystron for the CloudSat program / A. Roitman, D. Berry, B. Steer // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2005. – Vol. 52, No 5. – P. 895 – 898.

3. **Wallace, H. B.** Video Synthetic Aperture Radar (Visar) - Darpa. www.darpa.mil/workarea/downloadasset.aspx?

4. **Soliga, S.** The mm-wave sheet beam klystron: performance at different voltages / S. Soliga, M. Schmolke, H. Ytnke // Proc. Particle Accelerator Conf., 1999, N.-Y. – P. 1034 – 1036.

5. **Steer, B.** Extended interaction klystron technology at millimeter and submillimeter wave-lengths / B. Steer, A. Roitman, P. Horoyski et al. http://www.cpii.com/docs/related/40/EIK%20Technology%20at%20MMW%20&%20SubMMW%20Wavelengths.pdf

6. **Григорьев, А. Д.** Методы вычислительной электродинамики / А. Д. Григорьев. – М.: Физматлит, 2012.

Статья поступила 11 сентября 2015 г.

4(527).indd 27 17.12.2015 11:26:22

УДК 621.385.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

А. Д. Григорьев, А. С. Иванов, В. А. Ильин, В. В. Лучинин, В. Н. Титов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Представлены результаты проектирования отдельных узлов ЛБВ *W*-диапазона с рабочей полосой частот 2 ГГц, ускоряющим напряжением 6 кВ, коэффициентом усиления 25 дБ и выходной мощностью в импульсе 6 Вт. Проектирование проведено с учетом возможности использования полученных результатов на более высоких частотах.

КС: лампа бегущей волны, миллиметровый диапазон, замедляющая система, петляющий волновод

The results of designing separate W-range TWT elements with operating frequency band 2 GHz, accelerating voltage 6 kV, gain 25dB and output power in the pulse 6 W have been presented. The designing was conducted taking into account the possibility of using the obtained results at higher frequencies.

Keywords: traveling-wave tube, millimeter range, slow-wave structure, looping waveguide

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы высокоточной радиолокации, работающие в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, используют усилители с выходной мощностью от 1 до 10 Вт, широкой рабочей полосой частот (не менее 2 %), малой массой и габаритными размерами, не превышающими 2 дм^3. Зарубежный опыт свидетельствует, что наиболее подходящим прибором для таких усилителей является лампа бегущей волны типа О (ЛБВ) [1–3]. Имеются и отечественные разработки подобных приборов [4]. Увеличение рабочей частоты РЛС позволяет сократить размеры антенны, увеличить разрешение по дальности и по углу, обеспечить скрытность и помехозащищенность системы.

Лампы бегущей волны О-типа обладают широкой полосой пропускания, достаточно высокими КПД и коэффициентом усиления, конструкция этих приборов позволяет изготавливать их с помощью существующей технологии на частоты вплоть до 100 ГГц. Наиболее перспективна разработка ЛБВ миллиметрового диапазона на уровень выходной мощности 1…100 Вт. В настоящей статье представлены результаты проектирования ЛБВ *W*-диапазона, проведенного с целью исследования возможности производства такого прибора на имеющемся оборудовании и получения необходимых параметров лампы. Исследуется также возможность использования в ЛБВ автоэмиссионного катода, выполненного на основе карбида кремния.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИБОРА

Исходя из интересов потенциального заказчика, определены следующие основные параметры ЛБВ (табл. 1). По сравнению с аналогами лампа имеет пониженное напряжение катода, что уменьшает массу и габаритные размеры источника питания, но в то же время предъявляет более жесткие требования к конструкции электронной пушки и магнитной системы прибора. В связи с этим принято решение использовать в приборе ленточный электронный луч. Такое решение позволяет уменьшить требуемую компрессию электронной пушки и индукцию магнитного поля,

4(527).indd 28 17.12.2015 11:26:22

а также создает более благоприятные условия для использования автоэмиссионного катода и продвижения разработанной конструкции в область более высоких частот.

Таблица 1

Параметр	Значение
Центральная частота f_0, ГГц	95
Мгновенная ширина рабочей полосы частот Δf_i, ГГц	≥2
Рабочая ширина полосы частот Δf_w, ГГц	≥8
Выходная мощность P_{out}, Вт	≥6
Напряжение катода U_0, кВ	6
Коэффициент усиления G, дБ	≥25

Пусть общий КПД лампы $\eta = 4$ %. Постоянная составляющая тока луча $I_0 = P_{out}/(U_0\eta) = 25$ мА. Постоянная составляющая скорости электронов $v_e = (2eU_0/m)^{1/2} = 4{,}61\cdot10^7$ м/с. Волновое число в свободном пространстве $k_0 = \omega_0/c = 1{,}99$ мм$^{-1}$. Электронная постоянная распространения $\beta_e = \omega/v_e = 13{,}93$ мм$^{-1}$, поперечное волновое число $\gamma = (\beta_e{}^2 - k_0{}^2)^{1/2} = 13{,}79$ мм$^{-1}$. Замедление скорости электронов $n_e = 6{,}51$.

Толщину пролетного канала определяем исходя из допустимого провисания поля в зазорах. Поскольку продольная составляющая электрического поля в плоском зазоре изменяется по закону $\mathrm{ch}(\gamma x) / \mathrm{ch}(\gamma a/2)$ (где x – поперечная координата, отсчитываемая от плоскости симметрии канала, a – толщина канала), принимая допустимое уменьшение поля в плоскости симметрии по сравнению с границей канала равным 0,75, получаем толщину канала $a = 0{,}12$ мм. Пусть коэффициент заполнения канала потоком $b/a = 0{,}6$. Тогда толщина луча $b = 0{,}07$ мм. Ширину луча w выбираем равной 0,7 мм. Таким образом, площадь поперечного сечения ленточного луча $S = 0{,}049$ мм^2, а плотность тока в луче $J_0 = 51$ А/см^2. Принимая допустимую плотность тока с катода $J_c = 10$ А/см^2, получаем площадь катода $S_c = 0{,}25$ мм^2 и коэффициент компрессии пушки $\xi = 5{,}1$. Это легко достижимое значение.

Значение индукции магнитного поля, необходимое для сопровождения луча в пролетном канале, определяем по формуле для полностью экранированного катода

$$B_b = \sqrt{\frac{mI_0}{ebw\varepsilon_0 v_e}},$$

где e, m – заряд и масса электрона; ε_0 – диэлектрическая постоянная; v_e – скорость электронов. Подставив соответствующие значения, получаем бриллюэновскую индукцию $B_b = 0{,}085$ Тл. Реальное магнитное поле в 1,5…2 раза больше бриллюэновского.

В проекте рассматривается возможность использования в лампе оригинального автоэмиссионного катода на основе карбида кремния, разработанного в ЛЭТИ. Применение такого катода позволит резко уменьшить время готовности ЛБВ.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В качестве замедляющей системы (ЗС) используется "петляющий волновод" прямоугольного поперечного сечения. На рис. 1 изображены два периода этой ЗС с пролетным каналом. ЗС ти-

4(527).indd 29 17.12.2015 11:26:23

па «петляющий волновод» отличается простой жесткой конструкцией, достаточно большим сопротивлением связи рабочей пространственной гармоники и малым затуханием. Так как поля в соседних зазорах этой ЗС имеют геометрический сдвиг по фазе π, основная пространственная гармоника ее обладает отрицательной дисперсией и в качестве рабочей используется минус первая пространственная гармоника. Это позволяет увеличить период ЗС для данного замедления, что важно с технологической точки зрения.

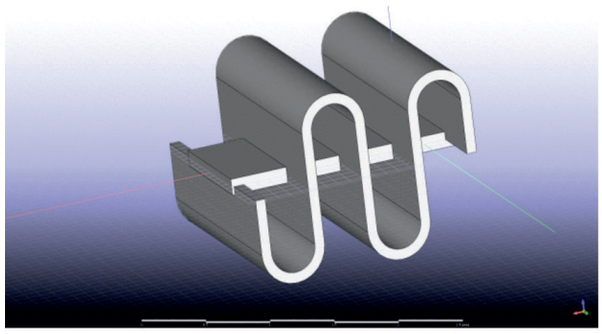


Рис. 1. ЗС типа «петляющий волновод»

Дисперсионное уравнение ЗС типа «петляющий волновод» имеет вид [5]

$$\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 = 1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2 \left(\frac{\varphi}{\pi} - 1\right)^2,$$

где ω – угловая частота; ω_c – критическая угловая частота волновода; d – полупериод ЗС; $l = d + h + \pi d/2$ – длина волновода, соответствующая одному полупериоду; h – длина прямолинейного участка волновода. Уравнение не учитывает наличия пролетного канала и возмущения поля волны в изогнутых участках волновода.

Для решения этого уравнения была составлена программа в среде Matlab, с помощью которой были оптимизированы размеры ЗС, исходя из заданного замедления фазовой скорости гармоники в рабочей точке, выбранного равным $n_p = 1{,}03 n_e = 6{,}6$. Оптимизированные размеры приведены в табл. 2.

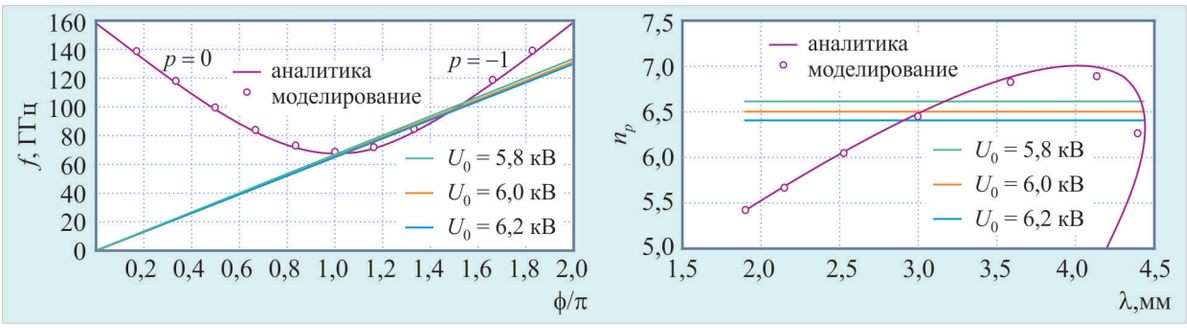
Таблица 2

Размер	Обозначение	Значение, мм
Полупериод ЗС	d	0,35
Размер широкой стенки волновода	a	2,2
Размер узкой стенки волновода	b	0,1
Длина прямолинейного участка волновода	h	0,34
Длина полупериода	l	1,05
Толщина пролетного канала	t	0,1
Ширина пролетного канала	w	1,2

Дисперсионная характеристика ЗС с указанными размерами, построенная по уравнению (1), показана на рис. 2, *а* (сплошная линия). Кружками показаны значения, полученные с помощью

4(527).indd 30 17.12.2015 11:26:23

программы электродинамического моделирования с использованием периодических граничных условий. Как видно, результаты расчета по аналитической формуле хорошо совпадают с данными моделирования. На том же рисунке показаны линии электронного луча для трех значений ускоряющего напряжения.



а) *б*)

Рис. 2. Дисперсионные характеристики ЗС типа «петляющий волновод» (*а*) и рабочей пространственной гармоники (*б*)

Сопротивление связи рабочей гармоники вычисляется по формуле

$$R_{\text{ср}} = \frac{\left|E_{zp}\right|^2}{2\beta_p^2 P}, \tag{2}$$

где E_{zp} – амплитуда продольной составляющей электрического поля p-й пространственной гармоники; P – мощность, передаваемая по ЗС. Считая поле в зазоре ЗС равномерным, получим $E_{zp} = M_p E_0$, где $M_p = \sin(\beta_p/2)/(\beta_p/2)$ – коэффициент взаимодействия поля в зазоре. Мощность, передаваемая по прямоугольному волноводу, определяется выражением $P = E_0^2 ab\sqrt{1-(\omega_c/\omega)^2}/(4\eta_0)$, где $\eta_0 = 120\pi$ – характеристическое сопротивление свободного пространства, Ом. Подставив эти величины в формулу (2), получим

$$R_{\text{ср}} = \eta_0 \frac{2M_p^2}{ab\beta_p^2\sqrt{1-(\omega_c/\omega)^2}}.$$

Результаты расчета по этой формуле сопротивления связи минус 1-й пространственной гармоники приведены на рис. 3. Как видно, в рабочем диапазоне длин волн оно изменяется от 30 до 18 Ом.

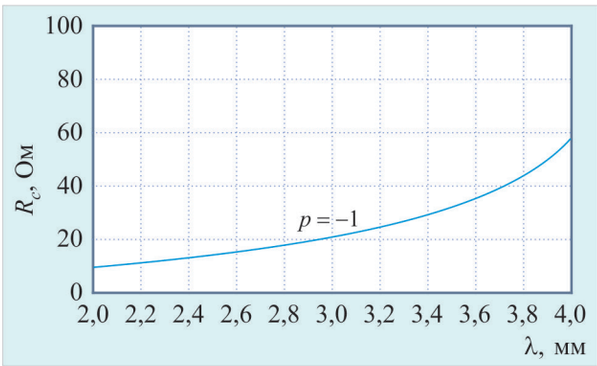


Рис. 3. Сопротивление связи минус 1-й пространственной гармоники

4(527).indd 31 17.12.2015 11:26:23

4. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ЛБВ

Полученные данные позволяют рассчитать параметр усиления ЛБВ $C = \sqrt[3]{(R_c I_0 / 4U_0)}$ и параметр пространственного заряда $q = \left[(1/C)(\omega_q/\omega)\right]^2$, где ω_q – редуцированная плазменная частота.

Для центральной частоты ω = 95 ГГц $C = 0{,}05$, $q = 0{,}0084$.

Малосигнальный коэффициент усиления ЛБВ для малых параметров усиления и пространственного заряда рассчитывается по формуле Пирса, дБ, $G = H + D + 8{,}68\alpha L_{tot}$, где α – значение положительного корня характеристического уравнения ЛБВ; L_{tot} – длина ЗС; D – параметр уменьшения усиления за счет сосредоточенного поглотителя. Для указанных значений параметров усиления и пространственного заряда можно положить H = -9,54 дБ, D = -6 дБ. Значение корня α аппроксимировалось полиномом $\alpha = -0{,}365b^2 - 0{,}299b + 0{,}866$, где $b = (v_e - v_p)/v_p C$ – параметр рассинхронизма, v_e и v_p – скорость электронов и фазовая скорость p-й пространственной гармоники.

Результаты расчета по приведенным формулам зависимости коэффициента усиления ЛБВ от частоты для трех значений ускоряющего напряжения показаны на рис. 4. Общая длина двух секций ЗС составляла 40 периодов (28 мм). Предполагается, что конец первой секции и начало второй согласованы. Как видно, мгновенная ширина полосы усиливаемых частот, определенная по уровню -1 дБ, для всех значений ускоряющего напряжения превышает 3 ГГц. Изменение ускоряющего напряжения на ±0,2 кВ позволяет сдвигать центральную частоту в пределах от 92 до 102 ГГц при сохранении коэффициента усиления более 25 дБ. Таким образом, заданные параметры лампы обеспечиваются с некоторым запасом.

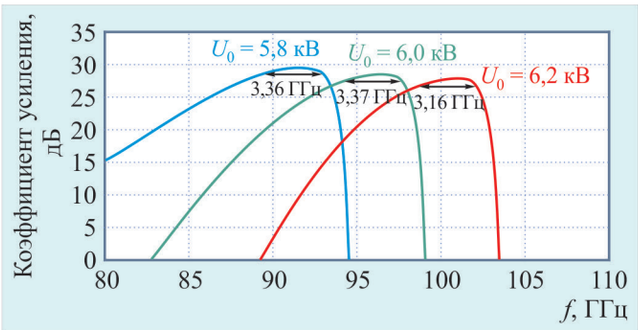


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления ЛБВ от частоты

5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Для проектирования магнитной системы использовалась программа ANSIS Maxwell. Распределение магнитной индукции в системе показано на рис. 5. Использовались постоянные аксиально-намагниченные магниты SmCo с энергией 15 МГсЭ. Зазор полюсных наконечников составляет 0,33 мм, их толщина – 2,5 мм. Индукция в плоскости симметрии B_0 = 0,25 Тл. Габаритные размеры магнитной системы – 30×15×11 мм^3, что удовлетворяет поставленным требованиям. Подстройка магнитного поля может осуществляться шунтированием полюсных наконечников.

4(527).indd 32 17.12.2015 11:26:23

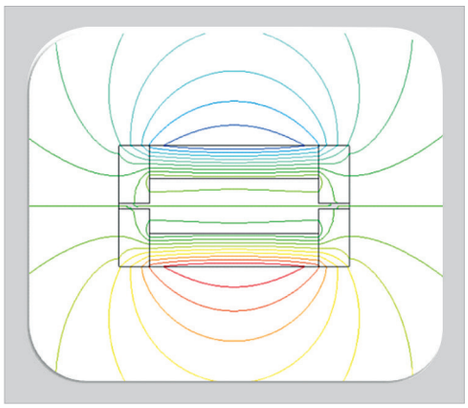
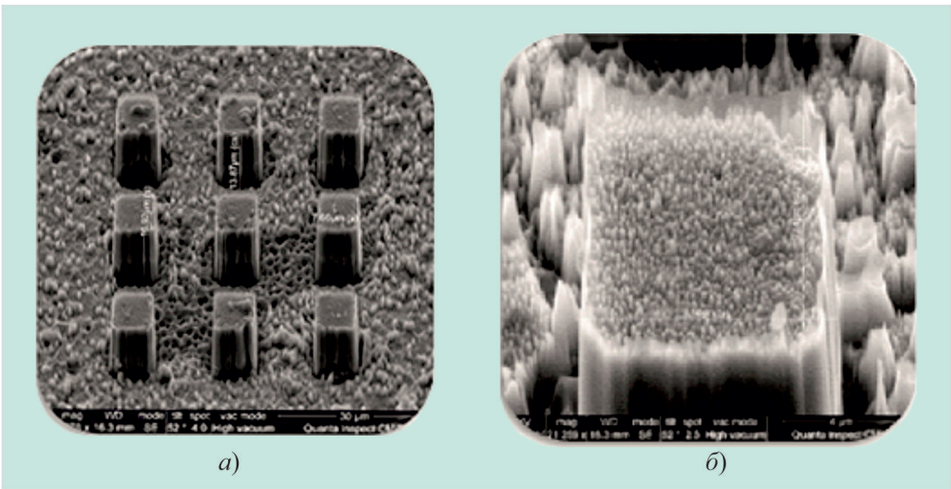


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля

6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

В электронной пушке используется термоэмиссионный импрегнированный катод с допустимой плотностью тока 20 А/см^2. Коэффициент линейной компрессии луча – 2,5. В качестве прототипа используется пушка Мюллера. Рассматривается возможность использования в приборе автоэмиссионного катода на основе карбида кремния [5]. Этот катод допускает плотность тока до 10 А/см^2. На рис. 6, *а* показан образец катода, содержащий 9 выступов, а на рис. 6, *б* – микрофотография одного выступа с находящимися на его вершине SiC-остриями. Плотность размещения острий – 108 см$^{-2}$.



а) *б*)

Рис. 6. Автоэмиссионный SiC-катод

Вольт-амперная характеристика катода с девятью выступами показана на рис. 7. При снятии этой характеристики сплошной анод располагался на расстоянии 70 мкм от катода. Верхней точке на характеристике соответствует плотность тока с катода 10 А/см^2. При использовании автокатода коэффициент компрессии пушки увеличивается до 5,5, что может создать определенные трудности, связанные с наличием поперечных составляющих скорости электронов. Однако моделирование показывает, что эти скорости незначительны. В настоящее время проводятся

4(527).indd 33 17.12.2015 11:26:24

испытания катода на срок службы и устойчивость к ионной бомбардировке, а также ведется его модернизация с целью получения равномерной по площади плотности тока эмиссии при наличии отверстия в аноде.

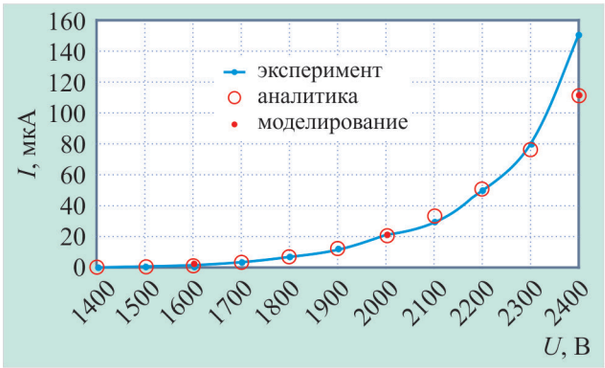


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика автокатода

Применение автоэмиссионного катода в приборе позволит существенно сократить его время готовности, что важно для целого ряда применений.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено предварительное проектирование ЛБВ средней мощности, *W*-диапазона. Результаты проектирования демонстрируют возможность создания такой лампы с помощью имеющейся технологии производства. Исследуется возможность использования в приборе автоэмиссионного катода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Malek, F.** The analytical design of a folded waveguide travelling wave tube and small signal analysis using Madey’s theorem / F. Malek // PIER 98. – 2009. – P. 137 – 162.

2. **Booske, J. H.** Accurate parametric modeling of folded waveguide circuit for millimeter-wave travelling wave tubes / J. H. Booske, M. C. Converse, C. L. Cory et al. // IEEE Trans. – 2005. – Vol. ED-52, No 5.– P. 685 – 694.

3. **Choudhury, A. R.** Design of electron gun and focusing system for *W*-band folded wave1guide TWT / A. R. Choudhury, R. Guha, S. Arya et al. / IJECT. – 2015. – Vol. 6, No 1. – P. 200 – 201.

4. **Иванов, А. А.** Разработка ЛБВ диапазона 3 мм / А. А. Иванов, Н. В. Соколова // Материалы XVII координационного НТ-семинара по СВЧ-технике. – Нижний Новгород, 2011.

5. **Afanasyev, A. V.** Superfast drift step recovery diodes (DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC / A. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin et al. // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 740 – 742. – P. 1010 – 1013.

Статья поступила 11 сентября 2015 г.

4(527).indd 34 17.12.2015 11:26:24

УДК 621.382.3

СВОЙСТВА DA-pHEMT AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

К. С. Журавлев, Д. В. Гуляев, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Д. Ю. Протасов

ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Б. Я. Бер, Д. Ю. Казанцев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

Изучены особенности нового перспективного типа псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктур с дополнительным акцепторным легированием барьеров, предназначенных для создания мощных СВЧ-транзисторов типа pHEMT (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor). Проведено сравнение транспортных характеристик новых и обычных pHEMT-гетероструктур. Показано, что введение дополнительных *p*+легированных барьерных слоев позволяет достичь двукратного увеличения концентрации двумерного электронного газа в InGaAs квантовой яме без появления параллельной проводимости по AlGaAs барьерным слоям. Методом вторичной ионной масс-спектроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии проведена оценка концентрации легирующих акцепторов и доноров, проникающих из барьерных слоев в квантовую яму. Показано, что снижение подвижности электронов обусловлено рассеянием на ионизированных донорах и не связано с введением в структуру дополнительных легированных акцепторами слоев.

КС: псевдоморфная AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктура, мощный СВЧ-транзистор, pHEMT, дополнительное акцепторное легирование барьеров

The peculiarities of a new promising type of pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures with additional acceptor doping of barriers designed for creating high-power microwave transistors of pHEMT type (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) have been investigated. The transfer characteristics of new and common pHEMT heterostructures were compared. It was shown that the introduction of additional p+doped barrier layers allows to achieve double increase of 2D electron gas concentration in InGaAs quantum well without parallel conductivity appearance along AlGaAs barrier layers. The assessment of concentration of doping acceptors and donors penetrating from barrier layers into the quantum well was made by method of secondary ion mass-spectroscopy and photoluminescence spectroscopy. It was shown that the electron mobility decrease was conditioned by dissipation on ionized donors and it is not connected with the introduction of additional doped acceptor layers into the structure.

Keywords: pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructure, high-power microwave transistor, pHEMT, additional acceptor doping of barriers

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные СВЧ-транзисторы типа pHEMT (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) на основе псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs-гетероструктур уже многие годы являются основным элементом устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов. За это время было проведено огромное количество исследований, направленных на улучшение параметров транзистора, таких, как выходная мощность, коэффициент усиления и коэффициент полезного действия и т. п. [1]. Значительная часть исследований была посвящена улучшению основных электрофизических характеристик pHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs-гетероструктур, а именно

4(527).indd 35 17.12.2015 11:26:24

повышению концентрации и подвижности двумерного электронного газа (2DEG) в InGaAs квантовой яме [2–4].

Однако, несмотря на это, в AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктурах, предназначенных для изготовления мощных высокочастотных транзисторов, не удалось превысить концентрацию 2DEG больше (2…3)·10^{12} см$^{-2}$ без появления параллельной проводимости по AlGaAs-слоям [1]. Решение этой проблемы за счет более широкозонных барьеров для 2DEG, например AlAs, не получило распространения из-за сопутствующего возрастания количества DX-центров, а также инверсии долин в зоне проводимости [5]. В результате различные варианты конструкций pHEMT на основе обычных псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs-гетероструктур демонстрируют приблизительно одинаковую удельную мощность, не превышающую 1 Вт/мм [6].

Недавно нами была предложена новая конструкция псевдоморфной AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктуры, позволившая значительно увеличить мощность pHEMT на ее основе [7]. На частоте 10 ГГц такие транзисторы продемонстрировали удельную выходную мощность более 1,6 Вт/мм. Более чем 50%-ного увеличения мощности pHEMT удалось достичь в результате введения в конструкцию гетероструктуры дополнительных p^+легированных AlGaAs барьерных слоев. Встроенное электрическое поле в таких структурах дополнительно локализует электроны в InGaAs квантовой яме, что позволяет добиться кратного увеличения концентрации 2DEG.

Усложнение pHEMT-гетероструктуры за счет применения дополнительных акцепторных слоев неминуемо влечет за собой необходимость оптимизации конструкции структуры и условий ее роста. Для этого необходимо понимать не только преимущества новой конструкции pHEMT-гетероструктуры, но и недостатки. Поэтому в данной работе для определения параметров предложенной конструкции pHEMT AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетеростуктур с донорно-акцепторным легированием барьеров (DA-pHEMT) было проведено комплексное исследование их структурных, транспортных и оптических свойств.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT-гетероструктуры получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках GaAs ориентации (100) с буфером, состоящим из слоя GaAs толщиной 0,4 мкм и сверхрешетки GaAs/AlGaAs. Типичные конструкции исследованных гетероструктур, обычной и с двухсторонним донорно-акцепторным легированием барьеров, приведены в таблице. Для гетероструктур акцепторной примесью являются атомы бериллия, донорной примесью – атомы кремния.

Концентрация n и подвижность μ электронов в различных слоях гетероструктуры были определены из магнитополевых зависимостей эффекта Холла и магнитосопротивления [8]. Измерение магнитополевых зависимостей эффекта Холла и магнитосопротивления осуществлялось методом Ван-дер-Пау в диапазоне индукции магнитного поля от 0 до 2 Тл при температуре 77 К. Омические контакты к образцам приготавливались путем пробития высоковольтным разрядом индиевой фольги, наложенной на образец. Характерные значения концентрации/подвижности 2DEG в InGaAs квантовой яме для обычной и DA-pHEMT гетероструктур составили при 300 К 2,5·10^{12} см$^{-2}$/6500 см^2/(В·с) и 4·10^{12} см$^{-2}$/5500 см^2/(В·с) соответственно. При 77 К подвижность 2DEG достигла значений в 16800 и 13 800 см^2/(В·с) соответственно, а концентрация 2DEG от температуры менялась незначительно.

4(527).indd 36 17.12.2015 11:26:24

Тип гетероструктуры		Слой гетероструктуры. Назначение	Состав (x_{AlAs}, y_{InAs})	Толщина, нм	Уровень легирования
DA-pHEMT	Обычная pHEMT				
+	+	Полуизолирующая GaAs-подложка	–	$600\cdot10^3$	SI, (WT)
+	+	Буферный слой GaAs	–	400	–
+	+	СР AlGaAs (6 нм)/GaAs (5 нм)	–	–	–
+	+	Барьерный слой $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	100	–
+	Нет	**Барьерный слой p^+-$Al_xGa_{1-x}As$**	0,25	15	$4\cdot10^{18}$ см$^{-3}$
+	+	Барьерный слой – $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	5	–
+	+	**δ-Si-слой в матрице GaAs**	–	–	$8\cdot10^{12}$ см$^{-2}$
+	+	Спейсер – $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	3	–
+	+	Сглаживающий слой – GaAs	–	3	–
+	+	Канал – $In_yGa_{1-y}As$	0,165	14	–
+	+	Сглаживающий слой – GaAs	–	1,5	–
+	+	Спейсер – $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	3	–
+	+	**δ-Si-слой в матрице GaAs**	–	–	$7{,}25\cdot10^{12}$ см$^{-2}$
+	+	Барьерный слой – $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	7	–
+	Нет	**Барьерный слой p^+-$Al_xGa_{1-x}As$**	0,25	8	$5\cdot10^{18}$ см$^{-3}$
+	+	Барьерный слой – $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	6	–
+	+	Стоп-слой – $Al_xGa_{1-x}As$	0,86 – 0,9	3	–
+	+	Барьерный слой – GaAs	–	27	–
+	+	Контактный слой n^+-GaAs	–	52	$4\cdot10^{18}$ см$^{-3}$

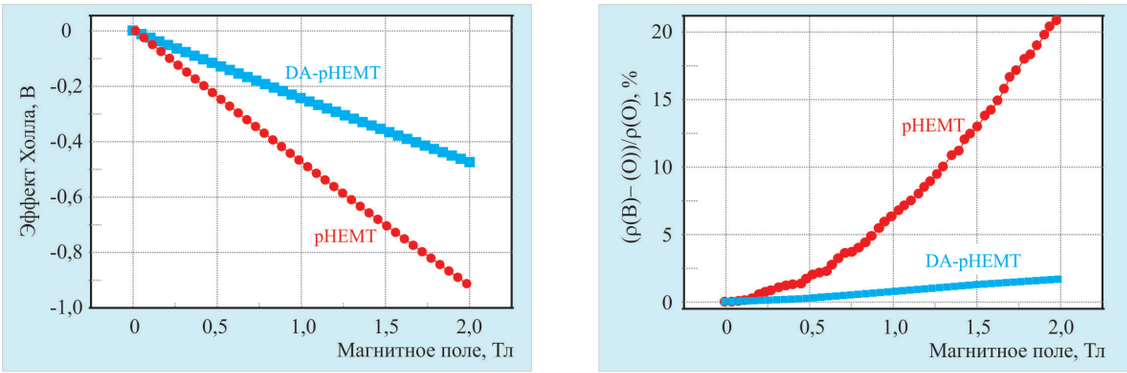
Примесный состав образцов анализировался методами фотолюминесценции (ФЛ) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Для возбуждения ФЛ использовался YAG:Nd-лазер с длиной волны 527 нм и максимальной мощностью 150 мВт. Регистрация ФЛ проводилась спектрометром на основе одинарного дифракционного монохроматора, оснащенным кремниевой CCD-матрицей. Измерения ФЛ проводились при температуре 77 К. Для определения методом ВИМС профиля распределения атомов легирующей примеси в слоях гетероструктуры – бериллия (N_{Be}) и кремния (N_{Si}) – использовалась установка IMS-7f (CAMECA) с возможностью высокого массового разрешения. В качестве первичных ионов при нейтрализации зарядки образцов путем облучения их пучком электронов использовались O_2 и Cs^+ соответственно.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены экспериментальные магнитополевые зависимости эффекта Холла (*а*) и магнитосопротивления (*б*) для обычной и DA-pHEMT гетероструктур. Как можно увидеть из рис. 1, *а*, зависимость эффекта Холла от индукции магнитного поля описывается линейным законом для обоих типов гетероструктур, однако для обычной pHEMT-структуры эта зависимость круче. Известно, что вклад в величину эффекта Холла от разных сортов носителей заряда пропорционален отношению квадрата их подвижности к концентрации [9]. Поэтому в эффекте Холла доминирует вклад от их наиболее высокоподвижной части электронов – 2DEG, т. е. линейность зависимости эффекта Холла не является доказательством отсутствия/наличия параллельной проводимости по барьерным слоям вплоть до концентраций, близких к концентрации 2DEG. Разный наклон зависимостей связан с тем, что в случае доминирования

4(527).indd 37 17.12.2015 11:26:25

одного типа носителей заряда величина эффекта Холла становится обратно пропорциональной их концентрации. Следовательно, уменьшение величины эффекта Холла в DA-pHEMT-гетероструктурах свидетельствует об увеличении в них концентрации 2DEG по сравнению с концентрацией 2DEG в обычных pHEMT-гетероструктурах.



а) *б*)

Рис. 1. Магнитополевые зависимости эффекта Холла (*а*) и магнитосопротивления (*б*) для обычной и DA-pHEMT гетероструктур при 77 К

В то же время наличие параллельной проводимости по барьерным слоям легко определяется по величине положительного магнитосопротивления, которое возростает при наличии нескольких типов электронов в различных слоях гетероструктуры [10]. Как можно увидеть из рис. 1, *б*, в обычной pHEMT-структуре положительное магнитосопротивление достигает 20 % в магнитном поле 2 Тл, а его магнитополевая зависимость описывается законом, близким к квадратичному. Такое поведение указывает на существование в обычной pHEMT-гетероструктуре нескольких типов электронов с разной подвижностью. В DA-pHEMT-гетероструктуре величина магнитосопротивления на порядок меньше, что указывает на уменьшение концентрации электронов в барьерных слоях таких структур.

Для определения значений концентрации и подвижности электронов мы воспользовались методом многозонной подгонки теоретических значений продольной σ_{xx} и поперечной σ_{xy} компонент тензора проводимости под экспериментальные данные. Для обычной pHEMT-структуры установленные значения подвижности μ и концентрации n носителей заряда составили: $n_1 = (2{,}44\pm0{,}02)\cdot10^{12}$ см$^{-2}$, $\mu_1 = (16900\pm100)$ см^2/(В·с) для 2DEG InGaAs квантовой ямы и $n_2 = (0{,}7\pm0{,}06)\cdot10^{12}$ см$^{-2}$, $\mu_2 = (1900\pm300)$ см^2/(В·с) для электронов в барьерах. Соответственно для DA-pHEMT-гетероструктуры эти значения составили $n_1 = (3{,}80\pm0{,}02)\cdot10^{12}$ см$^{-2}$, $\mu_1 = (13900\pm100)$ см^2/(В·с) и $n_2 = (2{,}3\pm0{,}4)\cdot10^{11}$ см$^{-2}$, $\mu_2 = (2700\pm300)$ см^2/(В·с). Таким образом, концентрация электронов в параллельном паразитном канале проводимости в DA-pHEMT-гетероструктуре уменьшилась в 5 раз по сравнению с таковой в обычной pHEMT-структуре, и мы можем заключить, что применение дополнительных *p*+легированных слоев AlGaAs в конструкции гетероструктуры является перспективным способом получения высокой концентрации 2DEG без появления сопутствующей паразитной параллельной проводимости в барьерных слоях структуры.

С другой стороны, в DA-pHEMT-гетероструктурах наблюдается небольшое снижение подвижности 2DEG по сравнению с таковой в обычных pHEMT-гетероструктурах. Усложнение конструкции pHEMT-структуры за счет легирования слоев акцепторной примесью может

4(527).indd 38 17.12.2015 11:26:25

повлечь за собой сегрегацию примесных атомов в процессе эпитаксиального роста [11], что приведет к увеличению рассеяния электронов на ионах примеси и, следовательно, к уменьшению подвижности электронов.

Поэтому для анализа примесного состава образцов были изучены спектры ФЛ DA-pHEMT и обычной pHEMT гетероструктур, представленные на рис. 2. Краевая ФЛ InGaAs квантовой ямы представлена в спектрах линиями "I" и "II", соответствующими переходам из первой и второй электронных подзон в первую подзону тяжелых дырок *e1−h1* и *e2−h1* соответственно и линией *B*. Проведенный ранее [12] анализ спектров ФЛ DA-pHEMT-гетероструктур показал, что полоса *B* связана с оптическим переходом с участием атомов бериллия в намеренно нелегированной InGaAs квантовой яме. Данный факт свидетельствует о сегрегации атомов примеси во время эпитаксильного роста, однако используемая методика ФЛ не позволяет определить концентрацию примесных атомов в InGaAs квантовой яме.

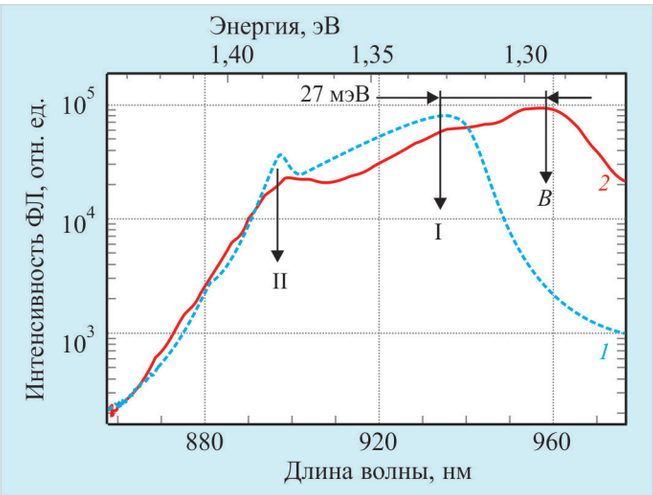


Рис. 2. Типичные спектры ФЛ обычной (*1*) и DA-pHEMT (*2*) гетероструктур. Мощность возбуждения 50 мВт. *T* = 77 K

Поэтому для определения концентрации атомов примеси в InGaAs квантовой яме мы исследовали гетероструктуры методом ВИМС. Первичные экспериментальные данные ВИМС, представляющие собой зависимость интенсивности сигнала на выходе масс-спектрометра (имп./с) от времени травления, были пересчитаны при помощи соответствующих коэффициентов в распределение концентрации примеси в зависимости от глубины травления. Соответствующие коэффициенты пересчета были определены в результате параллельных измерений, проводимых на эталонных образцах того же материала, что и исследуемые, с известным пространственным распределением интересующей примеси. На рис. 3 приведены полученные профили распределения элементов в области квантовой ямы DA-pHEMT-гетероструктуры. Положение InGaAs квантовой ямы на рисунке легко определяется по распределению атомов In, а слои AlGaAs, GaAs и AlAs различаются по интенсивности сигнала атомов Ga и Al. Следует отметить, что установленный профиль распределения атомов легирующей примеси несимметричен. Передний фронт этого распределения, т. е. расположенный ближе к поверхности образца, оказывается менее размытым, чем задний – более удаленный от поверхности образца (см. рис. 3). Такой эффект может быть объяснен вбиванием атомов примеси в глубь поверхности структуры в процессе ионной бомбардировки [13]. Поэтому передний фронт распределения

4(527).indd 39 17.12.2015 11:26:25

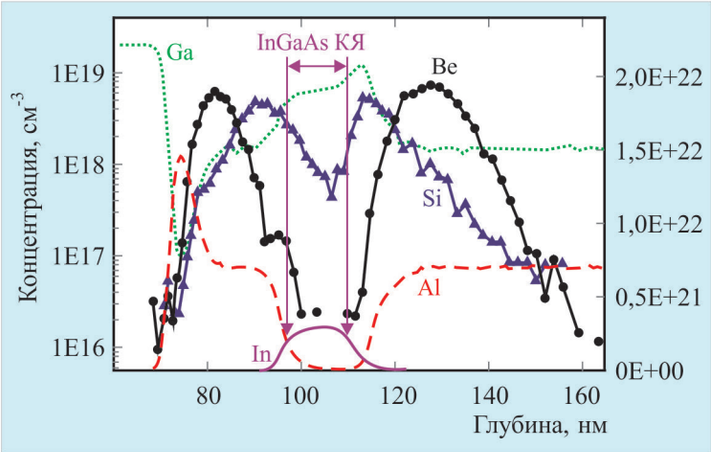


Рис. 3. Профили распределения элементов в DA-pHEMT-гетероструктуре, полученные методом ВИМС

ближе к реальному распределению границ примесных слоев в образце. Из профилей распределения атомов In и Be (см. рис. 3) видно, что концентрация Be в InGaAs квантовой яме ниже разрешающей способности используемого оборудования, составляющего для ионов Be $2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$. В то же время, по данным ВИМС, полуширина дельта-слоя кремния на полувысоте превышает 2 нм (см. рис 3), что сопоставимо с литературными данными [14]. При таком уровне размытия дельта-слоев концентрация атомов Si на гетерогранице квантовой ямы в DA-pHEMT-гетероструктуре оказывается порядка 10^{18} см$^{-3}$. Следовательно, можно утверждать, что атомы кремния проникают в InGaAs квантовую яму. Концентрация кремния в дельта-слоях DA-pHEMT-структур повышена по сравнению с таковой в обычных pHEMT-структурах для увеличения плотности 2DEG в InGaAs квантовой яме и компенсации акцепторов в p^+легированных барьерных слоях. Поэтому мы можем заключить, что уменьшение подвижности 2DEG в исследованных DA-pHEMT-гетероструктурах связано с увеличением рассеяния электронов на ионах кремния вследствие увеличения их концентрации.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе проведено исследование структурных, транспортных и оптических свойств нового перспективного типа псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктур с донорно-акцепторным легированием барьеров. Установлено, что применение дополнительных p^+легированных слоев позволяет значительно увеличить концентрацию 2DEG без появления параллельной проводимости по AlGaAs-барьерам. Установлено, что, несмотря на сегрегацию атомов Be во время эпитаксиального роста, их концентрация в намеренно нелегированной InGaAs-яме не превышает $2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$. Выяснено, что падение подвижности 2DEG в таких структурах не связано с рассеянием на ионах Be и, следовательно, с введением в структуру дополнительных p^+легированных бериллием слоев. Небольшое снижение подвижности 2DEG объясняется возрастанием рассеяния на ионах Si из-за увеличения уровня донорного легирования в δ-слоях.

ВИМС-измерения выполнены с использованием оборудования ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях", поддерживаемого Минобрнауки России (Соглашение о предоставлении субсидии №14.621.21.0007, id RFMEFI62114X0007).

4(527).indd 40 17.12.2015 11:26:25

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mokerov, V. G.** / V. G. Mokerov, Yu. V. Fedorov, A. V. Hook // ФТП. – 1999. – № 33. – С. 1064.

2. **Васильевский, И. С.** / И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, Е. А. Климов, В. Г. Мокеров, С. С. Широков, Р. М. Имамов, И. А. Субботин // ФТП. – 2008. – № 42. – С. 1102.

3. **Chao, K. J.** / K. J. Chao, N. Liu, C. K. Shin // Appl. Phys. Lett. – 1999. – No 75. – P. 1703.

4. **Toyoshima, H.** / H. Toyoshima, T. Niwa, J. Yamazaki, A. Okamoto // J. Appl. Phys. – 1994. – No 75. – P. 3908.

5. **Adachi, Sadao.** Properties of aluminium gallium arsenide / ed. by Sadao Adachi // DATA REVIEWS SERIES No 7. – London: INSPEC, 1993.

6. **Dumka, D. C.** Compound semiconductor integrated circuit symposium / D. C. Dumka et al. – Oct. 2010.

7. **Лукашин, В. М.** / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, Е. И. Голант, А. А. Капралова // ФТП. – 2014. – № 48. – С. 684.

8. **Protasov, D.** / D. Yu. Protasov, A. V. Trifanov, V. Ya. Kostyuchenko // Yu. Eur. Phys. J. Appl. Phys. – 2013. – No 62. – P. 30104.

9. **Negara, M. A**. / M. A. Negara, D. Veksler, J. Huang, G. Ghibaudo, P. K. Hurley, G. Bersuker, N. Goel and P. Kirsch // Appl. Phys. Lett. – 2011. – No 99. – P. 232101.

10. **Кучис, Е. В.** Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования / Е. В. Кучис. – М.: Радио и связь, 1990.

11. **Mills, A. P.** / A. P. Mills, L. N. Pfeiffer and K. W. West, C. W. Magee // Journal of Applied Physics. – 2000. – No 88. – P. 4056.

12. **Гуляев, Д. В.** / Д. В. Гуляев, К. С. Журавлев, А. К. Бакаров, А. И. Торопов // ФТП. – 2015. – № 49. – С. 230.

13. **Benninghoven, A.** Secondary ion mass spectrometry: basic concepts, instrumental aspects, applications, and trends / A. Benninghoven, F. G. Rüdenauer, H. W. Werner. – New York, 1987. – P. 1227.

14. **Cunningham, J. E.** / J. E. Cunningham, T. H. Chiu, A. Ourmazd, W. Jan and T. Y. Kuo // J. Cryst. Growth. – 1990. – No 105. – P. 111.

Статья поступила 24 августа 2015 г.

УДК 004.052.32

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АЛЬЯНСА СИСТЕМ ЧАСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ В КОРПУСЕ

Н. С. Данилин, И. Ю. Булаев, М. А. Бражников, М. К. Соловьев

АО «Российские космические системы», г. Москва

Впервые в России разработаны теория и методические основы, подходы и принцип создания, развития и целевого использования инновационных космических микросистем в корпусе как основы макроуровня перспективных микроспутников. Прогрессивная технология позволяет снизить массогабаритные характеристики изделия, его энергопотребление, повысить функциональность в единице объема, сократить цикл «разработка-выпуск» новых космических аппаратов.

КС: наноспутник, система в корпусе, космический аппарат

The theory and methodological basis, the approaches and the principle of creation, development and purpose use of innovational space microsystems in the package as the basis of a macrolevel of perspective microsatellites have

4(527).indd 41 17.12.2015 11:26:25

been developed in Russia for the first time. The progressive technology allows to decrease weight – dimension characteristics of the product, its energy consumption, to increase functionality in the unit of volume, to shorten the cycle “development – output” of new spacecrafts.

Keywords: nanosatellite, system in package, spacecraft

1. ВВЕДЕНИЕ

Ведущие мировые фирмы космического и оборонного сегментов уже несколько лет используют в своих изделиях так называемые системы в корпусе (СвК) (System in Package), где на смену электронно-компонентной базы (ЭКБ) пришли микросистемы в корпусе. СвК – это технология, которая позволяет интегрировать КМОП, КНИ, КНС, биполярные и пленочные структуры с СВЧ, МЭМС, оптоэлектронными и дискретными компонентами в одном корпусе. Уникальность этой технологии определяется соотношением между ценой реализуемых изделий и их функциональностью в единице объема корпуса.

Нами впервые в РФ разработаны теория и методические основы, подходы и принцип создания, развития и целевого использования инновационных космических микросистем в корпусе как основы макроуровня перспективных микроспутников. Эта прогрессивная технология позволяет снизить массогабаритные характеристики изделия, его энергопотребление, повысить функциональность в единице объема, сократить цикл «разработка-выпуск» новых космических аппаратов [1].

Результаты указанных исследований одобрены на коллегии Минэкономразвития (июль 2011 г.), вошли в проект «Сколково», а также в межправительственную Программу РФ – США по развитию космической техники [2].

ЭКБ относится к критически важным высоким технологиям, оказывая определяющее влияние на технический облик и темпы развития космических систем (рис. 1). По результатам проведенных исследований в этом сегменте получена следующая информация.

Западные партнеры предпочитают создавать новые космические системы на основе типовых гибридных узлов, так называемые СвК. Выбор кристаллов для них осуществляется по технологии

Рис. 1. Качество ЭКБ космических систем

4(527).indd 42 17.12.2015 11:26:26

«Known to Good». Это заведомо хорошие кристаллы, прошедшие квалификационные испытания на производстве с нормами проектирования 0,25…0,5 мкм, в будущем – 65 нм и 10…22 нм, имеющие срок хранения до 40 лет. СвК – это новые поколения реализации многокристальных гибридных узлов. Основу СвК для космических систем составляет интеграция полифункций на кристаллах цифровой, аналоговой и радиочастотной техники, активных и пассивных элементах (рис. 2). Программный продукт для них (Soft), что очень важно, на уровне системных достижений космического приборостроения, что является существенным преимуществом для приборостроительных фирм. Достигнуто резкое увеличение функциональных возможностей в единице объема и массы при минимальном потреблении энергии. Происходит значительное уменьшение себестоимости проектов и сроков реализации за счет сокращения циклов проектирования и квалификационных испытаний. Создаются интегрированные аналого-цифровые системы с новыми качественными показателями. Основой для применения перспективных кремниевых пластин в СвК могут стать достижения отечественных фирм «Микрон» (академик Г. Я. Красников), НИИСИ РАН (академик В. Б. Бетелин), НИИ им. Седакова (г. Н. Новгород).

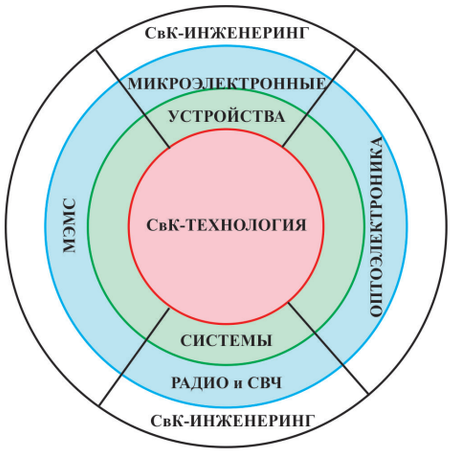


Рис. 2. Обобщенная концептуальная модель СвК

СвК – это новый реальный путь инновационного применения достижений современной микроэлектроники для целей создания наноспутников [3].

Радиационная стойкость новых космических систем не может быть обеспечена классическими пассивными методами (экранирование и защита с помощью титановых и алюминиевых пластин) – слишком мала активная масса спутника, чтобы защита превосходила ее в несколько раз. Поэтому основу радиационной стойкости составляет специальный подбор полупроводниковых пластин, в том числе кремний на изоляторе (КнИ) и кремний на сапфире (КнС). Вторичным эшелоном радиационной защиты является корпус для СвК – керамический или металлокерамический, типа изготавливаемого фирмой «Киосера» (Япония). Нами во взаимодействии с отечественными специалистами проработан комплекс вопросов по физической архитектуре СвК, системным требованиям к ним, по специфике проектирования для космических объектов, включая наноспутники, по сборке СвК, их надежности и радиационной стойкости, эффективности, по тестированию СвК. В данной работе сделан акцент на выборе некорпусированных кристаллов.

СвК являются одним из самых перспективных и экономически обоснованных путей создания микроминиатюрных электронных систем сегодня (рис. 3).

4(527).indd 43 17.12.2015 11:26:26

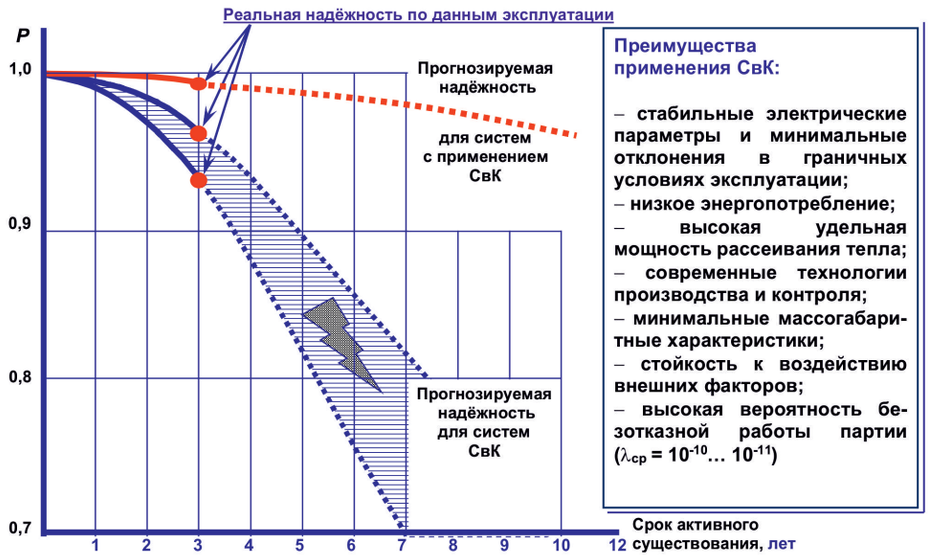


Рис. 3. Эволюция надежности радиоэлектронных космических систем на базе применения СвК

Применение СвК в ряде стратегических направлений, как, например, космическая промышленность, определяется следующими факторами (табл. 1):

Таблица 1

Соотношение параметров систем в корпусе (СвК) и систем на кристалле (СнК)

Параметр	СвК	СнК
Стоимость проекта	X$	(7 – 10)X$
Время реализации до прототипа, мес.	6 – 9	18 – 36
Коллектив	Любой, для разработки системных электронных изделий	Высококвалифицированный специализированный
Отладка прототипа, мес.	1 – 2	>12
Серийность	>10000	Малая
Радиационная стойкость, Крад	(100 – 1000)	Не всегда достижима
Повторяемость производства	В течение 20 лет	С большими затратами

- необходимость в интеграции цифровых, аналоговых и СВЧ-подсистем с МЭМС-модулями и тонко/толстопленочными схемами с целью получения максимальной функциональности в единице объема;

4(527).indd 44 17.12.2015 11:26:26

- требования к уменьшению габаритных размеров изделий и снижению их массы;
- тенденция реализовать тестопригодные системы еще на уровне разработки проекта за счет соответствующего применения функциональной декомпозиции по всем уровням системной иерархии и использования унифицированных и уже апробированных технических решений;
- необходимость в повышении технологичности и надежности выпускаемых изделий;
- требования к существенному снижению расходов разработки, испытаний и производства электронных микросистем (рис. 4).

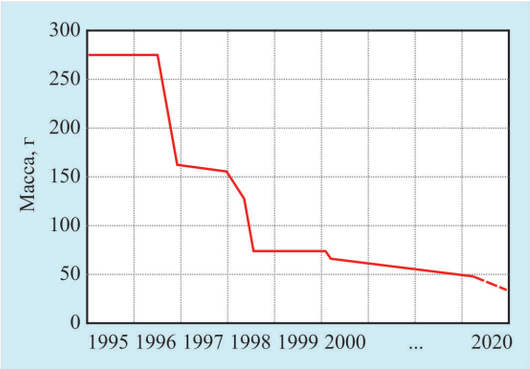


Рис. 4. Тенденция уменьшения массы бортовых управляющих устройств на базе СвК

Важнейшее значение при разработке и реализации СвК имеет выбор квалифицированных полупроводниковых кристаллов (Known Good Die, KGD), а также технологии их установки в СвК. Монтаж полупроводниковых бескорпусных элементов (baredie-кристаллов) совместно с другими компонентами на общей подложке начался с 2005 г. Эта технология оставалась на исследовательском и экспериментальном уровне вплоть до начала 2000-х, когда с появлением новых подходов к корпусированию промышленность двинулась к созданию микросистем в корпусе. Сегодня в перечень микроэлектронных изделий, которые поставляются потребителям, входят следующие типы квалифицированных кристаллов:

- бескорпусной кристалл с алюминиевыми или золотыми контактными площадками (сигнальные и питания), готовый к разварке (bondabledie);
- бескорпусной кристалл, распаянный на подложке (или микроплате) (chip-on-board, COB);
- полупроводниковые пластины (Wafer Level Packaged Die) с механической защитой поверхности кристаллов, с встроенными межсоединениями между портами ввода/вывода и площадками питания либо с возможностями модификации этих соединений.

Целью настоящего исследования является выявление основных вопросов применения KGD в СвК для нужд космической промышленности:

- производители, приобретение и особенности KGD;
- вопросы стандартизации KGD;
- вопросы технологий сборки и тестирования KGD .

2. ПРОИЗВОДИТЕЛИ, ПРИОБРЕТЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ KGD

Ввиду недостаточной информации и опыта по вопросам приобретения KGD в отечественной промышленности, в работе приводится практика НАСА и МО США [4].

В США к настоящему времени KGD предлагают AMI Semiconductor, Aeroflex, Avago Technology, Infineon Technology, NXP, Intel, Freescale, IBM, LSI Logic, Samsung Electronics, Texas Instruments, Analog Devices, Linear Technology, AMD, Catalyst, National Semiconductor, Maxim,

4(527).indd 45 17.12.2015 11:26:27

Signal Process и др. Проблемы приобретения связаны с тем, что, во-первых, большинство предлагаемых KGD не соответствуют квалификациям QML Q/V и, во-вторых, коммуникация с производителями достаточно сложна по ряду причин.

Следует отметить, что в 2005 г. для нужд ВПК США была создана ассоциация производителей KGD под именем Die Product Consortium (DPC), в которую входит большинство указанных производителей. До 2005 г. вся KGD-инфраструктура была связана только с программой DARPA МО США. В 2005 г. появилась программа DPC по расширению рынка многокристальных сборок, а с 2006 г. DPC превратилась в орган стандартизации в области KGD. Дорожная карта DPC построена на двухгодичных циклах. В ней отдельное место занимает практическое развитие технологии СвК. Для этой цели в консорциуме создана SiP Project Team (группа по развитию СвК). В ее задачи входит работа в области методологического и технологического развития СвК, обмен СвК-информацией между членами консорциума, работа с партнерами вне консорциума в области технологии, рынка и др.

Первым шагом до приобретения KGD является выбор потенциального производителя, который проводится либо по методике Jet Propulsion Laboratory – Electronic Parts Engineering Office (для НАСА), либо по методике МО США MIL-STD 1388-1A «Logistic Support Analysis» и IEC 62258 «Semiconductor Die Products: Requirements for Procurements and Use». Выбор сводится к следующим основным процедурам:

- первоначальный выбор производителя на базе предварительных соображений о коммуникативности, технологичности, цене изделия и др.;
- определение изделия в продуктовой гамме производителя;
- ознакомление с технологическими особенностями производства пластин, из которых или на которых поставляется изделие;
- ознакомление с особенностями разработки изделия;
- анализ параметров системы качества, действующей на предприятии;
- анализ системы обеспечения надежности изделия;
- анализ тестовой среды и технология тестирования изделия;
- анализ системы отбраковки.

В продуктовой гамме предлагаемых на рынке кристаллов KGD самый большой класс составляют так называемые кристаллы на подложке, или COB. Это бескорпусные кристаллы, которые распаяны (проводами или BGA) на подложке для межсоединений. Они отличаются следующими характеристиками:

- кристалл установлен на подложке (или на микроплате);
- кристалл приклеен к подложке при помощи токопроводящей или изоляционной эпоксидной пасты с соответствующим составом;
- кристалл электрически соединяется с подложкой разваркой траверсов;
- кристалл капсулирован защитным покрытием.

В связи с этим процесс сборки COB достаточно простой и включает три базовых шага: закрепление кристалла на подложке, разварка электрических проводов и капсулирование. Одновременно следует отметить, что разработка COB достаточно критична как к области применения кристалла, так и к компонентам поверхностного монтажа, которые также требуется установить на той же подложке.

4(527).indd 46 17.12.2015 11:26:27

3. ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

В 2003 году программа МО США DARPA (Defense Advanced Project Agency) поручила разработку первого стандарта по приобретению и распространению KGD-изделий, который теперь является индустриальным стандартом JESD 49 «Procurement Standard for Known Good Die (KGD)». К моменту написания статьи список KGD-стандартов дополнен:

- J-STD-12 «Implementation of Flip Chip and Chip Scale technology»;
- J-STD-26 «Semiconductor Design Standard for Flip Chip Applications»;
- J-STD-28 «Performance Standard for Construction of Flip Chip Scale Bumps»;
- EDR-4703 «Quality Assuarance Quuide Lines for Bare Die Including KGD»;
- ES 59008 «Data Requirements for Semiconductor Die»;
- IEC 62258 «Semiconductor Die Products: Requirements for Procurements and Use».

Все эти стандарты требуют детального ознакомления, но необходимо обратить внимание на два из них в связи с небольшим опытом в области СвК и KGD в отечественных разработках. ES 59008 «Data Requirements for Semiconductor Die» определяет, какие данные о KGD должен предоставлять производитель потребителю для принятия решения по применению выбранного KGD, а именно:

- данные по идентификации продукта и прослеживания его создания;
- технические характеристики продукта;
- конструктивные параметры кристалла;
- данные по тестированию, качеству и надежности кристалла;
- требования к условиям работы с кристаллом, его хранения и установки в сборках;
- термодинамические и электрические характеристики кристалла в различных режимах его эксплуатации и в различной окружающей среде в соответствии с техническими условиями его применения.

IEC 62258 «Semiconductor Die Products: Requirements for Procurements and Use» рассматривает вопросы поставки и применения KGD-изделий следующих типов: пластины, кристаллы, готовые к разварке, кристаллы и пластины с подсистемой межсоединений и частично капсулированные кристаллы. Стандарт определяет минимальные требования к данным, сопутствующим поставляемым KGD, а также условиям и процедурам по работе, хранению и транспортировке KGD.

4. ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ KGD

Кристаллы, применяемые в СвК, могут быть расположены как в планарном монтаже, так и в 3*D*-сборках на общей подложке. При этом высота таких сборок – весьма критический параметр конструкции СвК. При стыковке до 8…10 кристаллов современная технология позволяет получить сборку высотой порядка 1,2 мм, но требования миниатюризации уже ставят норму по высоте 0,8…1 мм. Это, в свою очередь, ставит ряд ограничений по размерам шариков пайки и петель электропроводов для распайки, а также по толщине подложки и капсулирующего покрытия. Все кристаллы производятся на пластинах толщиной около $350 \cdot 10^{-6}$ мм. Чтобы реализовать сборку из 8 кристаллов, пластина изначально утончается до $50 \cdot 10^{-6}$ мм. Для этого применяются несколько методов: механическое полирование, химико-механическое полирование, мокрое или сухое травление и плазменная обработка. После такой обработки механическая прочность пластины (и кристалла, в частности) сильно уменьшается, и при дальнейших обработках весьма вероятно появление трещин и зон с внутренними напряжениями. По этой причине тестирование и отбраковка после утончения обязательны и сфокусированы на производственных процессах для KGD.

4(527).indd 47 17.12.2015 11:26:27

В 3*D*-компоновках кристаллы могут быть одного или разных размеров. Поэтому и применяется непосредственная пирамидальная стыковка (при кристаллах разного размера) или стыковка с прокладками (interposer) при кристаллах одного размера. Точность стыковки ухудшается из-за разных коэффициентов адгезии отдельных кристаллов.

Разварка электрических соединений для KGD также отличается существенными ограничениями. Так, например, стандартный изгиб разварки имеет высоту $(150\ldots170)\cdot10^{-6}$ мм, а в случае KGD этот размер меньше $100\cdot10^{-6}$ мм.

Технология сборки KGD, хотя достаточно точно определена, требует внимательной проработки в каждом отдельном случае и является всегда проблемно ориентированной.

Тестирование KGD является частью общего тестирования СвК-изделий, что определяет и ряд особенностей при создании тестового подхода. Если тестирование и отбраковка прошли успешно на уровне пластины и/или кристалла на фабрике-производителе и соответствующие тестовые данные переданы потребителю, то тестовая технология для собираемого на базе KGD изделия должна использовать эти данные, а конструкция СвК должна быть тестопригодной с учетом ее функционально независимых блоков (KGD).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение KGD в СвК – эффективный путь к инновационным разработкам в микроэлектронике. Технология KGD используется повсеместно в космических технологиях. Многие мировые производители предлагают KGD-продукты (рис. 5).

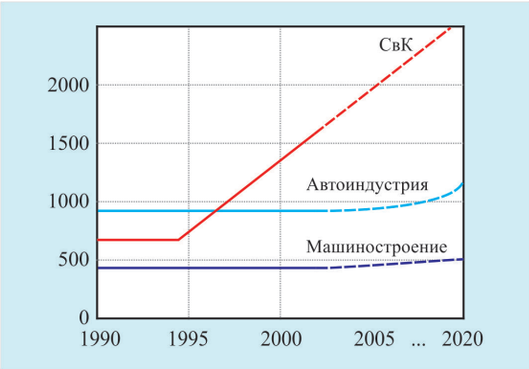


Рис. 5. Сравнительная тенденция рынка СвК в США

Требования к ним, а также к условиям их приобретения, к работе с ними, к условиям их хранения и транспортировки стандартизованы в США и Европе.

Технология их применения в СвК-изделиях достаточно хорошо апробирована, и ведущими производителями накоплен уже 25-летний опыт.

Несмотря на достаточно хорошую обусловленность задачи применения квалифицированных кристаллов в СвК, от потенциального потребителя требуется достаточного опыта и необходимого уровня коммуникаций с производителями KGD и СвК.

Таким образом, СвК является стратегической технологией для мировой и отечественной космической промышленности и полностью определяет возможности по эффективному занятию рынка микроспутниковых систем (табл. 2). Доля СвК в космических аппаратах США за 2010 г. составляет 39 % от общего объема ЭКБ, стоимость – 0,5 млрд $ [5].

4(527).indd 48 17.12.2015 11:26:27

Таблица 2

Зависимость стоимости микроспутников от степени внедрения СвК

Реализация проекта с или без СвК	50 – 100 кг	10 – 50 кг	1 – 10 кг
Условная стоимость проекта, %, без СвК	100	100	100
Условная стоимость проекта, %, с СвК до 50 %	70	60	50
Условная стоимость проекта, %, с СвК до 75 %	55	40	30
Условная стоимость проекта, %, с СвК > 85 %	45	30	25

Эта тенденция стала практикой потому, что расходы на проектирование конечных изделий удешевились на 15…20 %. Процесс проектирования сокращен по времени на 40 %. Комплектация и построение изделий на базе заведомо исправных кристаллов «Known Good Die» и типовых узлов в виде микросистем в корпусе сократила производственные расходы на 30 %. Тестирование изделий заняло не более 10 % от общего времени реализации изделий. В 2010 г. доля проектов с применением микроспутников составила 90 % от общего объема космических проектов США [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Данилин, Н. С.** Инновационные космические микросистемы в корпусе / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров // М.: Издательский дом «Спектр», 2011.

2. **Прокопьев, В. Ю.** Малые космические аппараты стандарта CUBESAT / Современные средства выведения / В. П. Прокофьев, О. Н. Кусь, А. В. Оссовский // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 2 (12) . – С.71 – 80.

3. **Филонин, О. В.** Микропроцессорная магнитно-индукционная система для запуска микро- и наноспутников на заданные орбиты / О. В. Филонин, И. В. Белоконов, З. Г. Гиранов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 1. – С. 60.

4. **Данилин, Н. С.** Применение квалифицированных полупроводниковых некорпусированных кристаллов при разработке систем в корпусе / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров // Современная электроника. – 2010. – № 3.

5. **Данилин, Н. С.** Системы в корпусе – магистральный путь развития ЭКБ для авиации, космоса, ВПК / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров // Вестник электроники. – 2009. – № 2.

6. **Данилин, Н. С.** Электронная компонентная база систем в корпусе при разработке и реализации космической бортовой аппаратуры / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров // Интеграл. – 2011. – № 1.

Статья поступила 7 сентября 2015 г.

4(527).indd 49 17.12.2015 11:26:27

УДК 621.385.6

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ КВЧ-ДИАПАЗОНА НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИОДНЫХ МИКРОСБОРКАХ

А. М. Щитов

ОАО “ФНПЦ ННИПИ «КВАРЦ» им. А.П. Горшкова”, г. Нижний Новгород

Д. И. Дюков, Ю. И. Чеченин

ОАО “НПП «Салют»”, г. Нижний Новгород

Приведены результаты экспериментального исследования характеристик широкополосных волноводных удвоителей и утроителей частоты в общем диапазоне частот от 37,5 до 170 ГГц, выполненных на новой элементной базе – монолитных интегральных диодных микросборках.

КС: удвоитель частоты, утроитель частоты, интегральная диодная микросборка, КВЧ-диапазон

The results of experimental investigation of characteristics of wideband waveguide frequency doublers and frequency triplers have been presented within the whole frequency range 37.5 – 170 GHz. They are made on a new element basis – monolithic integrated diode microassemblies.

Keywords: frequency doubler, frequency tripler, integrated diode microassembly, EHF range

1. ВВЕДЕНИЕ

Умножители частоты широко применяются для создания портативных, надежных, дешевых твердотельных источников сигналов малой и средней мощности в СВЧ- и КВЧ-диапазонах. Техника генерирования СВЧ-сигналов с использованием умножения частоты обеспечивает:

– возможность работы в частотном диапазоне до 200 ГГц и выше;

– большую широкополосность (перекрытие одним умножителем полного рабочего диапазона волновода стандартного сечения);

– достаточно большую выходную мощность источника (17 дБм до 40 ГГц; 5 дБм до 75 ГГц; 0 дБм до 110 ГГц, -10 дБм до 200 ГГц);

– низкое значение фазовых шумов;

– относительно простые технические решения по синхронизации и стабилизации частоты, стабилизации и регулировке уровня выходной мощности, реализации режимов амплитудной и частотной модуляции.

Расширение диапазона частот и повышение выходной мощности (на что направлена данная работа) позволит использовать умножители не только в качестве формирователей зондирующих сигналов различной радиоэлектронной аппаратуры, но и в качестве широкополосных гетеродинов высокочувствительных приёмных устройств.

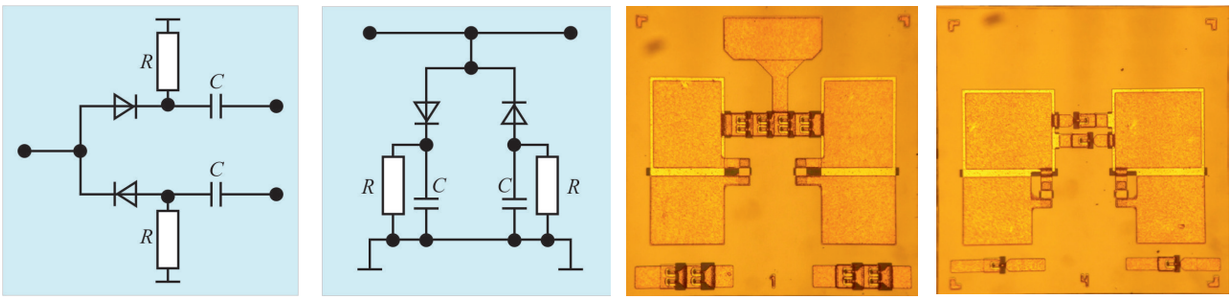
До настоящего времени широкополосные умножители частоты в нашей стране выполнялись на дискретных элементах – ДБШ, конденсаторах, резисторах [1 – 3]. Сравнительно большие паразитные параметры элементов и монтажа, а также малая допустимая мощность рассеяния бескорпусных ДБШ не позволяют получить выходную мощность более 1 мВт в диапазоне частот 78...118 ГГц и более 0,1 мВт в диапазоне частот 118...178 ГГц. Переход на монолитное исполнение с использованием диодных микросборок, исключающих паразитные параметры,

4(527).indd 50 17.12.2015 11:26:27

обеспечит качественный скачок в улучшении характеристик умножителей и существенно снизит трудоёмкость изготовления.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИОДНЫХ МИКРОСБОРОК

В ОАО «НПП «Салют» (г. Нижний Новгород) разработаны конструкции различных типов (всего 8 типов) микросборок на смесительных и умножительных диодах для встраивания их в волноводные балансные удвоители и утроители частоты. Каждая из микросборок включает в себя по два диода, два конденсатора и два резистора. Принципиальные схемы микросборок и их внешний вид приведены на рис. 1.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 1. Принципиальные схемы удвоителя (*а*) и утроителя частоты (*б*); внешний вид микросборок – удвоителя многодиодного (*в*) и утроителя двухдиодного (*г*)

Габаритные размеры кристаллов микросборок: 0,6×0,6×0,1 мм. Электрические параметры элементов, входящих в состав микросборок, приведены в таблице.

Наименование параметра, единица измерения, режим измерения	Буквенное обозначение	Норма			
		не менее	не более	не менее	не более
		Умножительный диод		**Смесительный диод**	
Ёмкость перехода одного диода ($U_{обр}$ = 0), пФ	C_j (0)	0,06	0,10	–	0,007
Последовательное сопротивление потерь ($I_{пр}$ = 10 мА), Ом	R_s	–	10,0	–	10,0
Постоянное обратное напряжение ($I_{пр}$ = 5 мкА), В	$U_{обр}$	8,0	–	5,0	–
Показатель идеальности ВАХ, ед.	n	–	–	–	1,2
Коэффициент перекрытия ёмкости ($U_{обр}$ = 0; - 6 В)	K_c	4,0	–	–	–
Неидентичность диодов по ВАХ, В	ΔU	–	0,01	–	0,01
Неидентичность диодов по ВФХ, пФ	ΔC	–	0,004	–	0,002
		Конденсатор		**Резистор**	
Ёмкость, пФ	C	5,0	10,0	–	–
Сопротивление, Ом	R	–	–	45,0	55,0
Неидентичность, %	ΔC, ΔR	–	10,0	–	10,0

4(527).indd 51 17.12.2015 11:26:28

Каждая из микросборок разработана и в варианте с увеличенным количеством диодов (четыре вместо двух) для повышения уровня допустимой входной мощности.

Кристаллы микросборок изготавливались на полупроводниковых структурах арсенида галлия собственного производства. Эпитаксиальные структуры характеризуются следующими электрофизическими параметрами:

– низкоомный n^+-слой толщиной 1…2 мкм;

– рабочий n-слой толщиной 0,1 мкм с концентрацией носителей $1{,}5\cdot10^{17}$ см$^{-3}$ для микросборок на смесительных диодах;

– рабочий n_1–n_2-слой толщиной 0,5 мкм с концентрацией носителей $3\cdot10^{17}$ см$^{-3}$/ $3\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ для микросборок на умножительных диодах.

Технологический процесс изготовления микросборок повторяет процесс изготовления диодов с барьером Шотки. Отличие состоит в том, что перед формированием второго уровня металлизации производится изготовление резисторов и диэлектрического слоя конденсаторов.

Омические контакты диодов, нижние обкладки конденсаторов и контактные площадки микросборок (первый уровень металлизации) формируются с помощью металлической системы золото-германий-золото, напыляемой термическим испарением в вакууме, с последующим вплавлением при температуре 400 °С.

В качестве диэлектрика конденсатора используется пленка нитрида кремния (Si_3N_4), получаемая плазмохимическим осаждением, толщиной 0,25 мкм. Такая толщина диэлектрика позволяет получать удельную емкость 200 пФ/мм^2 и емкость конденсаторов 5…6 пФ.

Для изготовления резисторов используется пленка, получаемая магнетронным распылением в вакууме силицида вольфрама номиналом 50 Ом/□.

Барьерный контакт диодов и второй уровень металлизации формируются с помощью фотолитографии и напыления металлической системы титан-золото с последующим гальваническим осаждением золота толщиной 2 мкм.

Соединение конденсаторов с землей осуществляется с помощью металлизированных сквозных отверстий с обратной стороны кристаллов. В качестве металлизации обратной стороны используется химникель и гальваническое золото толщиной 3 мкм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Микросборки устанавливались и обмерялись в различных конструкциях удвоителей и утроителей частоты в общем диапазоне частот от 37,5 до 180 ГГц.

3.1. Удвоитель частоты диапазона 37,5...53,57 ГГц

Эскиз конструкции удвоителя показан на рис. 2, внешний вид – на рис. 3.

Удвоитель выполнен на плате, помещённой в волноводный канал прямоугольного сечения 5,2×2,6 мм. Микросборка включена между комбинациями двух линий передачи: входной – копланарного волновода и выходной – щелевой, плавно расширяющейся к выходу до размера узкой стенки волновода 2,6 мм. На расстоянии $\lambda_{ср.\ вых}/4$ от микросборки со стороны входа установлена перемычка из фольги. На входе и выходе могут устанавливаться регулировочные пластины, металлизированные с верхней стороны. Вход удвоителя – коаксиально-полосковый переход, выход – волновод 5,2×2,6 мм.

4(527).indd 52 17.12.2015 11:26:28

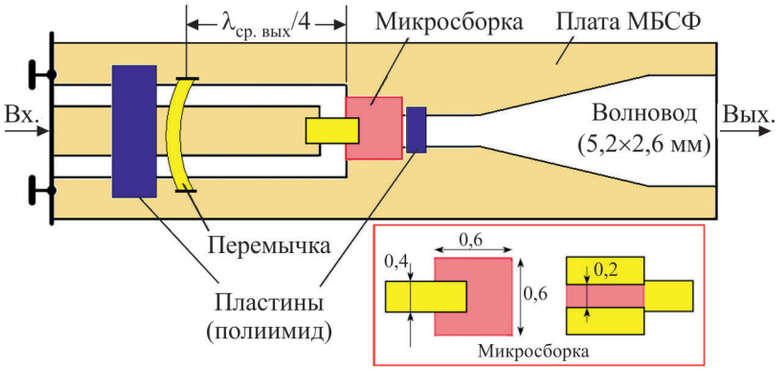


Рис. 2. Эскиз удвоителя частоты 37,5...53,57 ГГц

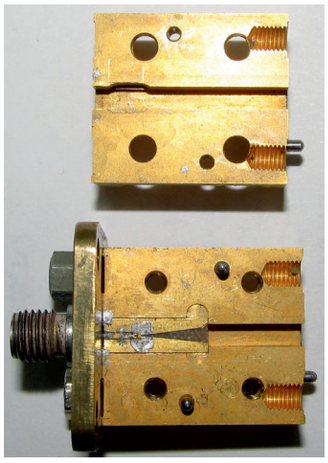


Рис. 3. Внешний вид удвоителя частоты 37,5...53,57 ГГц

На рис. 4 приведены результаты измерения выходной мощности удвоителя частоты, выполненного на двухдиодной микросборке с умножительными диодами, при различных значениях уровня входной мощности. Там же даны значения выходной мощности удвоителей, выполненных на дискретных элементах (диодах A92220-3) и на четырёхдиодной микросборке с умножительными диодами, при входной мощности 100 мВт. Сравнение характеристик показывает, что умножитель на двухдиодной микросборке при $P_{вх}$ = 100 мВт обеспечивает выходную мощность на ~3 дБ больше, чем умножитель на четырёхдиодной микросборке, и чуть больше, чем умножитель на дискретных элементах. Очевидно, преимущество четырёхдиодной микросборки может проявиться при существенно большем уровне входного сигнала (около 200...300 мВт).

Измерения показали, что удвоитель на двухдиодной микросборке благодаря высокой степени идентичности диодов имеет значительное подавление паразитных составляющих в спектре выходного сигнала: первая гармоника входного сигнала подавлена на 40 дБс, третья – на 30 дБс и четвёртая – на 35 дБс.

Исследование умножителей на микросборках со смесительными диодами показало, что для данного диапазона частот они менее эффективны (потери преобразования выше на 3...5 дБ) по сравнению с микросборками на умножительных диодах.

4(527).indd 53 17.12.2015 11:26:28

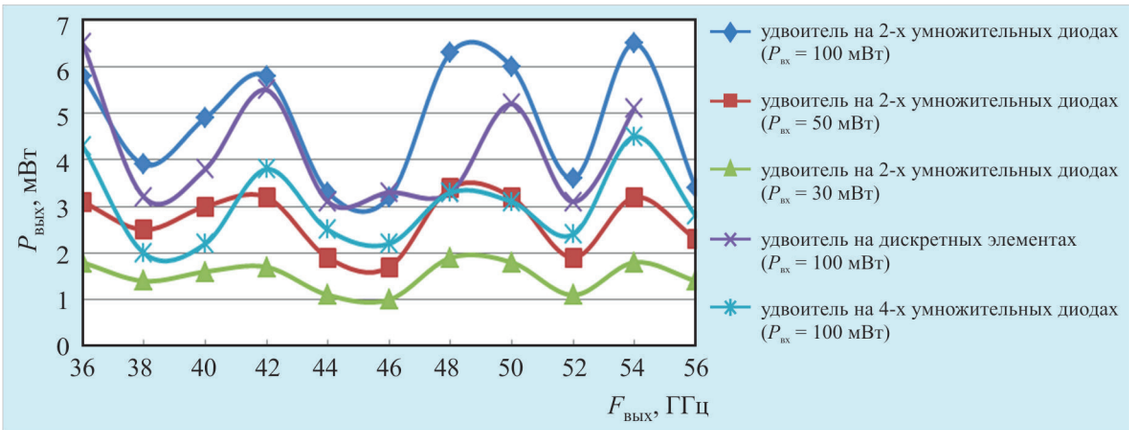


Рис. 4. Уровень выходной мощности удвоителя частоты 37,5...53,57 ГГц

3.2. Удвоитель частоты диапазона 50...75 ГГц

Конструкция удвоителя частоты 50…75 ГГц аналогична конструкции удвоителя 37,5...53,57 ГГц (рис. 2) за исключением уменьшенного сечения волноводного канала (3,6×1,8 мм) и замены входного коаксиально-полоскового перехода на волноводно-полосковый.

Результаты измерения выходной мощности удвоителя частоты на двухдиодной микросборке с умножительными диодами при $P_{вх}$ = 100 мВт приведены на рис. 5. Там же показана выходная мощность удвоителя на диодах А92220-2.

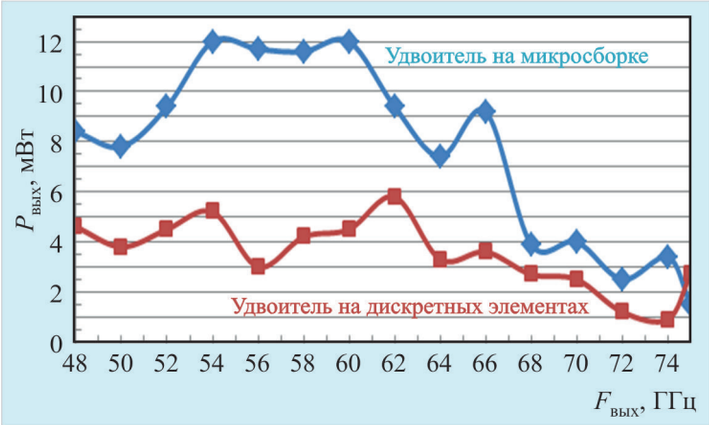


Рис. 5. Уровень выходной мощности удвоителя частоты 50...75 ГГц ($P_{вх}$ = 100 мВт)

Сравнение результатов измерений показывает, что в большей части рабочего диапазона выходная мощность удвоителя частоты на микросборке на 3...5 дБ больше по сравнению с $P_{вых}$ удвоителя на дискретных элементах. Исследование удвоителя частоты 50...75 ГГц с другими типами микросборок дало следующий результат:

– эффективность преобразования с четырёхдиодной микросборкой на умножительных диодах близка к эффективности удвоителя на дискретных элементах;

– удвоитель на микросборках со смесительными диодами (2- и 4-диодных) имеет существенно большие (на 5...7 дБ) потери преобразования.

4(527).indd 54 17.12.2015 11:26:29

Измерения подавления паразитных гармоник в спектре выходного сигнала для удвоителя на двухдиодной умножительной микросборке показывают: первая гармоника входного сигнала подавлена на 30...50 дБ, третья – на 35...50 и четвёртая – на 30...40 дБ, что на 10...15 дБ лучше по сравнению с удвоителем на дискретных элементах.

3.3. Утроитель частоты диапазона 75...110 ГГц

Эскиз конструкции утроителя показан на рис. 6, внешний вид – на рис. 7.

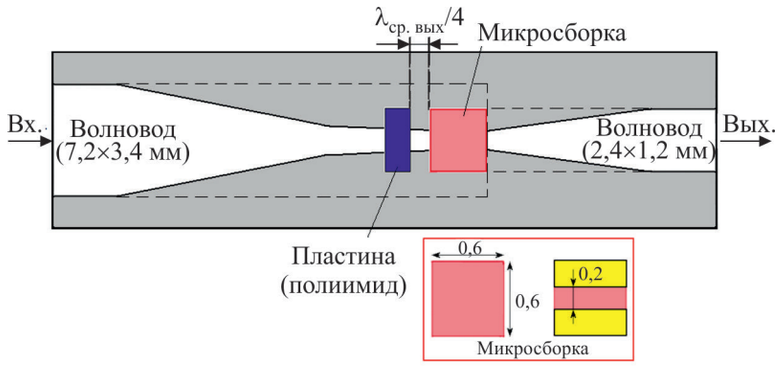


Рис. 6. Эскиз утроителя частоты 75...110 ГГц

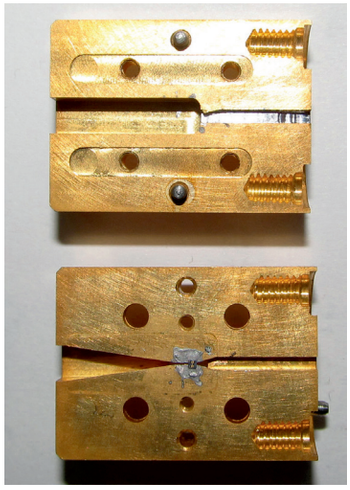


Рис. 7. Внешний вид утроителя частоты 75...110 ГГц

Утроитель выполнен в виде двух последовательно соединённых прямоугольных волноводов различных сечений: входного (7,2×3,4 мм) и выходного (2,4×1,2 мм). В разрезе по центру широкой стенки волноводов вставлена металлическая пластина толщиной 0,2 мм, образующая Н-образный волновод. Сечение выходного волновода на начальном участке заужено до 2,1×1,2 мм для того, чтобы сделать его запредельным для диапазона частот второй гармоники входного сигнала. Микросборка устанавливается в месте соединения волноводов различного сечения. Со стороны входа на расстоянии $\lambda_{ср.\ вых}/4$ устанавливается пластина из полиимида с односторонней металлизацией, выполняющая роль согласующего элемента и короткозамыкателя для 3-й гармоники (выходного сигнала).

4(527).indd 55 17.12.2015 11:26:29

На рис. 8 приведены результаты измерения выходной мощности утроителя на двухдиодной микросборке с умножительными диодами в сравнении с типичными значениями $P_{вых}$ умножителей на дискретных элементах с диодами А92220-2 при $P_{вх}$ = 100 мВт.

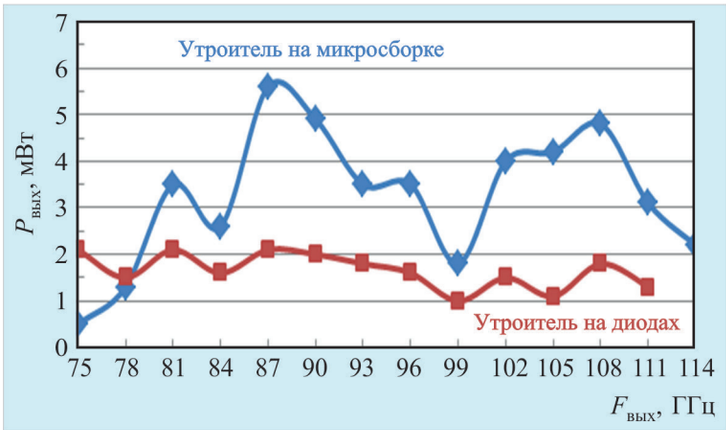


Рис. 8. Уровень выходной мощности утроителя частоты 75...110 ГГц ($P_{вх}$ = 100 мВт)

Результаты измерений показывают, что эффективность утроителя на микросборке в большей части рабочего диапазона частот существенно (приблизительно на 3 дБ) выше, чем утроителя на диодах А92220-2.

Измерения выходной мощности утроителей на микросборках со смесительными диодами дали результат на 3...5 дБ хуже по сравнению с микросборками на умножительных диодах.

3.4. Утроитель частоты диапазона 118...178 ГГц

Конструкция утроителя 118...178 ГГц аналогична конструкции утроителя 75...110 ГГц (см. рис. 6) с учётом заужения входного волноводного канала до 3,6×1,8 мм и выходного до 1,6×0,8 мм.

Результаты измерения выходной мощности утроителей с 2- и 4-диодными микросборками на смесительных диодах при $P_{вх}$ ≈ 30...40 мВт представлены на рис. 9.

Рис. 9. Уровень выходной мощности утроителя частоты 118...178 ГГц ($P_{вх}$ ≈ 30...40 мВт)

4(527).indd 56 17.12.2015 11:26:29

Как видно из рисунка, эффективность утроителей на микросборках и диодах А91147-1 примерно одинакова. Однако микросборки выдерживают значительно большую входную мощность и в перспективе будут иметь преимущество перед диодами.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные монолитные интегральные диодные микросборки для умножения частоты являются новой элементной базой для устройств КВЧ-диапазона. Они позволяют повысить выходную мощность умножителей и существенно снизить трудоёмкость монтажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Щитов, А. М.** Широкополосные умножители частоты миллиметрового диапазона (26,5...110 ГГц) / А. М. Щитов, А. Е. Серебряков // Вестник ВВО АТН РФ, серия Высокие технологии в радиоэлектронике. – 1997. – № 1 (3). – С. 91 – 96.

2. **Щитов, А. М.** Диодные умножители частоты / А. М. Щитов // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. – 2002. – № 1/2 – С. 45 – 51.

3. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства // Каталог ННИПИ «Кварц». – Н. Новгород, 2010.

Статья поступила 11 сентября 2015 г.

УДК 621.375.029.64

ГИБРИДНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МАЛОГАБАРИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов, И. П. Корчагин, А. Г. Далингер, Л. В. Манченко, В. А. Красник, В. М. Малыщик

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Представлены результаты разработок малогабаритных СВЧ-усилителей мощности (УМ) в гибридно-интегральном исполнении, обеспечивающих выходную мощность от 3 до 20 Вт, с применением элементов, имеющих высокую диэлектрическую проницаемость. Размеры УМ приемлемы для использования их в АФАР *L*-, *S*-, *C*-, *X*- и *Ku*-диапазонов. Комплектация УМ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина».

КС: СВЧ-усилители мощности, АФАР, гетероструктурные GaAs-транзисторы

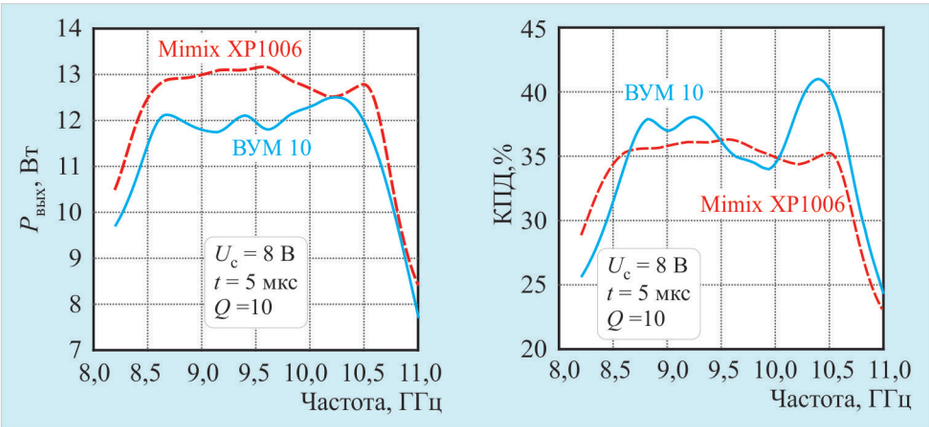
The results of investigations of small-size hybrid integrated microwave power amplifiers (PA) providing output power from 3 to 20 W using the elements with high dielectric permittivity have been presented. PA sizes are acceptable to be used in active phased arrays of *L*-, *S*-, *C*-, *X*- and *Ku*-ranges. PA kitting is produced by of JSC “RPC “Istok” named after Shokin”.

Keywords: microwave power amplifiers, active phased array, heterostructural GaAs-transistors

В приёмопередающих модулях АФАР, выходных каналах аппаратуры специального назначения широко используются мощные СВЧ МИС, обеспечивающие высокие электрические

4(527).indd 57 17.12.2015 11:26:29

характеристики (выходную мощность, КПД, полосу рабочих частот), имея при этом малые габаритные размеры. Однако разработка МИС экономически оправдана в случае массового выпуска. Следует отметить, что к настоящему времени МИС отечественного производства с необходимыми электрическими параметрами нет. Альтернативным решением может служить разработка гибридно-интегральных (ГИС) усилителей мощности (УМ), в которых для согласования СВЧ-транзисторов применены элементы с высокой диэлектрической проницаемостью. УМ дешевле в разработке и изготовлении, так как применяется хорошо отработанная технология ГИС. Для согласования кристаллов транзисторов при этом используется керамика с высокой диэлектрической проницаемостью. УМ уступают МИС по габаритным размерам (в основном на 30 % по продольному размеру, что, в ряде случаев, не является критичным), однако сравнимы по электрическим параметрам. В качестве примера на рис. 1 показаны характеристики МИС XP10006 и УМ *X*-диапазона.



а) *б*)

Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики (*а*) и коэффициент полезного действия (*б*) МИС и УМ

В статье представлен обзор результатов разработок малогабаритных УМ в ГИС-исполнении с выходной импульсной мощностью от 3 до 20 Вт и КПД не менее 25 %, в которых применён принцип согласования СВЧ-транзисторов с использованием керамики, имеющей высокий ε_r. Материал керамики – композиция из бария, самария и титана.

В УМ применены гетероструктурные GaAs-транзисторы типа «Принц» (табл. 1) с различной шириной затвора и, следовательно, выходной мощностью, выпускаемые в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Специфика подобных транзисторов состоит в том, что традиционные согласующие цепи на распределённых МПЛ-элементах не работают из-за чрезвычайно малых входного и выходного импедансов кристалла, в связи с этим согласовываются отдельные секции кристалла и мощность секций суммируется в нагрузке.

Первоначально был разработан ряд внутрисогласованных транзисторов (ВСТ) *S*-, *C*-, *X*-, *Ku*-диапазонов с выходной мощностью 5…10 Вт (табл. 2) [1]. ВСТ представляет собой транзистор, соединённый с цепями деления и суммирования мощности отдельных его секций, согласованный по входу и выходу с 50-омной линией и заключённый в герметичный металлокерамический корпус. В качестве согласующего элемента был выбран отрезок передающей линии толщиной 250 мкм с высокой ε_r (рис. 2).

4(527).indd 58 17.12.2015 11:26:30

Таблица 1

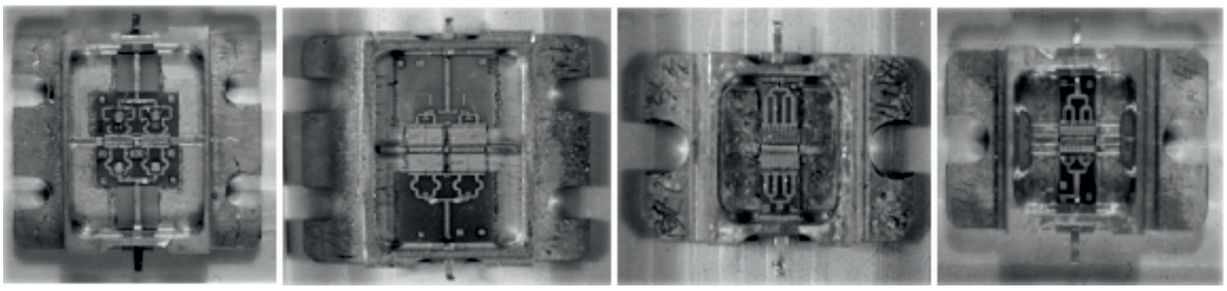
Параметры гетероструктурных GaAs-транзисторов «Принц»

Наименование транзистора	Ширина затвора, мм	$P_{вых}$, Вт	КПД, %
Принц 2-70	3,36	3,0	45
Принц 4-50	4,8	4,0	45
Принц 4-70	6,72	6	45
Принц 4-105	10,6	8	45

Таблица 2

Параметры внутрисогласованных транзисторов

Диапазон рабочих частот, ГГц	2,7 – 3,0	5,9 – 6,4	9,0 – 9,5	14,1 – 14,5
$P_{вых\ max}$, Вт, не менее	10	6-8	5	5
$K_у$, дБ, не менее	8	7	6	5
КПД, %, не менее	25	22	20	18
$U_с$, В	7 – 8	7 – 8	7 – 8	7 – 8
$I_с$, А	4,0 – 4,8	4,0 – 4,8	2,0 – 2,4	2,07 – 2,4



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2. Внутрисогласованные транзисторы:
а – *S*-диапазон, $P_{вых}$ = 10 Вт; *б* – *C*-диапазон, $P_{вых}$ = 8 Вт; *в* – *X*-диапазон, $P_{вых}$ = 5 Вт;
г – *Ku*-диапазон, $P_{вых}$ = 5 Вт

Для частоты 2,7…3,0 ГГц с целью уменьшения размеров ВСТ согласование проводилось с помощью сосредоточенных элементов (чип-конденсаторов), при этом в расчёте учитывались паразитные элементы монтажа как секций транзистора, так и чип-конденсаторов. Необходимо отметить, что такое согласование возможно только для частот до 4,0 ГГц, на более высоких частотах начинают сильно влиять паразитные индуктивности монтажа.

С учётом накопленного опыта были разработаны герметичные корпусированные УМ для АФАР *X*-диапазона с выходной мощностью не менее 3 и 10 Вт соответственно. По существу, это – конструкция ВСТ с добавлением цепей питания. Поперечные размеры УМ не превышают 12 мм (рис. 3 и 4), что позволило уложиться в шаг решётки антенны.

4(527).indd 59 17.12.2015 11:26:30

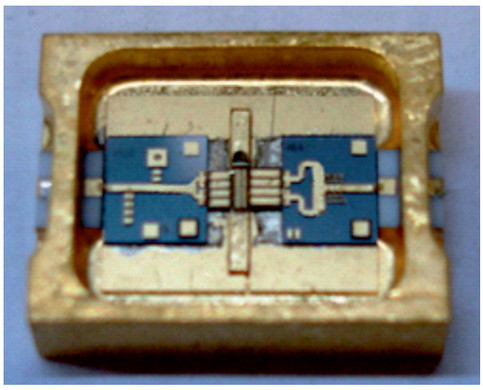


Рис. 3. 3-ваттный субмодуль *X*-диапазона

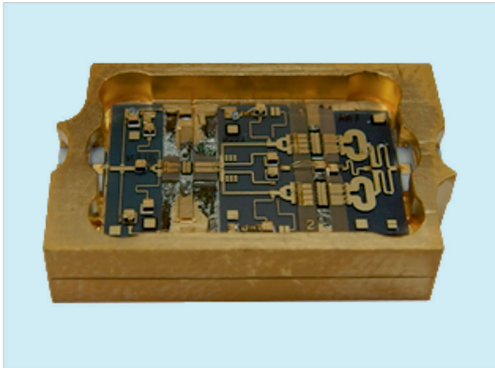


Рис. 4. 10-ваттный субмодуль *X*-диапазона

При создании 3-ваттного субмодуля применялся кристалл «Принц 4-50» с периферией 4,8 мм. К настоящему времени поставлено заказчику более 15 000 субмодулей, КПД субмодуля превышает 30 %. В 10-ваттном УМ применена двухкаскадная схема с использованием во входном каскаде кристаллов «Принц 2-70» с шириной затвора 3,36 мм, в выходном – суммируется мощность двух кристаллов «Принц 4-105» с шириной затвора 10,6 мм. К настоящему времени поставлено заказчику более 7000 субмодулей.

Был еще создан УМ *X*-диапазона с $P_{вых}$ = 17…21 Вт в 10%-ной полосе частот и КПД 25…30 %. Усилитель двухкаскадный, в первом каскаде используется один гетероструктурный транзистор «Принц 4-70» с шириной затвора 6,7 мм, во втором суммируется мощность четырех таких транзисторов (рис. 5). Габаритные размеры УМ: 11×25×3,5 мм. Всего выпущено более 400 образцов.

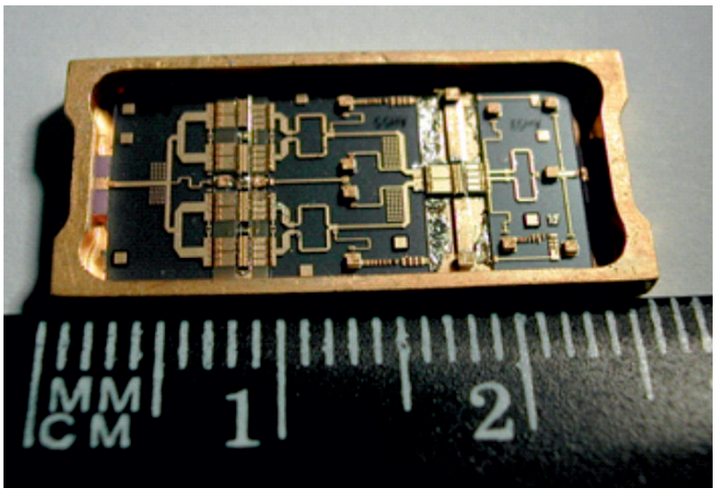


Рис. 5. 17…21-ваттный УМ *X*-диапазона для АФАР

Также на нашем предприятии был разработан ВСТ для АФАР *X*-диапазона с $P_{вых}$ ≥ 12 Вт. Всего выпущено более 600 ППМ (рис. 6).

Транзисторы «Принц-4-70» с шириной затвора 6,72 мм нашли применение в выходных каскадах импульсного усилителя мощности, обеспечивающего $P_{вых}$ ≥ 8 Вт в диапазоне частот

4(527).indd 60 17.12.2015 11:26:30

15,9…16,4 ГГц. Топологии предвыходного и выходного каскадов усилителя показаны на рис. 7. В настоящее время проводится серийная поставка усилителей заказчику.

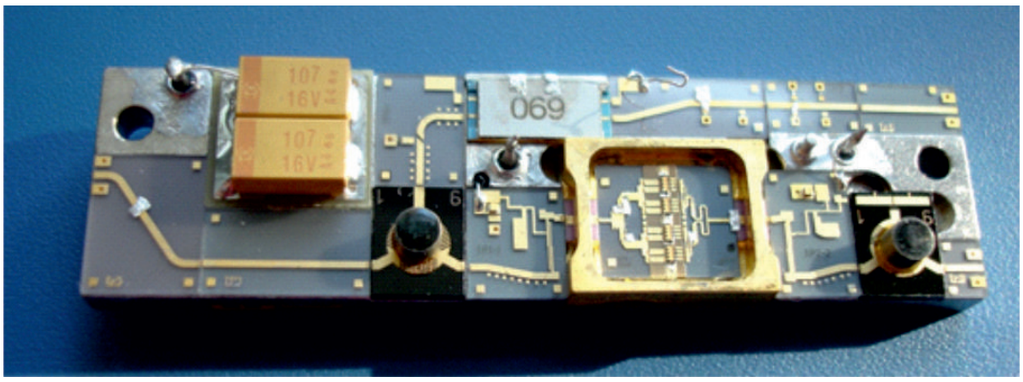
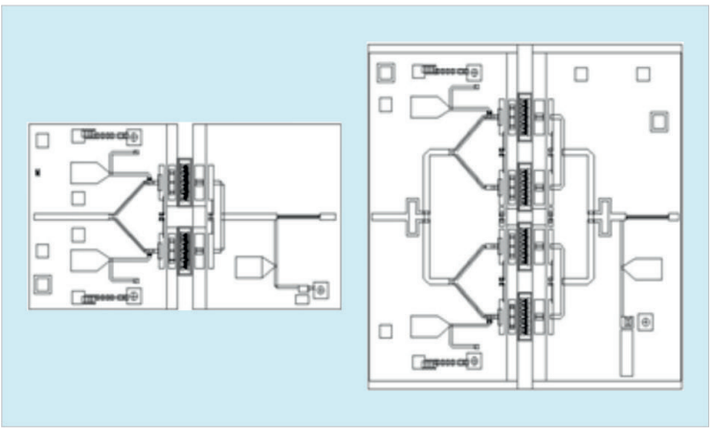


Рис. 6. 12-ваттный субмодуль *X*-диапазона для АФАР



а) *б*)

Рис. 7. Предвыходной (*а*) и выходной (*б*) каскады *Ku*-диапазона

Полученный опыт разработки усилителей с использованием элементов, имеющих высокую диэлектрическую проницаемость, позволил в 2014 году создать четырехканальный усилитель *X*-диапазона, обеспечивающий выходную импульсную мощность каждого канала не менее 13,5…16,0 Вт и коэффициент усиления не менее 20 дБ, суммарная импульсная мощность усилителя – не менее 56 Вт, потребляемый импульсный ток – 32 А (рис. 8). Габаритные размеры усилителя: 75×87×20 мм.

Определение электрических характеристик транзисторов с большой шириной затвора (типа «Принц 4»), работающих в режиме большого сигнала, представляет сложную задачу, поэтому проводилось тщательное обследование одной секции транзистора в специальной микрополосковой схеме [3]. На основе полученных результатов измерений одной секции создавались модель большого сигнала полного транзистора и топология всего усилителя.

В настоящее время получение нелинейных электрических характеристик транзисторов «Принц-4» проводится с использованием установки измерения *X*-параметров PNA-X, что повышает точность определения модели транзистора, работающего в режиме большого сигнала.

4(527).indd 61 17.12.2015 11:26:31

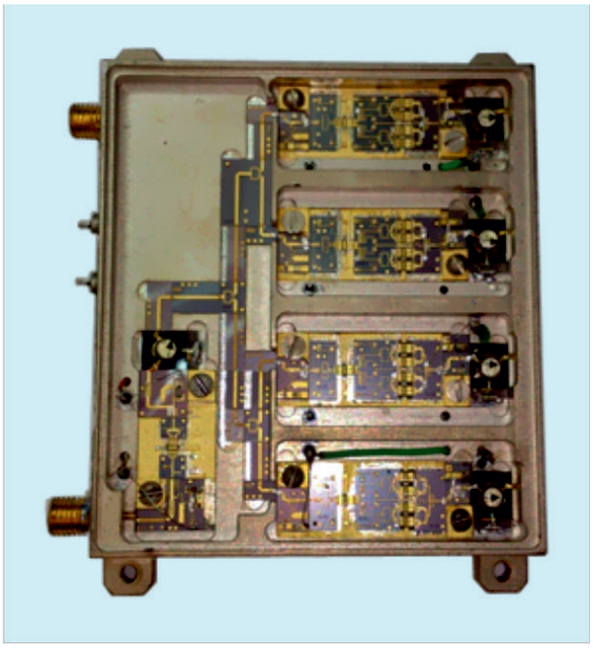


Рис. 8. Внешний вид
четырехканального усилителя мощности *X*-диапазона

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование керамики, имеющей высокую диэлектрическую проницаемость, для согласования транзисторов с большой шириной затвора позволило создать гибридно-интегральные УМ, конкурирующие, в ряде случаев, с усилителями на МИС как по электрическим параметрам, так и по габаритным размерам. Электрические характеристики представленных изделий соответствуют современному мировому уровню для усилителей на GaAs-транзисторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Королёв, А. Н.** Ряд внутрисогласованных транзисторов высокой мощности 10-, 5-, 3-, 2-см диапазона длин волн ФГУП «НПП «Исток»/ А. Н. Королёв, А. В. Климова, В. А. Красник, Л. В. Ляпин, В. М. Малыщик, Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов // 16-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо`2006). Севастополь, 11-15 сентября 2006: материалы конференции. – Севастополь: «Вебер», 2006. – С. 167 – 168.

2. **Бабинцев, Д. В.** Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона / Д. В. Бабинцев, А. Н. Королёв, В. А. Красник, А. В. Климова, В. Г. Лапин, В. М. Малыщик, Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов, В. Ю. Язан // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 41 – 42.

3. **Галдецкий, А. В.** Моделирование согласующих цепей мощных полевых транзисторов на керамике с высокой диэлектрической проницаемостью / А. В. Галдецкий, А. В. Климова, Л. В. Манченко, А. Б. Пашковский, В. А. Пчелин, Р. А. Силин, И. П. Чепурных // 16-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо`2006). Севастополь, 11-15 сентября 2006: материалы конференции. – Севастополь: «Вебер», 2006. – С. 169 – 170.

Статья поступила 29 сентября 2015 г.

4(527).indd 62 17.12.2015 11:26:31

УДК 621.3.049.77

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИС ВЫХОДНОГО КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин, В. Б. Трегубов, Ю. И. Молдованов, А. М. Коцюба, Д. С. Гринберг

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Получена ГИС выходного каскада усилителя мощности модернизированной конструкции (с улучшенными на 30 % массогабаритными характеристиками). Разработанная технология позволяет наладить серийное производство новых усилителей.

КС: характеристика, ГИС, выходной каскад, усилитель мощности, СВЧ-диапазон, технология

HIC output stage of power amplifier modernized design (with 30 % improved weight-dimension characteristics) has been obtained. The developed technology allows to arrange serial production of new amplifiers.

Keywords: characteristic, HIC, output stage, power amplifier, microwave range, technology

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в бортовой РЭА радиоэлектронного противодействия (РЭП) широко применяются модули усилителей мощности (УМ). Причём в этих системах используется несколько десятков таких модулей, поэтому актуальным по-прежнему остаётся снижение их массы и габаритов. Отечественные модули УМ выполняются по гибридно-интегральной технологии с использованием бескорпусных кристаллов отечественных транзисторов. Однако отечественная полупроводниковая промышленность существенно отстаёт от зарубежных производителей в области разработки и производства мощных транзисторов СВЧ-диапазона.

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Специфика применения транзисторов для аппаратуры специального назначения не позволяет использовать покупные зарубежные комплектующие компоненты. В связи с этим интерес представляет разработка специалистов НПП «Исток» по созданию составных двухкристальных ПТШ и использование их в гибридно-интегральных схемах (ГИС) усилительных каскадов УМ. Применение таких транзисторов с интегральным теплоотводом в выходном каскаде УМ позволяет за счёт двухъярусного расположения кристаллов транзисторов и суммирования их мощности существенно улучшить массогабаритные характеристики модулей УМ.

Результаты анализа предшествующих разработок позволили сделать некоторые выводы и выбрать те конструктивно-технологические решения, которые наиболее подходят для применения в СВЧ-диапазоне. Таковыми являются:

– применение плоских балочных выводов в составе выводных рамок для подключения кристаллов полупроводниковых приборов;

4(527).indd 63 17.12.2015 11:26:31

– расположение кристаллов полупроводниковых приборов один над другим лицевыми сторонами (на которых расположены контактные площадки) друг к другу;

– соединение однофункциональных выводов кристаллов полупроводниковых приборов между собой и с топологическим рисунком металлизации платы;

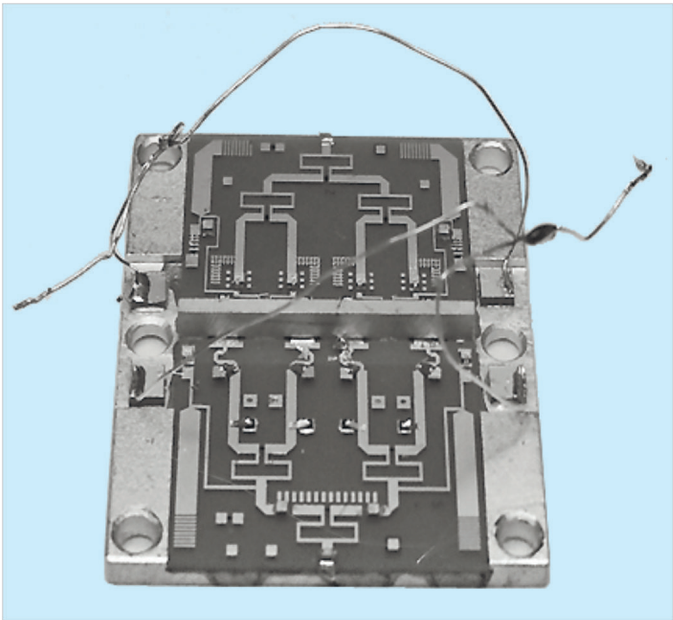
– размещение одних (нижних) полупроводниковых приборов в углублениях, выполненных в поверхности выступа металлического основания;

– применение дополнительного интегрального теплоотвода для размещения в его углублениях кристаллов других полупроводниковых приборов;

– осуществление интенсивного теплоотвода от кристаллов полупроводниковых приборов за счёт выступа металлического основания и дополнительного теплоотвода.

В результате конструкторско-технологического синтеза с учетом всех необходимых (приведенных выше) требований разработана конструкция мощной ГИС СВЧ-диапазона [1]. Преимуществом разработанной мощной ГИС СВЧ является одновременное улучшение электрических характеристик за счёт сокращения длины внутрисхемных соединений и улучшение теплоотвода от кристаллов транзисторов.

Разработанная конструкция ГИС (рисунок) позволяет суммировать мощность 8 кристаллов ПТШ. Применение отечественных транзисторов, выпускаемых на НПП «Исток», позволяет использовать ГИС в модулях УМ для РЭА специального назначения.



Выходной каскад ГИС модернизированного УМ

Применение золотых плоских балочных выводов повышает технологичность конструкции ГИС и улучшает её электрические характеристики.

В результате проведённого анализа и применения новой концепции сложения мощности кристаллов ПТШ в ГИС разработана новая конструкция УМ СВЧ-диапазона, которая за счёт более плотной компоновки путём двухъярусного расположения кристаллов [2] обеспечила уменьшение массы и объёма ГИС выходного полукаскада модуля УМ.

4(527).indd 64 17.12.2015 11:26:31

Разработанный УМ является модернизацией серийно выпускаемого усилителя производства НПП «Исток».

Модуль представляет собой металлический корпус, в который помещены ГИС усилительных каскадов. Каждый каскад смонтирован на отдельном основании из сплава МД-50. Корпус имеет коаксиальные вход и выход СВЧ-сигнала, а также коаксиальные фильтры питания. Микрополосковый вход ГИС входного каскада усилителя соединен с коаксиальным входом модуля, а её выход с входом промежуточного каскада. Выход ГИС промежуточного каскада соединен с входом ГИС направленного делителя мощности (мост Ланге), в котором сигнал делится на две равные части и поступает в выходной каскад. Выходной каскад состоит из двух ГИС полукаскадов, входы которых присоединены к выходам моста Ланге; усилительными элементами в этих полукаскадах являются транзисторы 3П976А-5 («Пират-40») (по 4 штуки на каждый полукаскад). Модуль герметизирован и заполнен аргоном.

Модернизированная версия УМ имеет аналогичную конструкцию входного и промежуточного каскадов, однако в связи с тем, что в выходном каскаде используется двухъярусное расположение кристаллов ПТШ, применяется лишь один полукаскад. Это также позволяет исключить из схемы плату с делителями мощности на мостах Ланге.

Выходной каскад разработан с применением двухъярусного расположения кристаллов ПТШ (составных двухкристальных ПТШ с балочными выводами) и имеет дополнительный интегральный теплоотвод для лучшего отвода выделяемого кристаллами тепла.

Применение разработанной мощной ГИС СВЧ в УМ СВЧ-диапазона позволяет либо увеличить мощность в два раза за счет удвоения числа транзисторов, либо существенно (на 30 %) уменьшить массогабаритные характеристики при сохранении неизменной мощности усилителя.

Условием стабильной работы ГИС является примерное равенство условий работы транзисторов, именно по этой причине стараются подбирать транзисторы с одинаковыми характеристиками. Для этого используют обычно кристаллы транзисторов, изготавливаемые на одной эпитаксиальной структуре, в одном технологическом цикле. Однако, в связи с особенностями конструкции ГИС, транзисторы находятся в разных тепловых условиях. Работоспособность конструкции тем выше, чем меньше перегрев верхнего транзистора относительно нижнего. Поэтому содержанием работы являлся расчёт температурных полей этой конструкции, нахождение максимальных температур обоих транзисторов и определение условий минимизации разности их температур [3]. Исследовалось влияние геометрических размеров и материала дополнительного теплоотвода в широком диапазоне коэффициента теплопроводности λ (от 0,1 до 2 Вт/(м·К)) на величину перегрева верхних кристаллов транзисторов относительно нижних.

Поле температур рассчитывалось с помощью трёхмерной программы, реализующей решение дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием итерационной схемы Ньютона-Раффсона.

Обработка результатов, полученных по трехмерной программе, проводилась с помощью программы «IGNAT» «Интерполяция полиномами» (автор Чепурных И.П.).

В результате проведённых исследований установлено, что увеличение горизонтального расстояния между парами транзисторов способствует понижению максимальной температуры верхних кристаллов транзисторов, так как уменьшается влияние температурных полей соседних пар транзисторов. Сильнее температура зависит от материала верхней скобы (интегрального теплоотвода): чем больше его коэффициент теплопроводности, тем меньше разогреваются кристаллы. Причём чем меньше λ, тем сильнее это влияние.

4(527).indd 65 17.12.2015 11:26:31

Также установлено, что увеличение горизонтального расстояния между транзисторами способствует понижению температуры нижних кристаллов транзисторов, так как уменьшается влияние температурных полей соседних пар транзисторов. Изменение материала дополнительного теплоотвода (т. е. изменение коэффициента теплопроводности λ) оказывает более слабое влияние на нижние транзисторы, которые расположены в углублениях на выступе основания из МД-50. Полученные результаты подтвердили эффективность применения единого интегрального теплоотвода, поскольку помимо снижения трудоёмкости сборки ГИС он позволяет эффективно выравнивать температуру кристаллов транзисторов и тем самым обеспечивает одинаковый режим их работы.

Применение дополнительного теплоотвода в конструкции мощной ГИС СВЧ открывает дополнительные возможности для улучшения электрических, тепловых и массогабаритных характеристик. Предложена методика расчета эффективности теплоотвода от кристаллов транзисторов при их двухъярусном расположении. Данная методика позволила оптимизировать геометрические размеры дополнительного теплоотвода в зависимости от теплопроводности применяемого материала и мощности используемых транзисторов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе экспериментальной работы были изготовлены опытные образцы ГИС выходного полукаскада (см. рисунок) и опробованы в качестве выходного каскада усилителя. Было проведено исследование электрических характеристик разработанной ГИС выходного полукаскада. Анализ результатов показал, что мощность сигнала ГИС выходного каскада соответствует мощности, полученной при сложении 8 кристаллов ПТШ. Это подтверждает правильность новой (разработанной) концепции сложения мощности кристаллов ПТШ.

При переходе на новый вариант ГИС полукаскада его выходная мощность увеличилась с 6,5 до 11 Вт.

Вторым вариантом применения ГИС выходного полукаскада модернизированной конструкции является применение в выходном каскаде ГИС двух модернизированных полукаскадов (с использованием составных двухкристальных ПТШ). Учитывая результаты анализа характеристик выходного полукаскада модернизированной конструкции, выходная мощность модуля усилителя может быть увеличена до 22…27 Вт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы достигнута поставленная цель – улучшение массогабаритных характеристик модуля УМ на 30 % за счёт разработки ГИС выходного каскада модернизированной конструкции.

При разработке технологии изготовления ГИС выходного каскада использовались технологические процессы, широко применяемые на НПП «Исток» для серийного изготовления модулей УМ. Разработанная технология позволяет наладить серийное производство новых усилителей с достаточно высоким процентом выхода.

Полученные результаты предполагается использовать для повышения качества выпускаемых УМ и при выполнении следующих разработок аналогичных УМ.

4(527).indd 66 17.12.2015 11:26:31

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2298255 РФ.** Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин, В. Г. Моргунов. – Приоритет 12.08.05.

2. **Иовдальский, В. А.** Составной двухъярусный транзистор для усилителей мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 4 (507). – С. 65. – 71.

3. **Иовдальский, В. А.** Анализ возможности теплоотвода при двухъярусном расположении кристаллов транзисторов в ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина. // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника. – 2010. – Вып.1(504). – С. 54 – 69.

Статья поступила 24 июля 2015 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛОСКИХ ВЫВОДОВ КРИСТАЛЛОВ КОМПОНЕНТОВ ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, С. К. Давронов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

В результате проведённых расчётно-аналитических исследований установлено, что для плоских клиновидных балочных выводов оптимальное соотношение ширины широкого конца клиновидного участка по отношению к ширине узкого конца равно 2; приемлемое соотношение уменьшения паразитной индуктивности к увеличению паразитной ёмкости находится в интервале 1,15±0,75; применение плоских балочных выводов для подключения транзисторов в составе ГИС СВЧ-диапазона позволяет значительно (на 20 %) увеличить коэффициент усиления в верхней части рабочего диапазона (на частоте 14 ГГц).

КС: геометрия плоских клиновидных балочных выводов, кристалл, компонент ГИС, СВЧ-диапазон

As a result of calculation-analytical investigations it was established that for flat tapered beam leads the optimal correlation between the width of the tapered part wide end and the width of the tapered part narrow end amounts to 2; the acceptable correlation between the spurious inductance decrease and the spurious capacitance increase is within 1.15±0.75 range; the application of flat beam leads for connecting transistors in microwave HICs allows to increase significantly (20%) the gain in the upper part of the operating range (at 14 GHz frequency).

Keywords: flat tapered beam lead geometry, chip, HIC component, microwave range

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появился ряд работ [1–3], в которых обосновывается возможность улучшения электрических характеристик ГИС за счёт применения плоских балочных соединений. Установлено, что балочные выводы с клиновидными участками имеют преимущества перед применением прямоугольных выводов [4].

4(527).indd 67 17.12.2015 11:26:31

2. РАСЧЁТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В работе [4] предложена методика оценки паразитных индуктивности и ёмкости клиновидных участков выводов компонентов ГИС СВЧ-диапазона. Соотношение ширины широкой части (начала) вывода $W_н$ к ширине узкой его части (конца) $W_к$ не будет больше 10. Расстояние между соединяемыми контактными площадками кристаллов и МПЛ обычно равно 0,5…1 мм. Исследования целесообразно проводить именно для этих значений с использованием формул расчёта индуктивности и ёмкости балочных выводов, предложенных в работе [5], т. е. $L = 0,05 + 0,66l - 0,04\frac{W_к l}{W_н}$; $C = (0,008 + 0,0002(W_к / W_н))l$, где L – индуктивность, нГн; l – длина, мм; $W_к$, $W_н$ – ширины широкого и узкого концов вывода соответственно, мм; C – емкость, пФ. На рис. 1 и 2 представлены результаты исследования зависимости паразитных индуктивности и ёмкости от длины вывода для $W_к = 0,5$ мм, $W_н = 0,05$ мм. На рис. 3 и 4 представлены результаты исследований зависимости паразитных индуктивности и ёмкости вывода от ширины широкого конца $W_к$ балочного вывода при ширине узкого конца $W_н = 0,05$ мм и длине $l = 1$ мм. Анализ показывает, что при увеличении ширины широкого конца $W_к$ клиновидной части вывода уменьшается его индуктивность, а ёмкость увеличивается.

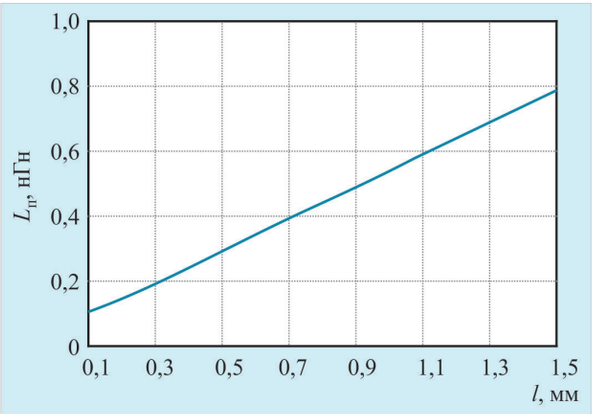


Рис. 1. Зависимость паразитной индуктивности вывода $L_п$ от его длины l

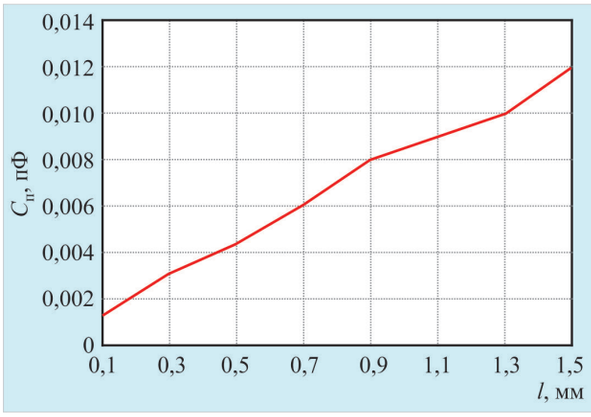


Рис. 2. Зависимость паразитной ёмкости вывода $C_п$ от его длины l

Найдём оптимальное соотношение изменения величины индуктивности к изменению ёмкости.

Оптимальным является соотношение $W_к / W_н = 2$, т. е. широкий конец балки должен быть в два раза шире её узкого конца. При этих значениях отношение изменения эквивалентной индуктивности к изменению эквивалентной емкости максимально. Заметно, что при $W_н = 0,05$ мм и $l = 1$ мм оптимальным интервалом для такого соотношения является $\Delta L(\%) / \Delta C(\%) = 1,15 \pm 0,75$, т. е. от 0,4 до 1,9. Такое соотношение предусматривает величину, при которой $W_к / W_н = 2$. Из анализа кривой зависимости рис. 5 можно сделать вывод, что наилучший результат достигается при $W_к = 0,2$ мм, т. е. при $\Delta L(\%) / \Delta C(\%) = 1,47$. Поскольку основным параметром при использовании транзистора в ГИС СВЧ-диапазона является коэффициент усиления, то целесообразно оценить влияние клиновидности выводов на этот параметр. На рис. 6 представлены результаты такого исследования.

4(527).indd 68 17.12.2015 11:26:32

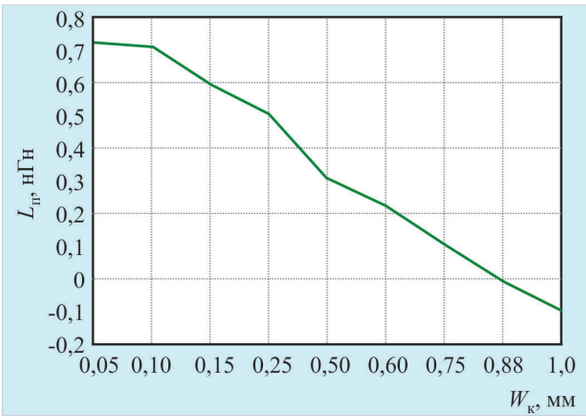


Рис. 3. Зависимость паразитной индуктивности $L_п$ от ширины широкого конца вывода $W_к$

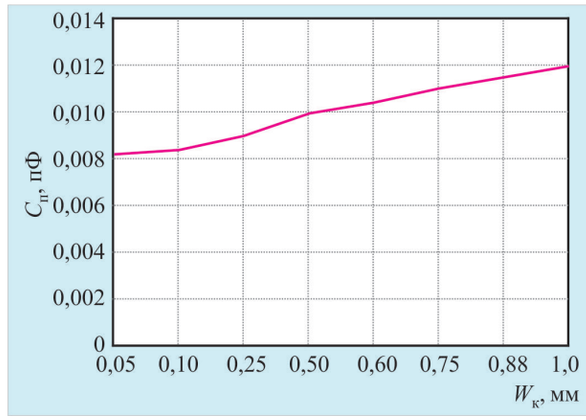


Рис. 4. Зависимость паразитной ёмкости $C_п$ от ширины широкого конца вывода $W_к$

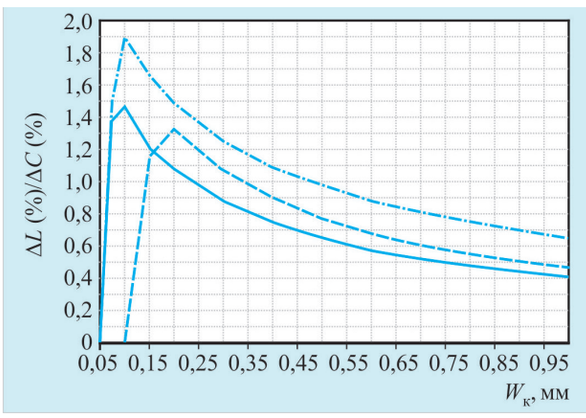


Рис. 5 Зависимости отношения $\Delta L(\%) / \Delta C(\%)$ от ширины широкого конца клиновидного балочного вывода $W_к$:
—— $W_н$ = 0,05 мм, l = 0,5 мм;
– · – $W_н$ = 0,05 мм, l = 1 мм;
– – – $W_н$ = 0,1 мм, l = 0,5 мм

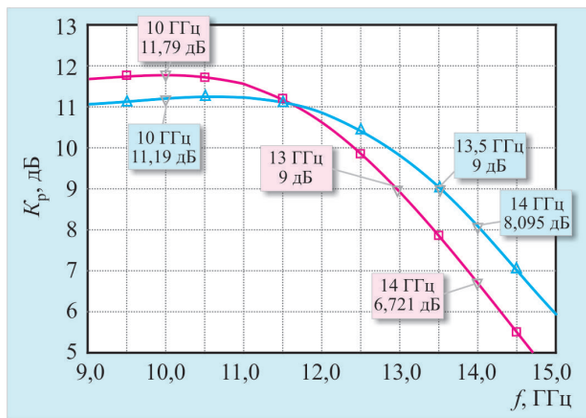


Рис. 6. Зависимости коэффициента усиления K_p транзистора с балочными выводами от частоты f для случаев:
□ – прямоугольные балочные выводы;
Δ – клиновидные балочные выводы

3. ВЫВОДЫ

В результате проведённых расчётно-аналитических исследований можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что для плоских клиновидных балочных выводов оптимальное соотношение ширины широкого конца клиновидного участка по отношению к ширине узкого конца равно 2.

2. Приемлемое соотношение уменьшения паразитной индуктивности к увеличению паразитной ёмкости находится в интервале 1,15±0,75.

3. Применение плоских балочных выводов для подключения транзисторов в составе ГИС СВЧ-диапазона позволяет значительно (на 20 %) увеличить коэффициент усиления в верхней части рабочего диапазона (на частоте 14 ГГц).

4(527).indd 69 17.12.2015 11:26:32

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иовдальский, В. А.** Применение выводных рамок полупроводниковых приборов в технологии ГИС СВЧ / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Моргунов, В. И. Васильев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2002. – Вып. 1 (479). – С. 57 – 61.

2. **Иовдальский, В. А.** Применение выводных рамок балочных выводов полупроводниковых приборов для улучшения характеристик ГИС СВЧ / В. А. Иовдальский, В. Г. Виноградов, Ю. И. Молдованов, В. Г. Моргунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2005. – Вып. 2 (486). – С. 27 – 33.

3. **Иовдальский, В. А.** Улучшение электрических характеристик элементов приемопередающего модуля СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. Ф. Федоров, С. В. Григорьев, Т. В. Стренина, А. А. Лисицин, В. Г. Моргунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 2 (490). – С. 42 – 47.

4. **Иовдальский, В. А.** Эффективность применения плоских внутрисхемных соединений в ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 2 (509). – С. 41 – 47.

5. **Иовдальский, В. А.** Оптимизация геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 4 (511). – С. 49 – 58.

Статья поступила 24 августа 2015 г.

УДК 621.385.6

ВЫВОДНАЯ РАМКА ДЛЯ МНОГОКРИСТАЛЬНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА СВЧ

В. А. Иовдальский, К. В. Дудинов, С. К. Давронов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Разработана конструкция плоских золотых балочных выводов с коническими участками в их составе для присоединения одновременно к двум кристаллам, а также конструкция выводной рамки для присоединения одновременно двух кристаллов ПТШ в ГИС усилительного каскада усилителя мощности. Показаны преимущества замены проволочных выводов на выводы разработанной конструкции.

КС: выводная рамка, многокристальный полупроводниковый прибор, СВЧ

The design of flat gold beam leads with tapered parts within them for simultaneous attachment to two chips was developed as well as the design of a lead frame for simultaneous attachment of two Shottky-gate FET chips in amplifying stage HIC of power amplifier. The advantages of replacement of wire leads by leads of the developed design are shown.

Keywords: lead frame, multichip semiconductor device, microwave

1. ВВЕДЕНИЕ

Поскольку РЭА СВЧ-диапазона по-прежнему базируется на ГИС, то совершенствование их конструкции с целью улучшения электрических и массогабаритных характеристик является актуальным.

4(527).indd 70 17.12.2015 11:26:32

Одним из направлений совершенствования конструкции ГИС является применение плоских балочных или ленточных выводов полупроводниковых приборов и внутрисхемных соединений вместо проволочных [1, 2].

В настоящее время это направление получило широкое распространение на ряде отечественных предприятий [3–5].

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Оптимизация конструкции [6, 7], технологии изготовления [8, 9] плоских выводов кристаллов полупроводниковых приборов и внутрисхемных соединений и их применение при сборке ГИС позволили расширить применение плоских выводов и соединений из гальванически осаждаемого золота, а также повысить эффект улучшения характеристик.

Наиболее широкое применение это направление получило при производстве ГИС усилительных каскадов усилителей мощности СВЧ-диапазона, где необходимо суммирование мощности нескольких транзисторов, например ПТШ. Применение плоских выводов ПТШ вместо проволочных позволило повысить коэффициент усиления ГИС каскадов и расширить их рабочий диапазон частот в высокочастотную сторону, тем самым улучшив электрические характеристики.

Наращивать мощность усилительных каскадов можно применением более мощных транзисторов. Для этого в кристалле ПТШ увеличивают количество транзисторных структур. Однако такое наращивание приводит к увеличению соотношения размеров сторон кристалла ПТШ, что нежелательно, так как увеличивает хрупкость кристалла, снижает технологичность изготовления и использования при сборке ГИС. Поэтому соотношение сторон кристалла ПТШ обычно ограничивают величиной 4. Стремясь суммировать мощность большого количества кристаллов (до 16 в усилительном каскаде), их располагают парами, а схемы деления и суммирования на плате занимают достаточно большую площадь. На рис.1 представлена такая схема с проволочными выводами двух кристаллов ПТШ.

К недостаткам такой ГИС следует отнести низкие электрические характеристики, связанные с повышенной паразитной индуктивностью, которая определяется применением проволочных выводов. Кроме того, длина проволочных выводов может быть различной и определяется расстоянием между кристаллами и точностью их посадки на плату, а это снижает воспроизводимость электрических характеристик и приводит к необходимости их подстройки.

Предлагается заменить в конструкции ГИС проволочные выводы двух кристаллов ПТШ плоскими балочными выводами с коническими участками в их составе, привариваемыми к двум кристаллам одновременно с двух сторон, один – со стороны затворов, а другой – со стороны стоков [10].

При этом расположение внутренних концов выводов, привариваемых к контактным площадкам кристаллов, определяется расположением контактных площадок на кристаллах, расстояние между кристаллами – расстоянием между крайними контактными площадками кристаллов, а положение кристаллов на плате – положением плёночных элементов плат, к которым привариваются внешние концы выводов. На рис. 2 представлена предлагаемая конструкция.

Строгая взаимосвязь геометрических размеров выводов с топологическим рисунком кристаллов ПТШ и платы повышает точность расположения кристаллов на плате, а также воспроизводимость длины выводов и их геометрии, тем самым улучшая электрические и массогабаритные характеристики схемы.

4(527).indd 71 17.12.2015 11:26:32

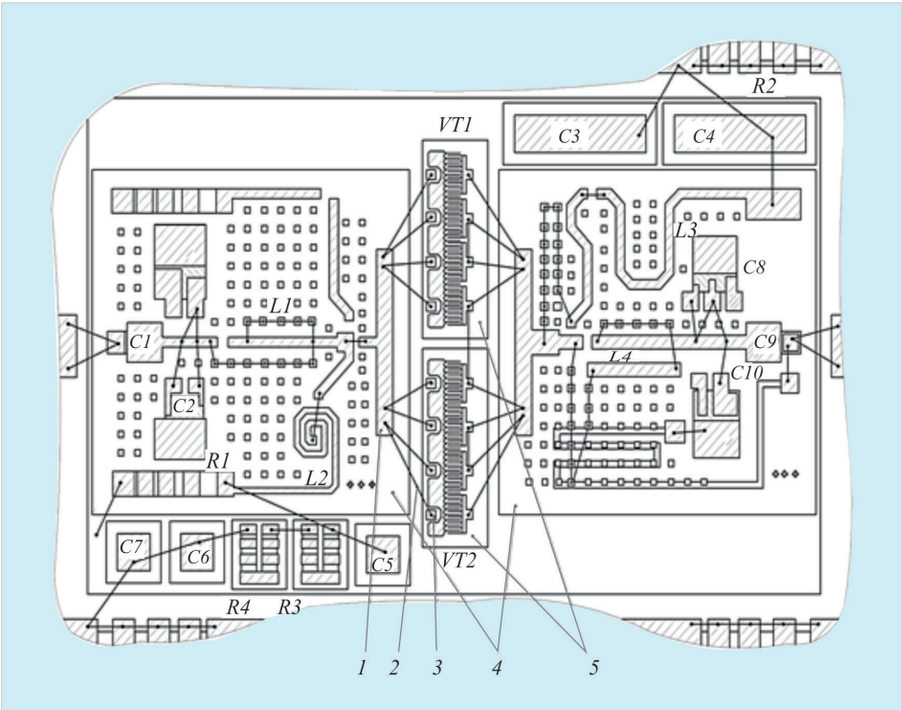


Рис. 1. Топология усилителя мощности с применением проволочных соединений:
1 – микрополосковая линия; *2* – золотая проволока; *3* – контактная площадка транзистора;
4 – поликоровые подложки; *5* – кристаллы транзисторов

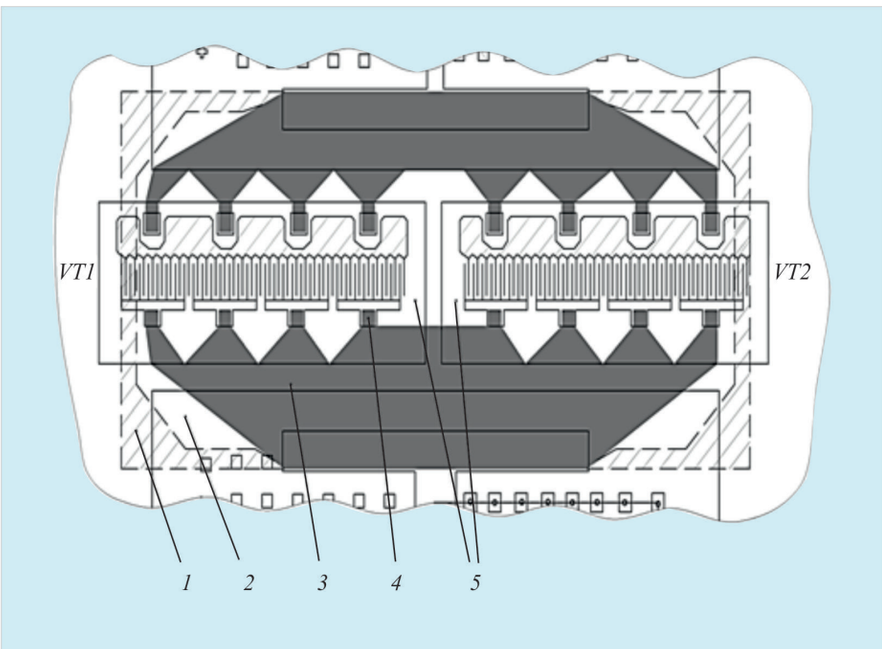


Рис. 2. Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора:
1 – технологическая часть выводной рамки; *2* – поликоровая подложка; *3* – балочный вывод;
4 – контактная площадка; *5* – кристаллы транзисторов

4(527).indd 72 17.12.2015 11:26:33

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Обычно плоские выводы полупроводниковых приборов изготавливают из гальванически осаждаемого золота по известной технологии [8] групповым методом.

Применение плоских балочных выводов в составе выводных рамок облегчает процесс сборки ГИС и защищает кристаллы ПТШ от пробоя статическим электричеством во время сборки до момента отделения технологических частей выводной рамки, соединяющих выводы затворов и стоков транзисторов.

4. ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы получены следующие результаты.

1. Разработана конструкция плоских золотых балочных выводов с коническими участками в их составе для присоединения одновременно к двум кристаллам.

2. Разработана конструкция выводной рамки для присоединения одновременно двух кристаллов ПТШ в ГИС усилительного каскада усилителя мощности.

3. Показаны преимущества замены проволочных выводов на выводы разработанной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иовдальский, В. А.** Применение выводных рамок полупроводниковых приборов в технологии ГИС СВЧ / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. А. Моргунов, В. И. Васильев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2002. – Вып. 1 (479) . – С. 57 – 61.

2. **Патент 2191492 РФ.** Выводная рамка для СВЧ и КВЧ полупроводникового прибора / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин. – Приоритет 17.04.2000.

3. **Иовдальский, В. А.** Применение выводных рамок балочных выводов полупроводниковых приборов для улучшения характеристик ГИС СВЧ / В. А. Иовдальский, В. Г. Виноградов, Ю. И. Молдованов, В. Г. Моргунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2005. – Вып. 2 (486) . – С. 27 – 33.

4. **Иовдальский, В. А.** Улучшение электрических характеристик элементов приёмопередающего модуля СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. Ф. Фёдоров, С. В. Григорьев, Т. В. Стренина, А. А. Лисицин, В. Г. Моргунов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 2 (490) . – С. 42 – 47.

5. **Иовдальский, В. А.**Улучшение электрических характеристик широкополосных ГИС СВЧ за счёт оптимизации внутрисхемных соединений / В. А. Иовдальский, С. В. Футьянов, А. А. Лисицын, А. В. Левашов, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко, И. Н. Аюпов, Р. Б. Киличенков // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». «Intermatic-2012». 3–7 декабря 2012, Москва. – М.: МИРЭА, 2012. – С.130 – 132.

6. **Иовдальский, В. А.** Оптимизация геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ- диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко, И. Н. Аюпов // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». «Intermatic-2013». 2–6 декабря 2013, Москва. – М.: МИРЭА, 2013. – Часть 3. – С. 140 – 143.

7. **Иовдальский, В. А.** Дальнейшее совершенствование геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко, Р. Б. Киличенков // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». «Intermatic-2013». 2–6 декабря 2013, Москва. – М.: МИРЭА, 2013. – Часть 3. – С. 148 – 153.

8. **Патент 2183366 РФ.** Способ изготовления выводных рамок / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин. – Приоритет 17.04.2000.

9. **Патент 2417480 РФ.** МПК H 01 L 21/84. Способ изготовления гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Ю. И. Молдованов, А. М. Коцюба. – Приоритет 26.10.2009.

10. **Заявка 2013134681/28 (051898).** Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора СВЧ / В. А. Иовдальский, К. В. Дудинов, В. Г. Моргунов, Т. С. Кудрова. – Приоритет 23.07.2013.

Статья поступила 24 июля 2015 г.

4(527).indd 73 17.12.2015 11:26:33

УДК 621.382.323

МНОГОКРИСТАЛЬНЫЙ СОСТАВНОЙ ПТШ ДЛЯ ГИС УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский, В. Г. Лапин, В. Г. Пчелин, Д. С. Гринберг

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Разработана конструкция многокристального составного ПТШ для применения в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона. Показана технологическая возможность ее реализации.

КС: многокристальный составной ПТШ, ГИС, усилитель мощности, СВЧ-диапазон

The design of multichip composite Shottky-gate FET has been developed for application in microwave HIC power amplifiers. The technological possibility of its realization is shown.

Keywords: multichip composite Shottky-gate FET, HIC, power amplifier, microwave range

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появились сообщения о создании двухкристального составного ПТШ и успешном применении его в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона [1–3].

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Оптимизация конструкции [4, 5], технологии изготовления [6] плоских выводов кристаллов полупроводниковых приборов и внутрисхемных соединений и их применение при сборке ГИС позволили расширить применение плоских выводов и соединений из гальванически осаждаемого золота, а также повысить эффект улучшения характеристик. В ГИС усилительных каскадов часто применяется именно попарное суммирование мощности кристаллов ПТШ. В связи с этим интерес представляет применение плоских балочных выводов новой конструкции [7]. В такой конструкции плоские выводы двух кристаллов ПТШ объединяются и используются для приварки к затворам или стокам двух кристаллов ПТШ. При этом расположение внутренних концов выводов, привариваемых к контактным площадкам кристаллов, определяется расположением контактных площадок на кристаллах, расстоянием между кристаллами, расстоянием между крайними контактными площадками кристаллов, а положение кристаллов на плате определяется положением плёночных элементов плат, к которым привариваются внешние концы выводов. Строгая взаимосвязь геометрических размеров выводов с топологическим рисунком кристаллов ПТШ и платы повышает точность расположения кристаллов на плате, а также воспроизводимость длины выводов и их геометрии и тем самым улучшает электрические и массогабаритные характеристики схемы. Применение таких выводов в составных ПТШ позволяет увеличить число кристаллов, по меньшей мере, до четырёх (рис.1, 2).

4(527).indd 74 17.12.2015 11:26:33

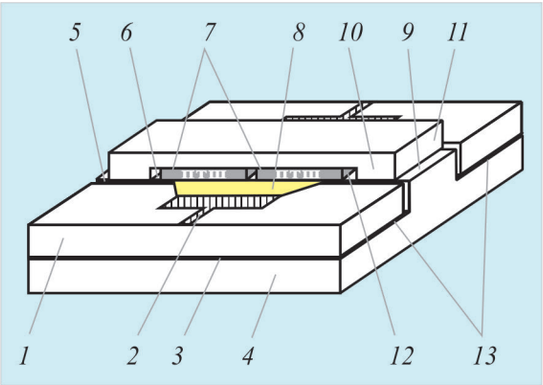
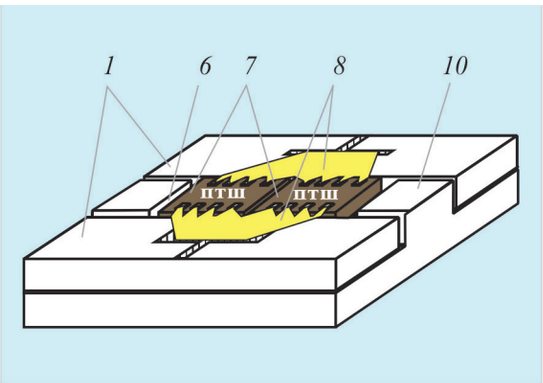


Рис. 1. Фрагмент предложенной мощной ГИС СВЧ:
1 – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизации;
3 – экранная заземляющая металлизация; *4* – металлическое теплоотводящее основание;
5 – отверстие в диэлектрической подложке; *6* – выемка в металлическом основании;
7 – кристаллы транзисторов;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



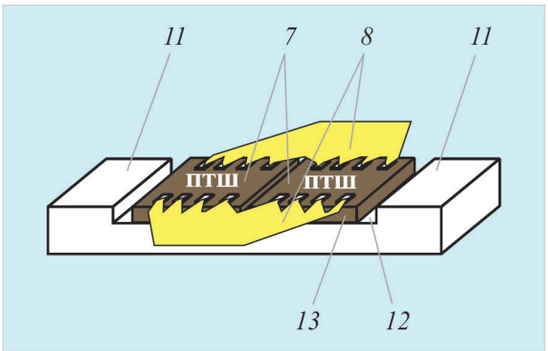


Рис. 2. Составные части фрагмента предложенной мощной ГИС СВЧ-диапазона
(обозначение позиций на рис. 2 такое же, как и на рис.1)

Таким образом, может быть просуммирована мощность четырёх кристаллов и тем самым реализована конструкция четырёхкристального составного ПТШ. Преимуществом такой конструкции является улучшение массогабаритных характеристик. Кроме того, за счёт сокращения длины соединений суммирующих цепей уменьшается вероятность возникновения паразитной генерации схемы, что улучшает электрические характеристики ГИС [8].

При этом следует учитывать, что тепловые поля кристаллов ПТШ накладываются друг на друга и кристаллы будут работать при повышенной тепловой нагрузке, что требует эффективного отвода тепла и может сдерживать применение ПТШ с большой мощностью.

4(527).indd 75 17.12.2015 11:26:33

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Технология изготовления многокристального составного ПТШ сложнее, чем двухкристального, и связана с приваркой плоских балочных выводов из гальванически осаждаемого золота к контактным площадкам сразу двух кристаллов. Тем не менее такая задача может быть решена и не является непреодолимой.

4. ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы получены следующие результаты.

1. Разработана конструкция многокристального составного ПТШ для применения в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона.

2. Показана технологическая возможность реализации разработанной конструкции многокристального составного ПТШ.

3. Обосновано улучшение электрических и массогабаритных характеристик в ГИС за счёт применения многокристального составного ПТШ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Патент 2298255 РФ.** Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин, В. Г. Моргунов. – Приоритет 12.08.05.

2. **Иовдальский, В. А.** Новая концепция сложения мощности кристаллов ПТШ в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 1 (487). – С. 44 – 51.

3. **Иовдальский, В. А.** Эффективность применения двухкристальных составных ПТШ в усилителе мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, С. В. Герасименко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 2 (521). – С. 33 – 38.

4. **Иовдальский, В. А.** Оптимизация геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко, И. Н. Аюпов // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». «Intermatic-2013». 2–6 декабря 2013, Москва. – М.: МИРЭА, 2013. – Часть 3. – С. 140 – 143.

5. **Иовдальский, В. А.** Дальнейшее совершенствование геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко, Р. Б. Киличенков // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». «Intermatic-2013». 2–6 декабря 2013, Москва. – М.: МИРЭА, 2013. – Часть 3. – С. 148 – 153.

6. **Патент 2183366 РФ.** Способ изготовления выводных рамок / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин. – Приоритет 17.04.2000.

7. **Заявка 2013134681/28 (051898).** Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора СВЧ / В. А. Иовдальский, К. В. Дудинов, В. Г. Моргунов, Т. С. Кудрова. – Приоритет 23.07.2013.

8. **Иовдальский, В. А.** Подавление паразитной генерации в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 4(507). – С. 72 – 75.

Статья поступила 24 июля 2015 г.

4(527).indd 76 17.12.2015 11:26:33

УДК 621.3.049.77.029.64

ДАЛЬНЕЙШЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВНУТРИСХЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Разработана конструкция ГИС СВЧ-диапазона, позволяющая за счет применения плоских плёночных внутрисхемных соединительных проводников, которые сформированы на плёночном полимерном носителе, имеющем дополнительные отверстия, улучшить электрические характеристики и повысить технологичность.

КС: внутрисхемные соединения, ГИС, СВЧ-диапазон, конструкция

A microwave HIC design has been developed which allows to improve electrical characteristics and raise technological effectiveness due to the use of flat film in-circuit connecting wires formed on film polymer carrier having additional holes.

Keywords: in-circuit connections, HIC, microwave range, design

1. ВВЕДЕНИЕ

При использовании плоских балочных внутрисхемных соединений взамен проволочных соединений для подключения кристаллов активных полупроводниковых приборов в ГИС СВЧ-диапазона достигается максимальный эффект [1]. Ранее сообщалось об успешном серийном использовании такой замены для улучшения электрических характеристик изделий на основе ГИС [2]. Однако применение плоских балочных внутрисхемных соединений в других частях схемы, например в штыревых направленных делителях мощности (мостах Ланге), также оказывается полезным для улучшения электрических характеристик [1].

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Распространение использования плоских балочных внутрисхемных соединений в других частях схемы исключает использование выводных рамок, применяемых ранее [3], и требует для их изготовления и крепления применения плёночных полимерных носителей [4]. Применяемый в работе [4] плёночный носитель из флюорена хотя и удобен тем, что удаляется без остатка возгонкой при температуре 295 °С, является не всегда удобным в использовании, например при изготовлении на нем пленочных проводников с применением вакуумного напыления, требующего нагрева до 300 °С. В связи с этим внимание привлекает широко применяемый и хорошо освоенный материал – полиимид. Плёнки из полиимида выпускаются отечественной промышленностью и широко применяются в электронной промышленности для изготовления плёночных носителей и плат [5]. Использование плёночного полимерного носителя для формирования на нем плоских балочных внутрисхемных соединений и сквозных отверстий для подключения их к проводникам топологического рисунка схемы позволяет существенно

4(527).indd 77 17.12.2015 11:26:33

повысить технологичность конструкции ГИС. Однако известно влияние материала, находящегося под проводниками и в непосредственной близости от них, на электрические характеристики схемы [6]. В связи с этим предложена конструкция ГИС СВЧ-диапазона, в которой влияние материала плёночного носителя на электрические характеристики схемы может быть существенно снижено при обеспечении её высокой технологичности [7]. Предлагаемая конструкция ГИС СВЧ-диапазона представлена на рис.1...3.

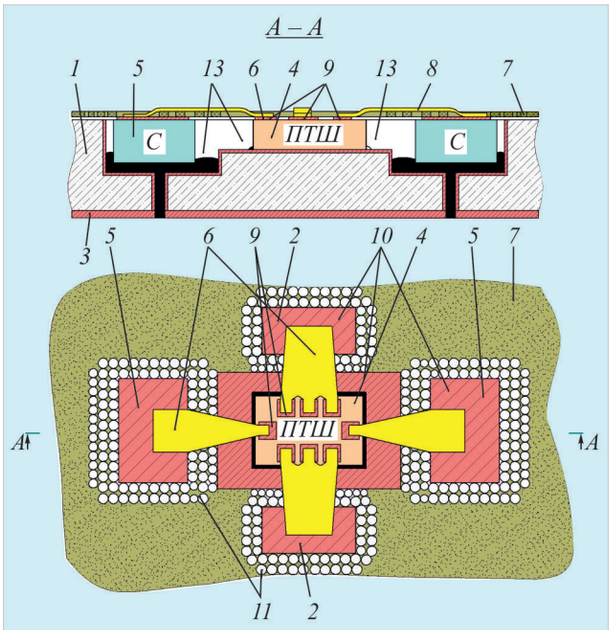


Рис.1. Фрагмент предложенной ГИС СВЧ-диапазона
с кристаллами активного и пассивных навесных компонентов:

1 – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизации; *3* – экранная заземляющая металлизация; *4* – кристалл активного навесного компонента; *5* – кристаллы пассивных навесных компонентов; *6* – выводы кристаллов навесных компонентов; *7* – плёночный полимерный носитель; *8* – плоские плёночные соединительные внутрисхемные проводники; *9* – контактные площадки кристаллов навесных компонентов; *10* – сквозные отверстия в плёночном полимерном носителе; *11* – дополнительные отверстия

ГИС СВЧ-диапазона (см. рис.1) содержит диэлектрическую подложку с топологическим рисунком металлизации на лицевой стороне и экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне. Кристаллы навесных компонентов: активных (полупроводниковых приборов, например полевых транзиторов с барьером Шотки) и пассивных (конденсаторов) расположены на лицевой стороне подложки. Часть выводов кристаллов активных полупроводниковых приборов соединена с топологическим рисунком металлизации. На лицевой поверхности подложки расположен плёночный полимерный носитель, на наружной стороне которого выполнены плоские плёночные внутрисхемные соединительные проводники. Внутрисхемные проводники соединяют контактные площадки кристаллов навесных компонентов между собой или с топологическим рисунком металлизации (см. рис. 1), или плёночные элементы топологического рисунка металлизации между собой через сквозные отверстия в полимерном носителе (см. рис. 2). При этом длина внутрисхемных соединительных проводников, а значит, и их паразитная индуктивность будут

4(527).indd 78 17.12.2015 11:26:33

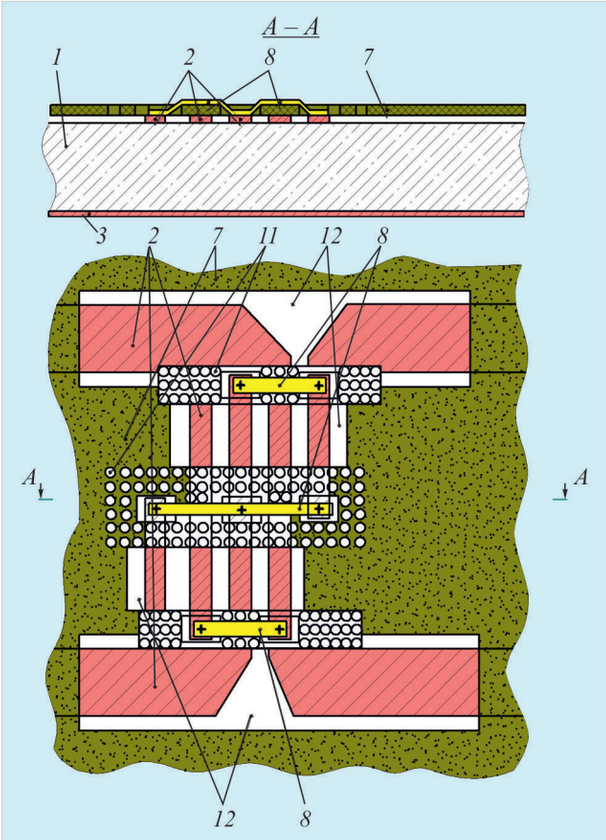


Рис. 2. Фрагмент предложенной ГИС СВЧ-диапазона,
в которой дополнительные отверстия выполнены в виде окон:
1 – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизации; *3* – экранная заземляющая металлизация; *7* – плёночный полимерный носитель; *8* – плоские плёночные соединительные внутрисхемные проводники; *11* – дополнительные отверстия; *12* – окна

определяться толщиной полимерного носителя, поэтому целесообразно ограничить её сверху значением 100 мкм. Толщина полимерного носителя снизу может быть ограничена величиной 5 мкм из-за того, что изготовление свободных плёнок полимера меньшей толщины затруднительно, да и работать с такой плёнкой трудно из-за её низкой прочности. Основными путями снижения влияния материала полимерного носителя на сигнал, проходящий по проводникам схемы, являются: снижение толщины полимерного носителя; снижение диэлектрической проницаемости полимера; выполнение дополнительных сквозных или несквозных отверстий в плёночном полимерном носителе (или окон) вдоль плёночных проводников топологического рисунка металлизации, а также под внутрисхемными соединительными проводниками и на расстоянии от них не более 1 мм в зоне распространения электромагнитного поля вокруг проводников. Учитывая, что технологичность конструкции схемы зависит от жёсткости полимерного носителя с плёночными внутрисхемными соединительными проводниками, что важно для совмещения рисунка внутрисхемных соединительных проводников с топологическим рисунком металлизации, площадь, занимаемая дополнительными отверстиями, также должна быть ограничена. Очевидно, что эти два требования находятся в некотором противоречии, и необхо-

4(527).indd 79 17.12.2015 11:26:34

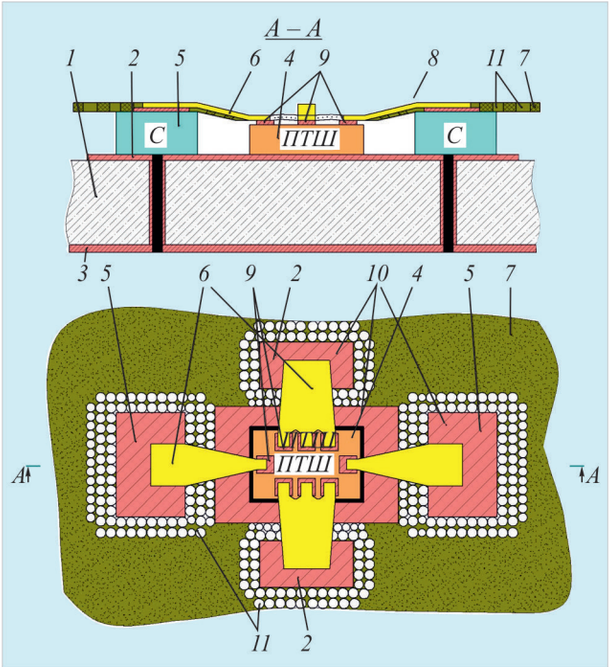


Рис. 3. Фрагмент предложенной ГИС СВЧ-диапазона, в которой кристаллы навесных компонентов расположены в углублениях диэлектрической подложки:

1 – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизации; *3* – экранная заземляющая металлизация; *4* – кристаллы активных навесных компонентов; *5* – кристаллы пассивных навесных компонентов; *6* – выводы кристаллов навесных компонентов; *7* – плёночный полимерный носитель; *8* – плоские плёночные соединительные внутрисхемные проводники; *9* – контактные площадки кристаллов навесных компонентов; *10* – сквозные отверстия в плёночном полимерном носителе; *11* – дополнительные отверстия; *12* – углубление диэлектрической подложки

димо их оптимальное соотношение для достижения высоких электрических характеристик и высокой технологичности конструкции. Поэтому ограничение площади дополнительных отверстий, например от 10 до 90 %, должно быть выбрано из следующих соображений. Ограничение площади дополнительных отверстий снизу (10 %) – незначительным влиянием на электрические характеристики, а сверху (90 %) – необходимостью обеспечения технологичности (жесткости) конструкции. Что же касается ограничения величины диэлектрической проницаемости полимера, например от 1,5 до 8,0; то полимер с диэлектрической проницаемостью менее 1,5 оказывает слабое влияние на электрические характеристики, а большинство полимеров, применяемых в производстве, имеют диэлектрическую проницаемость не более 8 [8]. Полезным является выполнение дополнительных отверстий в виде окон, открывающих поверхность диэлектрической подложки там, где на полимерном носителе нет внутрисхемных соединительных проводников (см. рис. 2). Это значительно сокращает влияние полимера на электрические характеристики. Если расстояние между соседними отверстиями или окнами не превышает толщины полимерного носителя, то сохраняется жесткость и прочность полимерного носителя, а также обеспечивается необходимое сцепление плёночных внутрисхемных соединительных проводников с полимерным носителем. Расположение кристаллов навесных компонентов в углублениях диэлектрической подложки, глубина которых обеспечивает расположение их лицевых поверхностей в одной

4(527).indd 80 17.12.2015 11:26:34

плоскости с лицевой стороной диэлектрической подложки, значительно повышает технологичность конструкции схемы за счет облегчения совмещения рисунка плоских плёночных внутрисхемных соединительных проводников с топологическим рисунком металлизации и их соединения. Выполнение дополнительных отверстий и окон в полимерном носителе глухими, с толщиной дна отверстия или окна, равной или более 1мкм, позволяет увеличить жесткость полимерного носителя и увеличить сцепление рисунка плоских плёночных внутрисхемных соединительных проводников с топологическим рисунком металлизации.

3. РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

Проведена оценка влияния наличия носителя *7* из полиимида с диэлектрической проницаемостью 3,9 на передаточную характеристику одного из элементов схемы, а именно штыревого направленного делителя мощности (моста Ланге), в зависимости от толщины носителя *7* и плотности заполнения дополнительными отверстиями *11* и окнами *12*. В состав каждой ГИС балансного усилительного каскада входят два моста Ланге, один – для разделения мощности проходящего сигнала, а второй – для её суммирования. Таким образом, электрические характеристики мостов Ланге в значительной мере обуславливают электрические характеристики схемы усилительного каскада. При этом важна не только величина потерь мощности проходящего сигнала, но и симметричность фазы и мощности в плечах моста Ланге. Компьютерное моделирование электрических характеристик моста Ланге проводилось с использованием программы Microwave Office (AWR Design Envi-ronment). Результаты представлены на рис. 4…6.

Расчёты показывают, что при нанесении 5-мкм слоя полиимида на всю площадь моста Ланге его передаточная характеристика изменяется на 3 %; при нанесении на 50 % площади моста Ланге – на 1,7 %. При нанесении 10-мкм слоя полиимида на всю площадь моста Ланге его передаточная характеристики изменяется на 5 %; при нанесении на 50 % площади моста Ланге – на 2,5 %. При нанесении 20-мкм слоя полиимида на всю площадь моста Ланге его передаточная характеристики изменяется на 7 %; при нанесении на 50 % площади моста Ланге – на 3,7 %. При нанесении 50-мкм слоя полиимида на всю площадь моста Ланге его передаточная характеристики изменяется на 8,35 %; при нанесении на 50 % площади моста Ланге – на 5,1 %. При нанесении 100-мкм слоя полиимида на всю площадь моста Ланге его передаточная характеристики изменяется на 7,45 %; при нанесении на 50 % площади моста Ланге – на 4,23 %.

Полученные результаты изменения передаточной характеристики моста Ланге при изменении толщины носителя из полиимида представлены на рис. 5.

Результаты расчётов зависимости изменения передаточных характеристик моста Ланге от площади носителя из полиимида толщиной 50 мкм (плотности заполнения дополнительными отверстиями и окнами) представлены на рис. 6.

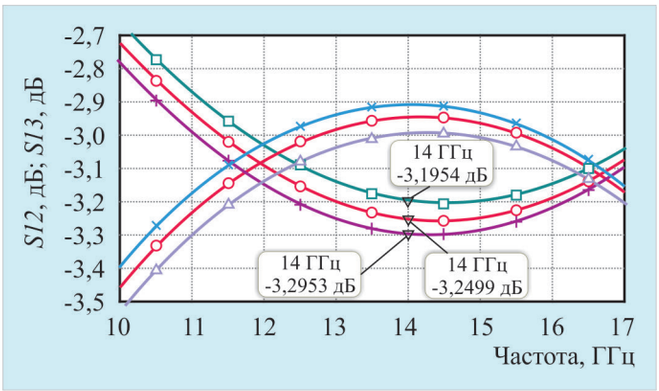
4. ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

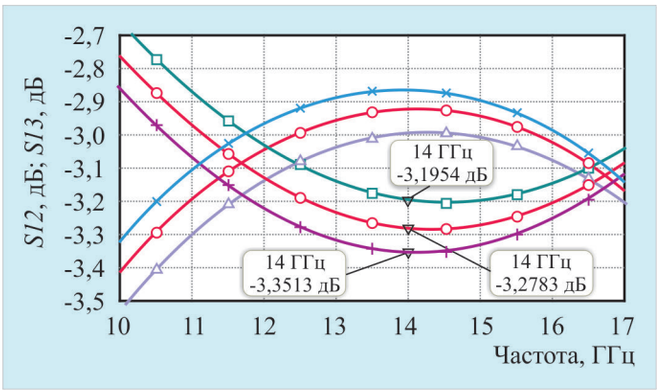
1. Разработана конструкция ГИС СВЧ-диапазона, позволяющая по сравнению с известными ранее улучшить электрические характеристики и повысить технологичность.

2. В разработанной конструкции применены плоские плёночные внутрисхемные соединительные проводники, сформированные на плёночном полимерном носителе, имеющем дополнительные отверстия.

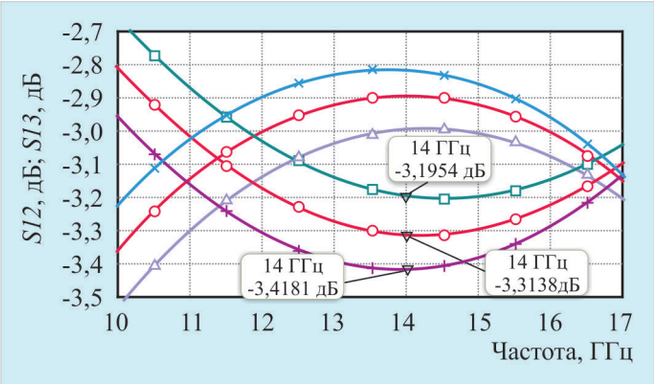
4(527).indd 81 17.12.2015 11:26:34



а)



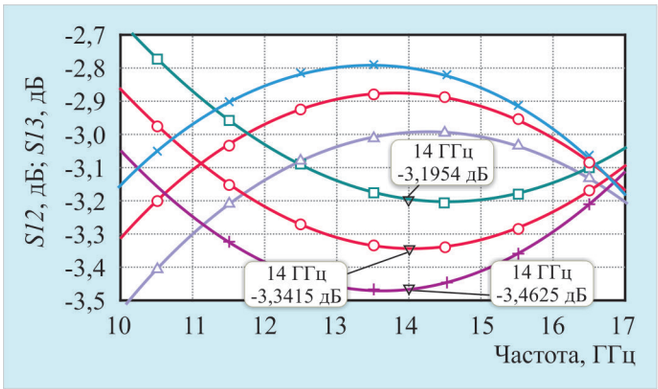
б)



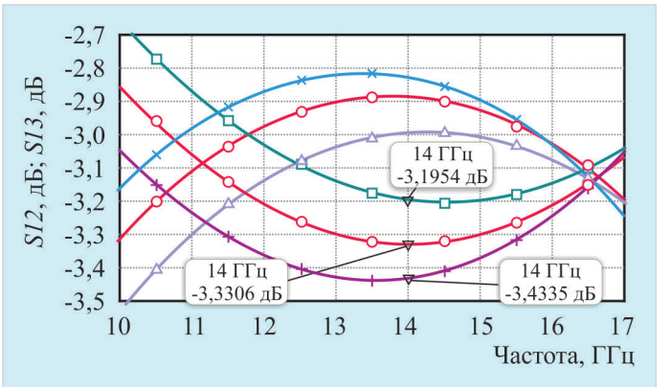
в)

Рис. 4. Зависимости передаточных характеристик *S12* и *S13* моста Ланге ГИС СВЧ-диапазона от площади покрытия его пленочным полиимидным носителем при толщине покрытия 5 мкм (*а*), 10 мкм (*б*), 20 мкм (*в*), 50 мкм (*г*), 100 мкм (*д*) (см. также с. 83):
Δ и □ – *S12* и *S13* соответственно без полиимидного покрытия; **x** и **+** – *S12* и *S13* с полиимидным покрытием по всей площади; **o** – с полиимидным покрытием 50 % площади

4(527).indd 82 17.12.2015 11:26:34



г)



д)

Рис. 4. Зависимости передаточных характеристик *S12* и *S13* моста Ланге ГИС СВЧ-диапазона от площади покрытия его пленочным полиимидным носителем при толщине покрытия 5 мкм (*а*), 10 мкм (*б*), 20 мкм (*в*), 50 мкм (*г*), 100 мкм (*д*) (окончание):
Δ и □ – *S12* и *S13* соответственно без полиимидного покрытия; **x** и **+** – *S12* и *S13* с полиимидным покрытием по всей площади; **o** – с полиимидным покрытием 50 % площади

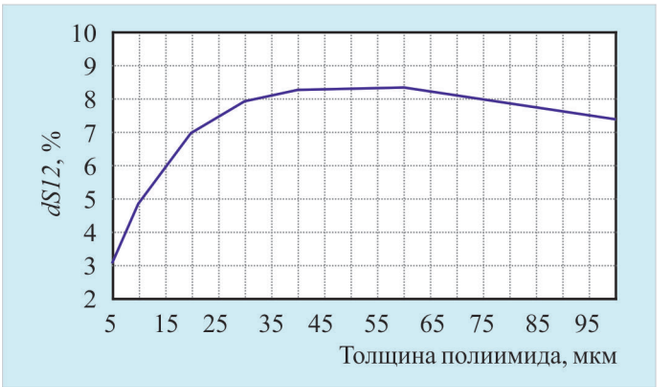


Рис. 5. Зависимость изменения передаточной характеристики моста Ланге от толщины полимерного полиимидного носителя

4(527).indd 83 17.12.2015 11:26:35

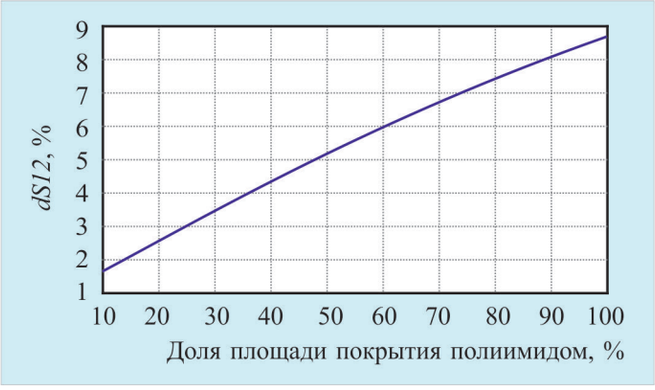


Рис. 6. Зависимость изменения передаточной характеристики
от площади покрытия моста Ланге пленкой полиимида толщиной 50 мкм

3. Улучшение электрических характеристик обеспечивается уменьшением длины внутрисхемных соединительных проводников, ограничением толщины плёночного носителя, а значит, и паразитной индуктивности и снижением влияния материала полимерного носителя на проходящий сигнал за счёт изготовления в нём дополнительных отверстий и окон.

4. Повышение технологичности конструкции схемы достигается применением пленочного полимерного носителя для формирования всех внутрисхемных соединительных проводников, что обеспечивает возможность их группового совмещения и соединения с топологическим рисунком металлизации.

5. Выбор наложенных ограничений и их обоснование повышают эффективность разработанной конструкции ГИС СВЧ-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иовдальский, В. А.** Эффективность применения внутрисхемных соединений в ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, С. В. Герасименко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 2 (509). – С. 41 – 47.

2. **Иовдальский, В. А.** Улучшение электрических характеристик элементов приёмопередающего модуля СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. Ф. Фёдоров, С. В. Григорьев, Т. В. Стренина, А. А. Лисицин, В. Г. Моргунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 2 (490). – С. 42 – 47.

3. **Патент 2191492 РФ.** Выводная рамка для СВЧ и КВЧ полупроводникового прибора / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин. – Приоритет 17.04.2000.

4. **Патент 2417480 РФ,** МПК H 01 L 21/84. Способ изготовления гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Ю. И. Молдованов, А. М. Коцюба. – Опубл. 2011, бюл. № 12; приоритет 26.10.2009.

5. **Гуськов, Г. Я.** Монтаж микроэлектронной аппаратуры / Г. Я. Гуськов, Г. А. Блинов, А. А. Газаров. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 109 – 110.

6. Анализ устройств на основе многополосковых линий передачи: технический отчёт / АО «НПП «Исток» им. Шокина»; Исмагилов Ф. М., Силин. Р. А. – Фрязино, 1986. – № 183-7686.

7. **Заявка 2011132710 РФ.** Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, Л. В. Манченко, В. Г. Моргунов, Н. М. Добровольская. – Приоритет 3.08.2011.

8. **Кацнельсон, М. Ю.** Пластические массы. Свойства и применение: справочник / М. Ю. Кацнельсон, Г. А. Балаев. – Ленинград: Химия, 1978. – С. 370.

Статья поступила 24 июля 2015 г.

4(527).indd 84 17.12.2015 11:26:35

УДК 621.3.049.77.029.64

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГИС МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский, В. Г. Виноградов, Л. В. Манченко, В. Е. Земляков, В. Г. Лапин

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Модернизация конструкции МИС и ГИС с её использованием позволит в полной мере реализовать улучшение электрических и массогабаритных характеристик и их воспроизводимость, а также повышение технологичности и надежности

КС: модернизация, МИС, ГИС, характеристики, технологичность

Modernization and use of MIC and HIC design will allow to realize in full the improvement of electrical and weight – dimension characteristics and their reproducibility as well as the raise of technological effectiveness and reliability.

Keywords: modernization, MIC, HIC, characteristics, processibility

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений совершенствования конструкции ГИС СВЧ-диапазона является перенос части элементов и компонентов электрической схемы в состав кристаллов полупроводниковых монолитных схем (МИС). Это направление является перспективным, поскольку позволяет улучшить электрические и массогабаритные характеристики изделий электронной техники, а также повышает их надёжность и технологичность.

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время применение кристаллов МИС в качестве комплектующих изделий ГИС СВЧ приобретает общий характер, поэтому данному направлению посвящено много работ зарубежных и отечественных авторов [1–3]. Успехи специалистов в разработке МИС создают благоприятные условия для их использования в ГИС.

В предшествующих работах [3, 4] показано, как в результате эволюционного развития фрагмента ГИС малошумящего усилителя (МШУ) постепенно, шаг за шагом совершенствуется его конструкция и соответственно улучшаются его электрические и массогабаритные характеристики, повышаются надёжность и технологичность. Однако в работе [3] эти улучшения происходят за счёт размещения части схемы ГИС МШУ на кристаллах МИС.

В работе [5] представлены результаты работы по дальнейшему совершенствованию конструкции балансного усилительного каскада входного МШУ. Особенностью данной схемы является использование режима автосмещения.

В ранее известной ГИС СВЧ-диапазона [3] такой режим работы мог быть реализован путем введения в электрическую схему резисторов автосмещения для каждого транзистора, размещенных на диэлектрической подложке вне самого кристалла, содержащего транзистор и конденсаторы в цепи истока транзистора. Она содержала диэлектрическую подложку, на

4(527).indd 85 17.12.2015 11:26:35

лицевой стороне которой расположен топологический рисунок металлизационного покрытия, а на обратной – экранное заземляющее металлизационное покрытие. Диэлектрическая подложка расположена обратной стороной к металлическому теплоотводящему основанию и соединена с ним электро- и теплопроводящим веществом. По крайней мере одна металлизированная посадочная площадка электрически соединена с экранным заземляющим металлизационным покрытием. Кроме того, схема содержала не меньше чем один транзистор с выводами (электродами) и не меньше чем два конденсатора, расположенных с разных сторон транзистора. При этом один из выводов транзистора электрически соединен с верхними обкладками конденсаторов, два других – с топологическим рисунком металлизационного покрытия. Нижние обкладки конденсаторов электрически соединены с металлизированной посадочной площадкой и через нее с экранным заземляющим металлизационным покрытием. Транзистор с выводами, оба конденсатора и электрические соединения одного из выводов транзистора с верхними обкладками конденсаторов выполнены в виде единого кристалла МИС на полуизолирующей полупроводниковой структуре с заданными активными слоями. Упомянутый единый кристалл расположен на металлизированной посадочной площадке.

При этом оба конденсатора пленочные. Верхние обкладки конденсаторов, выводы транзистора и электрические соединения по крайней мере одного из выводов транзистора с верхними обкладками конденсаторов выполнены в одном слое металлизационного покрытия единого кристалла МИС. В едином кристалле МИС, непосредственно под нижними обкладками конденсаторов, выполнены сквозные металлизированные отверстия для электрического соединения нижних обкладок конденсаторов с металлизированной посадочной площадкой.

Недостатки данной ГИС СВЧ-диапазона заключаются в необходимости подключения внешних резисторов посредством соединения верхней обкладки конденсаторов МИС с контактной площадкой одного из выводов резистора, размещенного на диэлектрической подложке, что тем самым ограничивает возможности дальнейшего улучшения электрических и массогабаритных характеристик. Для устранения имеющихся недостатков, улучшение электрических и массогабаритных характеристик и их воспроизводимости, повышения технологичности и надежности схемы проведена модернизация конструкции разрабатываемой МИС и ГИС с её использованием. Модернизация МИС и ГИС с её использованием достигается тем, что в ГИС СВЧ-диапазона используется полевой транзистор с барьером Шотки (ПТШ) с шириной затвора не более 500 мкм, с заданными величинами тока насыщения (не более 150 мА) и напряжения отсечки. При этом каждый единый кристалл МИС дополнительно содержит по крайней мере один резистивный элемент с заданным электрическим сопротивлением. Резистивный элемент выполнен на лицевой поверхности упомянутого единого кристалла в виде пленки или в виде легированного слоя в составе полупроводниковой структуры. Расположен он вне области канала ПТШ и на расстоянии не менее 20 мкм от электрода истока.

При этом один из концов резистивного элемента электрически соединен с верхней обкладкой одного из конденсаторов, а другой – с нижней обкладкой этого конденсатора. Электрическое соединение одного из концов резистивного элемента с верхней обкладкой конденсатора выполнено в одном слое металлизационного покрытия единого кристалла, а электрическое соединение другого конца резистивного элемента и нижние обкладки конденсаторов – в другом слое этого металлизационного покрытия. Сквозные металлизированные отверстия в едином кристалле МИС выполнены вне площади расположения конденсаторов. При этом электрическое сопротивление резистивного элемента задано исходя из соотношения:

4(527).indd 86 17.12.2015 11:26:35

$$R = \frac{U_p\left(1-\sqrt{I_d}\,/\,I_{dss}\right)}{I_d},$$

где U_p – заданное напряжение отсечки ПТШ; I_d – рабочий ток ПТШ; I_{dss} – заданный максимальный ток насыщения при нулевом напряжении на затворе ПТШ (далее ток насыщения); рабочий ток выбран из соотношения: $I_d = (0{,}15\ldots0{,}5)I_{dss}$.

На рис. 1 и 2 представлены электрическая схема и внешний вид разрабатываемой МИС.

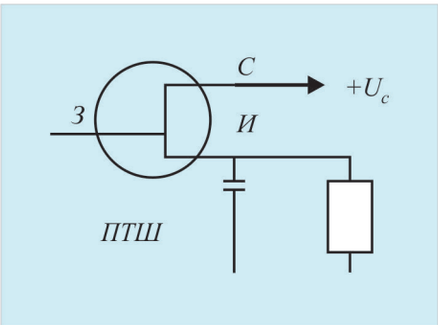


Рис.1. Электрическая схема МИС

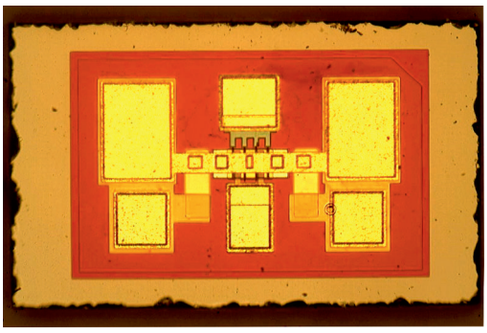


Рис. 2. Внешний вид разрабатываемой МИС

Конструкция фрагмента ГИС с разрабатываемой МИС представлена на рис. 3. Выполнение транзистора в виде ПТШ с шириной вывода – затвора не более 500 мкм, с заданными величинами тока насыщения (не более 150 мА) и напряжения отсечки, наличие в ГИС по крайней мере одного резистивного элемента с заданным электрическим сопротивлением, который выполнен в составе каждого единого кристалла МИС, обеспечивает включение ПТШ по схеме с однополярным питанием. Такая схема питания транзистора называется схемой с автосмещением, а режим работы – режим автосмещения.

Реализация такого режима обеспечивает возможность установления рабочего режима ПТШ по постоянному току, причём в автоматическом режиме. Следствием этого является:

– во-первых, улучшение электрических характеристик и, прежде всего, стабильности коэффициента усиления, благодаря автоматическому поддержанию величины рабочего тока транзисторов интегральной схемы;

– во-вторых, повышение технологичности и надежности, благодаря сокращению в ГИС количества сварных соединений, а именно исключению разварки электрических проволочных соединений между: *а*) верхними обкладками конденсаторов и электродом истока ПТШ и *б*) верхними обкладками конденсаторов и резистивным элементом. И, как следствие этого (*а* и *б*), исключается необходимость использования для ГИС второго внешнего источника питания – источника питания отрицательной полярности. ПТШ может быть выполнен по крайней мере с двумя электродами истока, при этом последние электрически соединены между собой. Резистивный элемент может быть выполнен в составе полупроводниковой структуры кристалла МИС в виде того же легированного слоя, в котором выполнен и канал ПТШ с длиной, равной длине канала, и шириной 0,15…0,5 от его ширины (см. рис. 3).

Выполнение сквозных металлизированных отверстий в едином кристалле МИС для электрического соединения нижних обкладок конденсаторов с металлизированной посадоч-

4(527).indd 87 17.12.2015 11:26:35

ной площадкой вне площади расположения этих конденсаторов обеспечивает исключение возможных нарушений целостности всех слоев пленочных конденсаторов (нижних и верхних обкладок и слоя диэлектрика), в отличие от случая их выполнения над сквозными металлизированными отверстиями, и, как следствие, повышение надежности ГИС СВЧ.

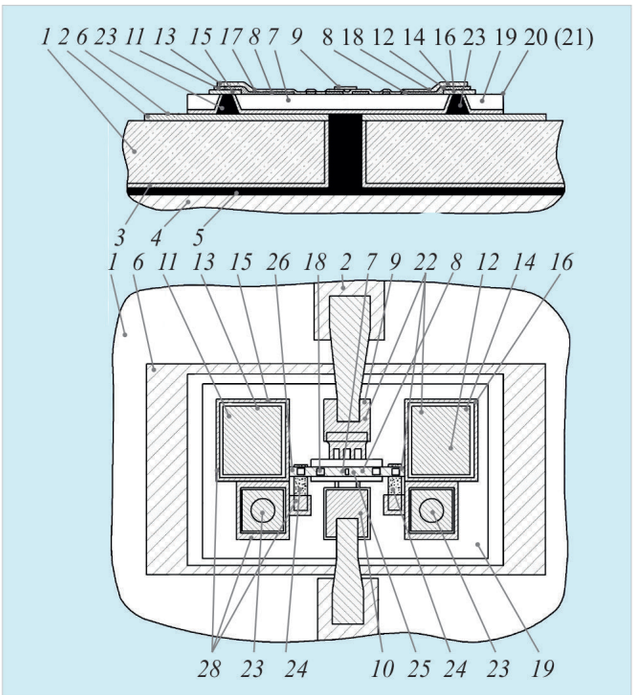


Рис. 3. Конструкция фрагмента ГИС с разработанной МИС, в котором резистивный элемент выполнен пленочным на лицевой поверхности единого кристалла МИС:

1 – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизационного покрытия; *3* – экранное заземляющее металлизационное покрытие; *4* – металлическое теплоотводящее основание; *5* – электро- и теплопроводящее вещество; *6* – металлизированная посадочная площадка; *7* – ПТШ; *8*…*10* – выводы – электроды транзистора (исток, затвор, сток соответственно); *11*, *12* – конденсаторы; *13*, *14* и *15*, *16* – верхние и нижние обкладки конденсаторов соответственно; *17*, *18* – электрические соединения одного из выводов транзистора (электрода истока) с верхними обкладками *13*, *14* конденсаторов; *19* – единый кристалл МИС; *20* – полуизолирующая полупроводниковая структура с заданными активными (легированными) слоями *21*; *22* – один слой металлизационного покрытия единого кристалла МИС; *23* – сквозные металлизированные отверстия в едином кристалле МИС; *24* – резистивный элемент; *25* – канал ПТШ; *26* – электрическое соединение одного из концов резистивного элемента с верхней обкладкой одного из конденсаторов; *27* – электрическое соединение другого конца резистивного элемента с нижней обкладкой этого конденсатора; *28* – другой слой металлизационного покрытия единого кристалла МИС

Частные случаи выполнения резистивного элемента пленочным на лицевой поверхности кристалла МИС (см. рис. 3), равно как и в виде легированного слоя в составе полуизолирующей полупроводниковой структуры (рис. 4) с заданными легированными слоями, обеспечивают исключение внутрисхемных достаточно длинных соединительных проводников, имеющих значительные паразитные индуктивности и емкости.

4(527).indd 88 17.12.2015 11:26:35

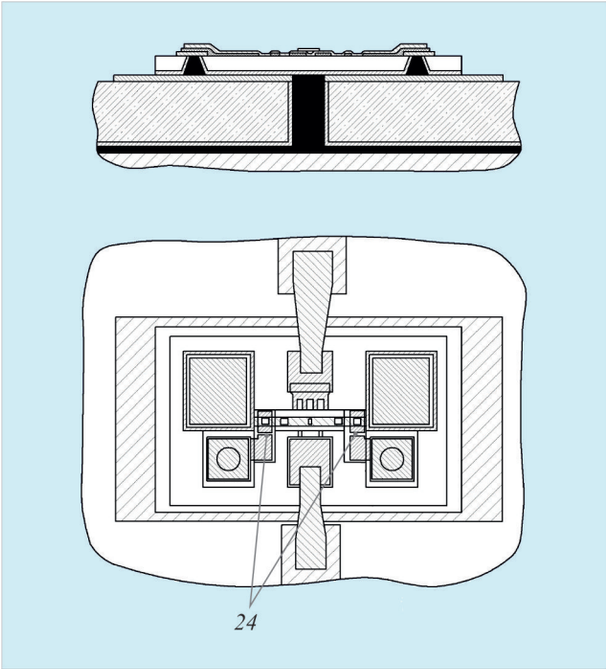


Рис. 4. Конструкция фрагмента ГИС с разработанной МИС, в котором резистивный элемент выполнен на лицевой поверхности единого кристалла МИС:
24 – резистивный элемент, выполненный в виде легированного слоя в составе полупроводниковой структуры

Кроме того, технологические процессы, посредством которых выполняют резистивный элемент, являются на сегодня наиболее оптимизированными и тем самым дополнительно обеспечивают улучшение электрических и массогабаритных характеристик и повышение их воспроизводимости. Указанные математические соотношения в совокупности с другими признаками обеспечивают оптимизацию работы ГИС с точки зрения улучшения электрических характеристик и повышения их воспроизводимости.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментально установлено, что при рабочих токах более 75 мА (что соответствует току насыщения примерно 150 мА) на резистивном элементе рассеивается значительная мощность, что отрицательно сказывается на тепловом режиме работы ПТШ и соответственно единого кристалла МИС. Так, для ПТШ 3П612 с током насыщения 240 мА и напряжением отсечки минус 4 В рабочий ток должен составлять 15…50 % от тока насыщения, то есть быть порядка 36…120 мА.

Таким образом, напряжение на электроде истока ПТШ должно быть 2…3,5 В и соответственно рассеиваемая мощность резистивного элемента $P_{рас}$ при этом составит 126…240 мВт.

Эта дополнительная мощность приведёт к повышению температуры ПТШ и соответственно единого кристалла МИС, а значит, к ухудшению электрических характеристик ГИС и, прежде всего, коэффициента шума и коэффициента усиления. В результате получим улучшение электрических и массогабаритных характеристик и повышение технологичности и надежности ГИС СВЧ-диапазона. На рис. 5 представлена схема ГИС балансного каскада МШУ с двумя МИС разработанной конструкции.

4(527).indd 89 17.12.2015 11:26:36

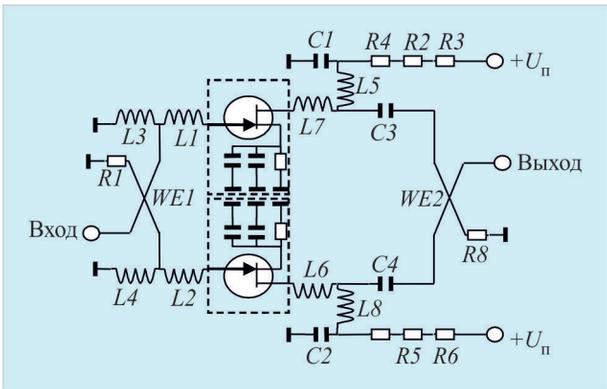


Рис. 5. Электрическая схема ГИС балансного каскада МШУ:

C1 = *C2* = 5…10 пФ – емкости сосредоточенные (ТС7.088.005-22); *R1* = *R8* = 50 Ом (±10 %) – нагрузочный резистор направленного ответвителя; *R2*…*R7* = 25 Ом (±20 %) – резисторы цепи питания стока транзисторов; *L1* = *L2* = 1,5 нГн (±10 %) – фильтры питания затворов транзисторов; *L3* = *L4* = 0,15 нГн (±10 %) – технологическая и согласующая индуктивность затвора транзистора; *L5* = *L6* = 1,1 нГн (±10 %) – технологическая и согласующая индуктивность стока транзистора; *L7* = *L8* = 1,5 нГн (±10 %) – индуктивности фильтров питания стоков транзисторов; *C4* = *C4* = = 5…10 пФ – блокирующая емкость сосредоточенная (ТС7.088.005 22)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация конструкции МИС и ГИС с её использованием позволит в полной мере реализовать улучшение электрических и массогабаритных характеристик и их воспроизводимость, а также повышение технологичности и надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бортовые АФАР // Новости СВЧ-техники. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2006. – № 6. – С. 1 – 4.

2. Набор монолитных схем для АФАР *X*-диапазона // Новости СВЧ-техники. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2006. – № 6. – С. 11 – 12.

3. **Иовдальский, В. А.** Совершенствование конструкции типового фрагмента ГИС СВЧ-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 3 (506) . – С. 25 – 30.

4. **Иовдальский, В. А.** Эволюция конструкции типовых фрагментов ГИС СВЧ-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 4 (489) . – С. 38 – 45.

5. **Заявка 2010154371 РФ.** Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский, В. Г. Виноградов, Л. В. Манченко, В. Е. Земляков, В. Г. Лапин. – Приоритет 29.12.2010.

Статья поступила 24 июля 2015 г

4(527).indd 90 17.12.2015 11:26:36

УДК 621.372.413–42

ВЫБОР РАБОЧЕГО ВИДА КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВ

М. П. Пархоменко, И. С. Еремин, В. М. Колесникова

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Проведен анализ резонаторного метода, использующего прямоугольный резонатор на видах колебаний H_{10p}, при определении малых изменений диэлектрической проницаемости исследуемого вещества. Показано, что наибольшая чувствительность получается для резонатора, работающего на виде колебаний H_{101}.

КС: резонаторный метод, вид колебаний, диэлектрическая проницаемость вещества, миллиметровый диапазон

The analysis of a resonator method using the rectangular resonator on H_{10p} oscillation modes was made while defining small changes of dielectric permeability of the substance under investigation. It was shown that resonator operating on H_{101} oscillation mode had the highest sensitivity.

Keywords: resonator method, oscillation mode, dielectric permeability of the substance, millimeter range

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов широко используются резонаторные методы, одним из достоинств которых является возможность регистрировать малые изменения диэлектрической проницаемости исследуемых материалов. Эта проблема имеет важное значение при исследовании, например, состава крови, водных растворов с малым содержанием глюкозы, соли и т. д. В данной работе для решения этой проблемы предлагается резонаторный метод, построенный на базе резонатора отражательного типа, в котором исследуемый сильно поглощающий материал выполняет роль задней стенки резонатора (рис. 1). В этом случае, используя резонансную зависимость резонатора, а также данные по резонансной частоте и коэффициенту отражения на резонансной частоте, путем решения обратной задачи находятся составляющие ε_1 и ε_2 комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2$ исследуемого материала.

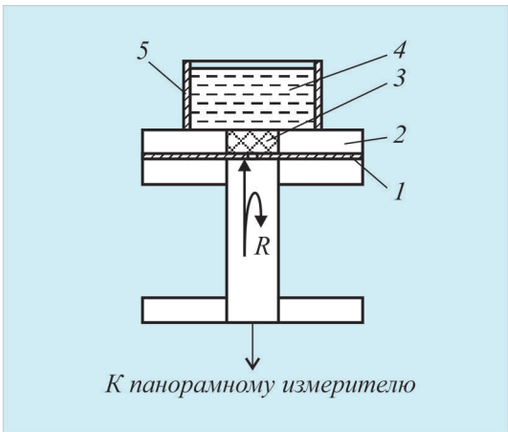


Рис. 1. Резонатор отражательного типа (с подводящим волноводом):

1 – индуктивная диафрагма; *2* – волновод резонатора; *3* – фторопласт; *4* – исследуемый объект в ёмкости *5*; *R* – коэффициент отражения резонатора

Отражательный резонатор с подводящим волноводом, построенный на основе прямоугольного металлического волновода с рабочим типом волны H_{10}, показан на рис. 1. Он включает в себя: индуктивную диафрагму *1*, прямоугольный волновод резонатора *2*, заполненный фторопластом *3*, и исследуемый объект *4*. В данной конструкции исследуемый объект размещен в емкости *5*, которая располагается на волноводе резонатора. Индуктивная диафрагма выполняет роль передней стенки резонатора, а объект

4(527).indd 91 17.12.2015 11:26:36

– задней. В резонаторе используется вид колебаний H_{10p}, где индекс p определяет число полуволн, укладывающихся на длине резонатора l_p.

Далее представим решение важной практической задачи – определить вид колебаний H_{10p} в резонаторе, на котором малые изменения диэлектрической проницаемости вещества (на одинаковую величину) приводят к наибольшим изменениям частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой. Для этого рассчитаем для каждого вида колебаний резонансные кривые резонатора, т. е. зависимости коэффициента отражения R резонатора от частоты f. Расчет произведем для резонатора, нагруженного на *дистиллированную воду* при температурах 37 и 36 °С в миллиметровом диапазоне волн (в диапазоне частот 30,5… 31,5 ГГц). Значения составляющих комплексной диэлектрической проницаемости воды возьмем из [1]. Все расчеты проводились с использованием трехмерного электродинамического программного пакета HFSS.

Сначала рассчитаем резонансные кривые при температуре воды 37 °С. На частоте 30,71 ГГц при этой температуре составляющие диэлектрической проницаемости воды равны: $\varepsilon_1 = 33{,}0127$, $\varepsilon_2 = 33{,}7927$ [1]. Волновод имеет поперечные размеры $a \times b = 7{,}11 \times 3{,}56$ мм. Толщина медной индуктивной диафрагмы составляет 0,28 мм, ее поперечные размеры раскрыва обозначим как $a_1 \times b_1$; причем $b_1 = b = 3{,}56$ мм. Диэлектрическая проницаемость фторопласта равна 2,04; тангенс угла потерь – $2{,}5 \cdot 10^{-4}$. Расчет проведем для трех длин l_p резонатора, а именно, когда на длине резонатора укладывается одна, три и семь полуволн (т. е. $p = 1; 3; 7$).

Для случая $p = 1$ (вид колебаний H_{101}) зададим длину резонатора 3,00 мм. Изменяя размер раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы, рассчитаем для каждого размера резонансные кривые и определим режим критической связи. Расчетные резонансные кривые резонатора для трех режимов его работы (критической связи, а также недосвязи и пересвязи по уровням минимумов коэффициента отражения минус 30 и 40 дБ) представлены на рис. 2. Критическая связь наблюдается при $a_1 = 3{,}476$ мм на частоте 30,8490 ГГц, минимум коэффициента отражения составляет минус 60,1016 дБ. В табл. 1 собраны данные по каждой расчетной резонансной кривой. Здесь a_1 – ширина раскрыва диафрагмы, f_{min} – частота минимума и R_{min} – значение коэффициента отражения резонатора в минимуме резонансной кривой.

Для случая $p = 3$ (вид колебаний H_{103}) вначале определялась длина резонатора. Для этого устанавливался фиксированный размер раскрыва диафрагмы $a_1 = 3{,}476$ мм (т. е. равный размеру в случае критической связи при $p = 1$) и путем изменения длины резонатора находился режим

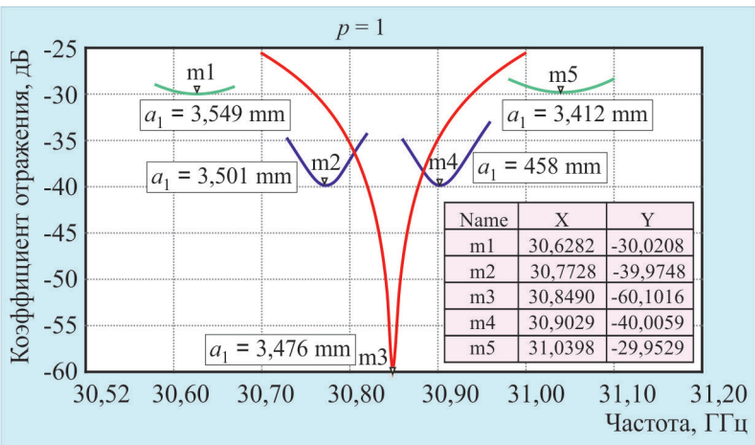


Рис. 2. Расчетные резонансные кривые резонатора для случая $p = 1$ при различных размерах раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы ($b_1 = 3{,}56$ мм, $t = 37$ °С)

4(527).indd 92 17.12.2015 11:26:36

Таблица 1

p = 1 (вид колебаний H_{101}), l_p = 3,00 мм		
a_1, мм	f_{min}, ГГц	R_{min}, дБ
3,549	30,6282	-30,0208
3,501	30,7728	-39,9748
3,476	**30,8490**	**-60,1016**
3,458	30,9029	-40,0059
3,412	31,0398	-29,9529

критической связи. Режим критической связи обнаружился при длине резонатора 10,71 мм на частоте минимума резонансной кривой 30,9287 ГГц, коэффициент отражения составил минус 65,3505 дБ. После этого фиксировалась длина резонатора и рассчитывались резонансные зависимости при размерах a_1 диафрагмы в режимах недосвязи и пересвязи. Графики этих зависимостей при критической связи, а также в режимах недосвязи и пересвязи по уровням минимумов коэффициента отражения минус 30 и 40 дБ показаны на рис. 3. В табл. 2 представлены данные по этим расчетным резонансным кривым.

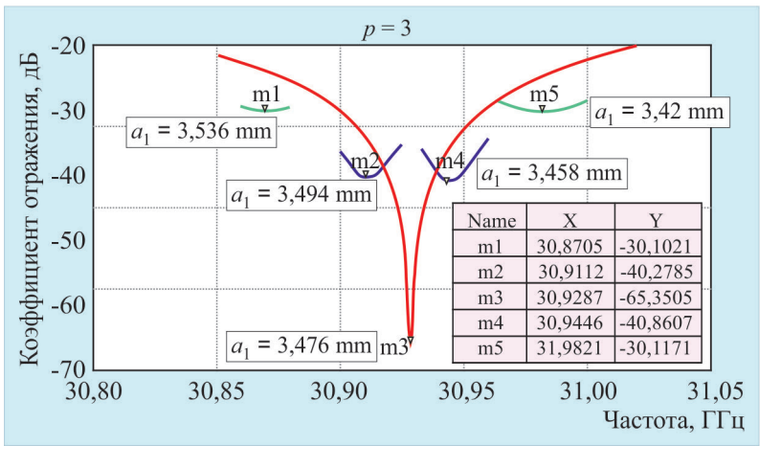


Рис. 3. Расчетные резонансные кривые резонатора для случая p = 3 при различных размерах раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы (b_1 = 3,56 мм, t = 37 °С)

Таблица 2

p = 3 (вид колебаний H_{103}), l_p = 10,71 мм		
a_1, мм	f_{min}, ГГц	R_{min}, дБ
3,536	30,8705	-30,1021
3,494	30,9112	-40,2785
3,4760	**30,9287**	**-65,3505**
3,458	30,9446	-40,8607
3,420	30,9821	-30,1171

Аналогично проводились расчеты для случая p = 7 (вид колебаний H_{107}). При фиксированном размере a_1 = 3,476 мм диафрагмы путем изменения длины резонатора находился режим критической связи. Критическая связь наблюдалась при длине резонатора 25,953 мм на часто-

4(527).indd 93 17.12.2015 11:26:37

на частоте минимума резонансной кривой 31,1088 ГГц, коэффициент отражения составил минус 83,4390 дБ. Затем, как и в предыдущем случае, фиксировалась длина резонатора и рассчитывались резонансные зависимости при размерах a_1 диафрагмы в режимах недосвязи и пересвязи. Графики этих зависимостей показаны на рис. 4, а в табл. 3 приведены данные по этим расчетным резонансным кривым.

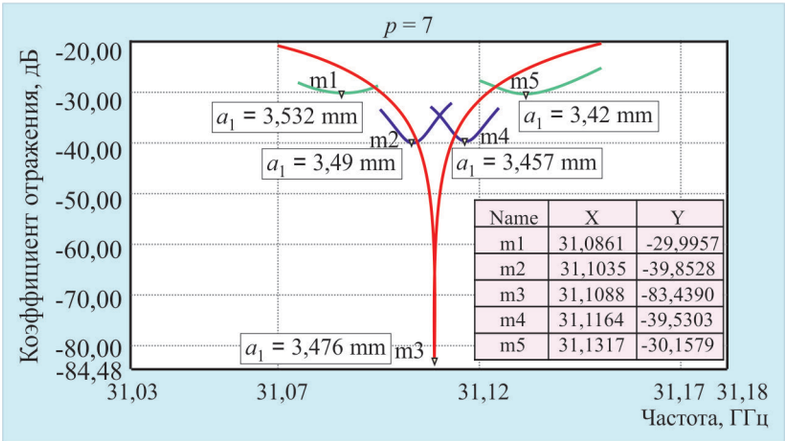


Рис. 4. Расчетные резонансные кривые резонатора для случая $p = 7$ при различных размерах раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы ($b_1 = 3{,}56$ мм, $t = 37$ °С)

Таблица 3

$p = 7$ (вид колебаний H_{107}), $l_p = 25{,}953$ мм		
a_1, мм	f_{min}, ГГц	R_{min}, дБ
3,532	31,0861	-29,9957
3,490	31,1035	-39,8528
3,476	**31,1088**	**-83,4390**
3,457	31,1164	-39,5303
3,420	31,1317	-30,1579

Далее рассчитывались резонансные зависимости каждого резонатора, нагруженного на дистиллированную воду, при температуре 36 °С. Для каждого случая длина l_p резонатора и размеры раскрыва a_1 диафрагмы оставались такими же, как и при температуре 37 °С. Диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 36 °С на частоте 30,71 ГГц равна: $\varepsilon_1 = 32{,}4964$; $\varepsilon_2 = 33{,}8090$ [1]. Затем, сравнивая резонансные зависимости при температурах растворов 36 и 37 °С, находились изменения частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансных кривых. Как сказано выше, основная цель этого исследования заключалась в том, чтобы определить вид колебаний H_{10p} резонатора (т. е. фактически длину l_p резонатора в диапазоне частот 30,5…31,5 ГГц), на котором изменения частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой будут наибольшими при изменении диэлектрической проницаемости исследуемого вещества на одинаковую величину. Обратимся к полученным результатам.

4(527).indd 94 17.12.2015 11:26:37

Вначале проведем сравнение резонансных зависимостей на полуволновом резонаторе (т. е. $p = 1$, вид колебаний H_{101}) в режиме недосвязи. На рис. 5 представлены расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на дистиллированную воду при температурах поочередно 36 и 37 °С. Длина резонатора $l_p = 3{,}0$ мм, размер диафрагмы $a_1 = 3{,}412$ мм.

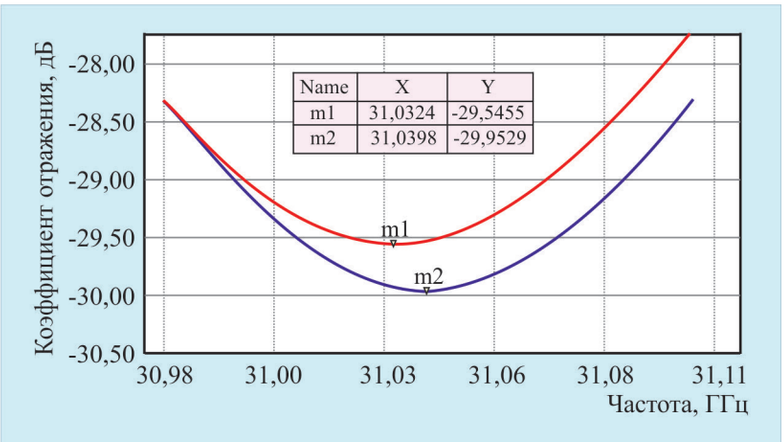


Рис. 5. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ ($p = 1$) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) ($l_p = 3{,}0$ мм, $a_1 \times b_1 = 3{,}412 \times 3{,}56$ мм)

При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,0324 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 29,5455 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,0398 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 29,9529 дБ. Мы видим, что в этом случае при изменении температуры воды на один градус смещение резонансной частоты минимума составило $\Delta f_{min1} = 7{,}4$ МГц, а изменение коэффициента отражения равно $\Delta R_{min1} = 0{,}4074$ дБ.

А теперь проведем сравнение резонансных кривых по уровню минус 40 дБ. Расчетные резонансные кривые резонатора показаны на рис. 6 (режим недосвязи: $p = 1$, $l_p = 3{,}0$ мм, $a_1 = 3{,}458$ мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,8955 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 38,7657 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9029 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 40,0059 дБ. В этом случае при изменении температуры воды на один градус $\Delta f_{min1} = 7{,}4$ МГц, а $\Delta R_{min1} = 1{,}2402$ дБ.

А теперь сравним резонансные зависимости этого резонатора в режиме пересвязи. На рис. 7 представлены расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С (режим пересвязи: $p = 1$, $l_p = 3{,}0$ мм, $a_1 = 3{,}549$ мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,6209 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 30,4480 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,6282 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,0208 дБ. Как видно из графиков, при изменении температуры воды на один градус $\Delta f_{min1} = 7{,}3$ МГц, а $\Delta R_{min1} = 0{,}4272$ дБ.

4(527).indd 95 17.12.2015 11:26:37

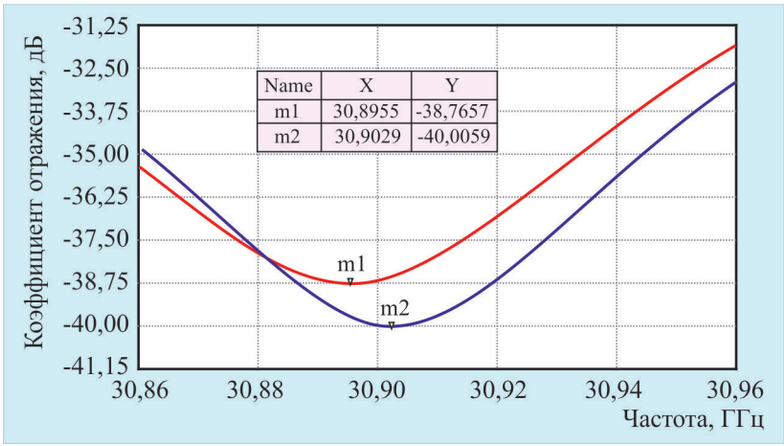


Рис. 6. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 1) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 3,0 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,458 × 3,56 мм)

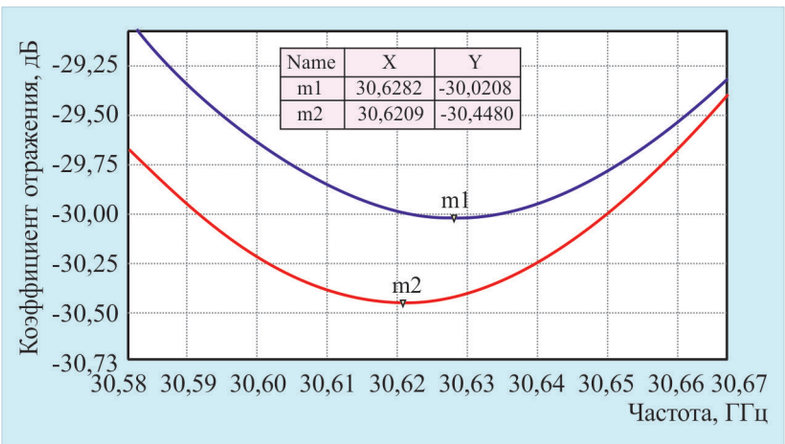


Рис. 7. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 1) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 3,0 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,549 × 3,56 мм)

На рис. 8 приведены расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (режим пересвязи: p = 1, l_p = 3,0 мм, a_1 = 3,501 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,7655 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 41,3873 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,7728 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 39,9748 дБ.

В этом случае при изменении температуры воды на один градус Δf_{min1} = 7,3 МГц, а ΔR_{min1} = = 1,4125 дБ.

Теперь обратимся к резонатору на три полуволны (т. е. p = 3, вид колебаний H_{103}) и проведем сравнение резонансных зависимостей вначале в режиме недосвязи, а затем – пересвязи.

4(527).indd 96 17.12.2015 11:26:37

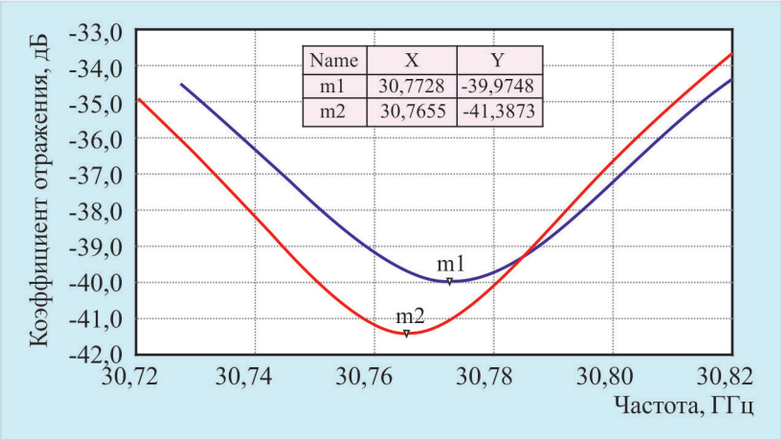


Рис. 8. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 1) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 3,0 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,501×3,56 мм)

Расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С, представлены на рис. 9 (режим недосвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,42 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,9796 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 29,7560 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9821 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,1171 дБ. В этом случае при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,5 МГц, а ΔR_{min3} = 0,3611 дБ.

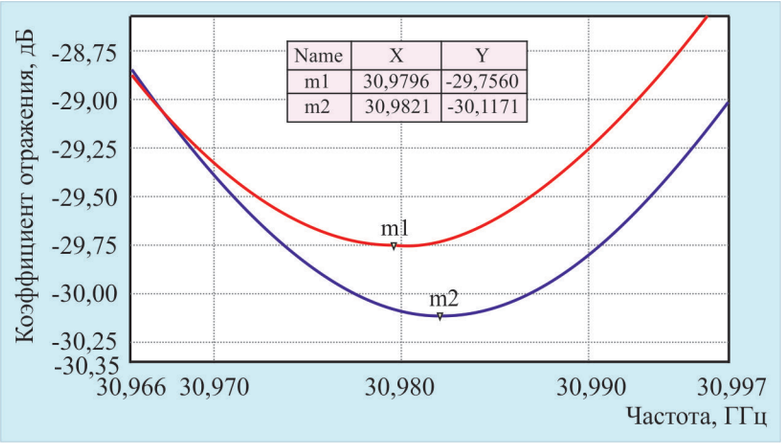


Рис. 9. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 3) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,695 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,42 × 3,56 мм)

Расчетные резонансные кривые резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ приведены на рис. 10 (режим недосвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,458 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,9422 ГГц, а значение

4(527).indd 97 17.12.2015 11:26:38

коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 39,6889 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9446 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 40,8607 дБ. Как видно из графиков, при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,4 МГц, а ΔR_{min3} = 1,1718 дБ.

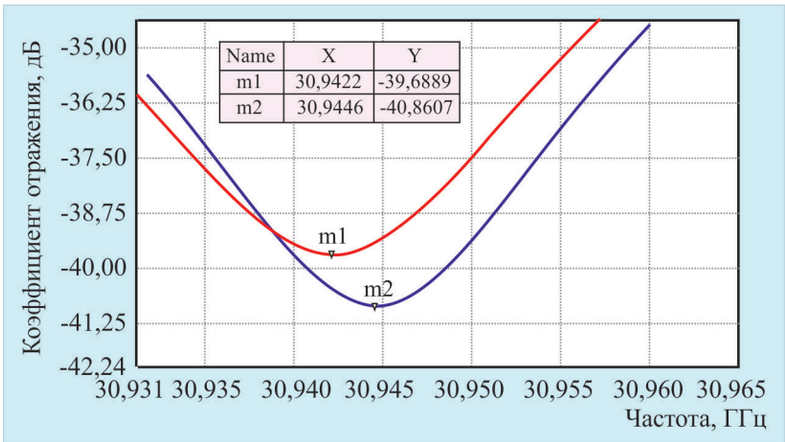


Рис. 10. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 3) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,71 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,458 × 3,56 мм)

В режиме пересвязи расчетные резонансные зависимости этого резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ показаны на рис. 11 (режим пересвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,536 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,8680 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 30,4699 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,8705 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,1021 дБ. В этом случае при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,5 МГц, а ΔR_{min3} = 0,3678 дБ.

На рис. 12 приведены резонансные кривые резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (режим пересвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,494 мм). Как видно из графиков, при температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,9087 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 41,5488 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9112 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 40,2785 дБ. Здесь при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,5 МГц, а ΔR_{min3} = 1,2703 дБ.

И наконец, рассмотрим резонатор, на длине которого укладывается семь полуволн (т. е. p = 7, вид колебаний H_{107}), и проведем сравнение его резонансных зависимостей вначале в режиме недосвязи, а затем пересвязи. Расчетные резонансные кривые резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С, приведены на рис. 13 (режим недосвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,42 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,1306 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 29,8080 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,1317 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,1579 дБ. Изменение температуры воды на один градус приводит

4(527).indd 98 17.12.2015 11:26:38

к смещению резонансной частоты минимума на Δf_{min7} = 1,1 МГц и изменению коэффициента отражения на ΔR_{min7} = 0,3499 дБ.

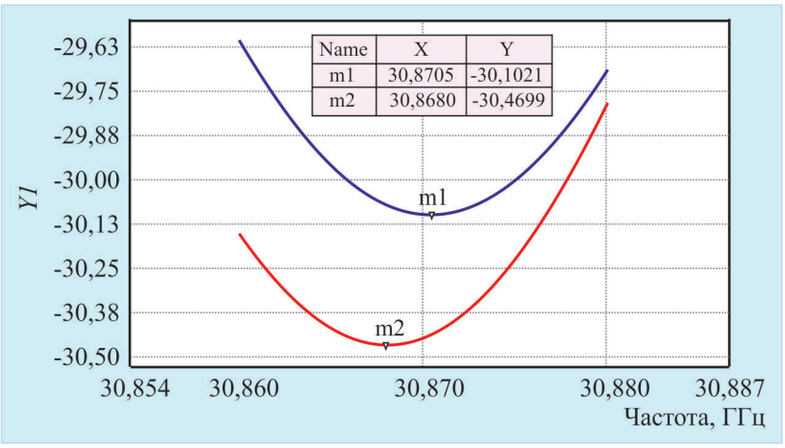


Рис. 11. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 3) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,71 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,536 × 3,56 мм)

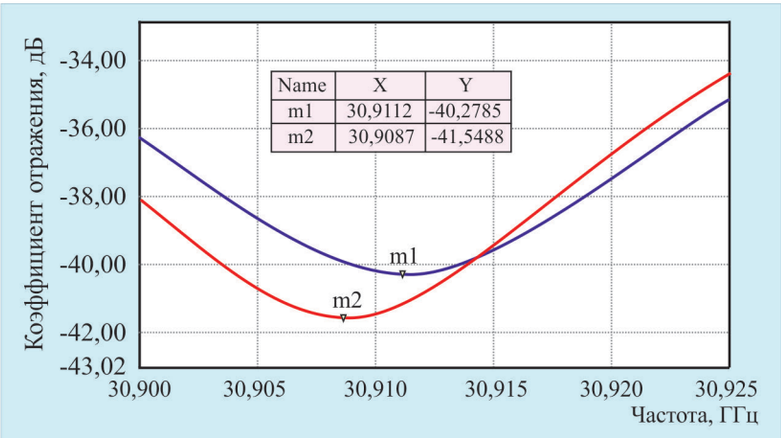


Рис. 12. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 3) при температуре воды 36(красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,71 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,494 × 3,56 мм)

По уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ расчетные резонансные кривые приведены на рис. 14 (режим недосвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,457 мм).

При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,1153 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 38,5870 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,1164 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 39,5703 дБ. Здесь при изменении температуры воды на один градус Δf_{min7} = 1,1 МГц, а ΔR_{min7} = = 0,9433 дБ.

4(527).indd 99 17.12.2015 11:26:38

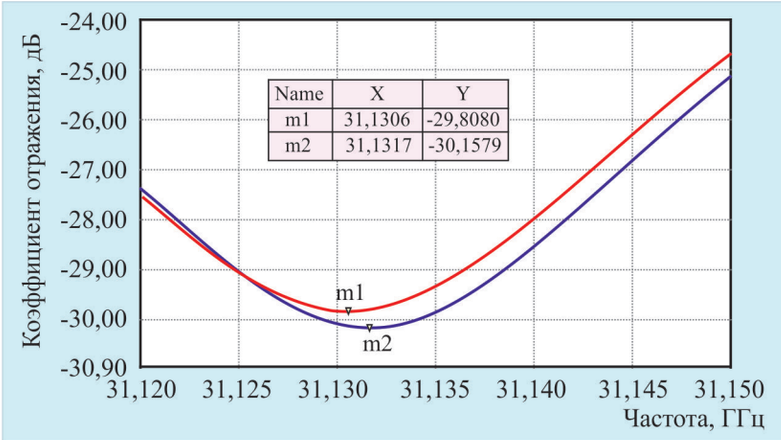


Рис. 13. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 7) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,42 × 3,56 мм)

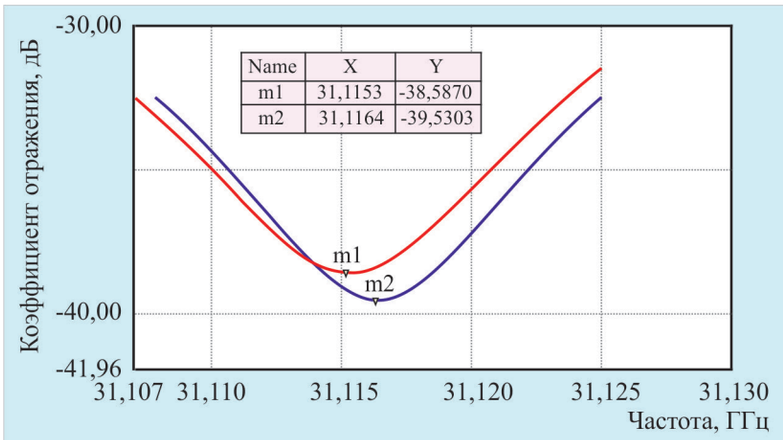


Рис. 14. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 7) при температуре воды 36(красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,457 × 3,56 мм)

В режиме пересвязи расчетные резонансные кривые этого резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С, приведены на рис. 15 (режим пересвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,532 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,0850 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 30,3531 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,0861 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 29,9957 дБ. При изменении температуры воды на один градус Δf_{min7} = 1,1 МГц, а ΔR_{min7} = 0,3574 дБ.

4(527).indd 100 17.12.2015 11:26:39

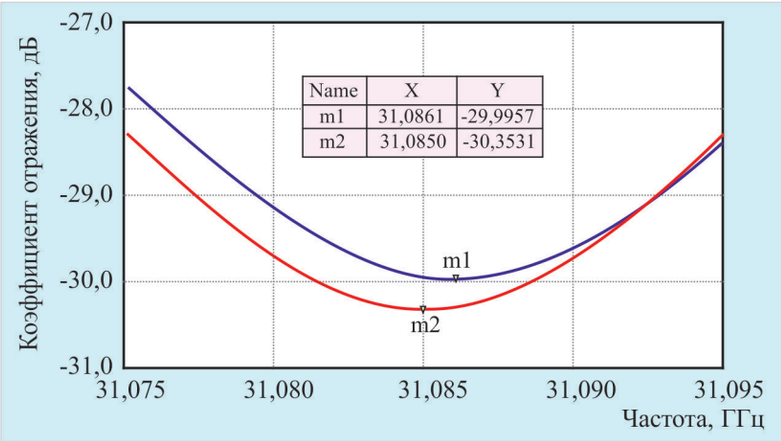


Рис. 15. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 7) при температуре воды 36 (синяя кривая) и 37 °С (красная) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,532 × 3,56 мм)

Расчетные зависимости этого резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ представлены на рис. 16 (режим пересвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,49 мм). При температуре 37 °С частота минимума равнялась 31,1035 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 39,8528 дБ. При температуре 36 °С частота минимума – 31,1024 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 41,0418 дБ. Здесь при изменении температуры воды на один градус Δf_{min7} = 1,1 МГц, а ΔR_{min7}= = 1,189 дБ.

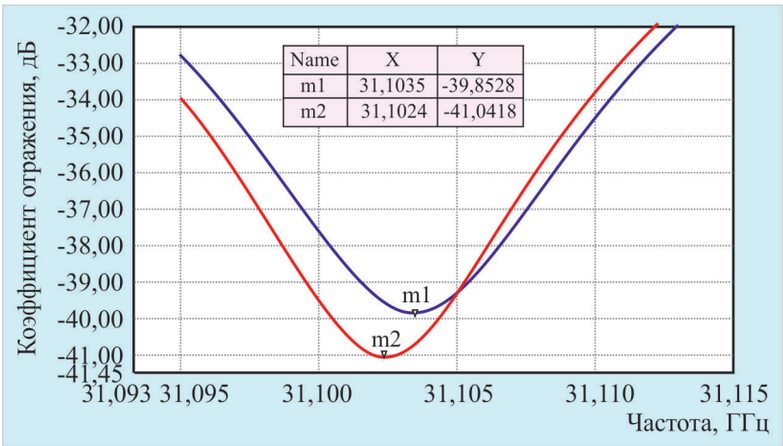


Рис. 16. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 7) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,49 × 3,56 мм)

Сведем полученные результаты по изменениям частоты Δf_{min} резонансных минимумов и коэффициентов отражения ΔR_{min} в минимумах резонансных кривых для каждого вида колебаний в одну таблицу (табл. 4) и проанализируем их. В проведенных расчетах при повышении

4(527).indd 101 17.12.2015 11:26:39

температуры воды на один градус действительная составляющая ε_1 ее диэлектрической проницаемости возрастает на 1,6 %, а мнимая ε_2 уменьшается на 0,05 %. Из табл. 4 видно, что наибольшие изменения частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой имеет резонатор на одну полуволну (т. е. $p = 1$). Например, в режиме недосвязи по уровню минус 40 дБ для вида колебаний H_{101} изменение частоты резонансного минимума равно 7,4 МГц, а коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой – 1,2402 дБ. Для резонатора, работающего на виде колебаний H_{103}, эти величины уменьшаются до 2,4 МГц и 1,1718 дБ. Для вида колебаний H_{107} эти цифры становятся еще меньше и составляют 1,1 МГц и 0,9433 дБ. Таким образом, в тех практических задачах, где определяются малые изменения диэлектрической проницаемости исследуемого вещества, надо использовать прямоугольный резонатор, работающий на виде колебаний H_{101}.

Таблица 4

Тип колебаний в резонаторе	Уровень минимума коэффициента отражения R_{min}, дБ	Изменения частоты Δf_{min} минимумов и коэффициентов отражения ΔR_{min} в минимумах резонансных зависимостей			
		Недосвязь		Пересвязь	
		Δf_{min}, МГц	ΔR_{min}, дБ	Δf_{min}, МГц	ΔR_{min}, дБ
H_{101} ($p = 1$)	-30	7,4	0,4074	7,3	0,4272
	-40	7,4	1,2402	7,3	1,4125
H_{103} ($p = 3$)	-30	2,5	0,3611	2,5	0,3678
	-40	2,4	1,1718	2,5	1,2703
H_{107} ($p = 7$)	-30	1,1	0,3499	1,1	0,3574
	-40	1,1	0,9433	1,1	1,189

ЛИТЕРАТУРА

1. **Meisner, T.** The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations / T. Meisner, F. J. Wentz // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 42, No 9, September. – P. 1836 – 1849.

Статья поступила 22 мая 2015 г.

4(527).indd 102 17.12.2015 11:26:39

УДК 621.385.623

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОЩНОГО 26-ЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА

Р. А. Косарев, Б. В. Прокофьев, И. А. Фрейдович

ФГУП "НПП " Торий", г. Москва

Рассмотрены вопросы разработки электродинамической системы многолучевого клистрона, предназначенного для использования в линейных ускорителях, с частотой генерации 5,712 ГГц, выходной импульсной мощностью 3 МВт, средней мощностью 10 кВт при напряжении катода 43 кВ и величине импульсного тока 140 А.

КС: многолучевой клистрон, 5-см диапазон, электродинамическая система, кольцевой резонатор, вывод энергии

The issues of developing electrodynamic system of a multiple-beam klystron designed for using in linear accelerators with oscillation frequency 5.712 GHz, output pulsed power 3 MW, average power 10 kW at cathode voltage 43 kW and pulse current value 140 A.

Keywords: multiple-beam klystron, 5-cm range, electrodynamic system, ring resonator, energy output

Необходимость создания клистрона в 5-см диапазоне обусловлена растущей потребностью в компактных линейных ускорителях. Массогабаритные характеристики улучшаются при росте рабочей частоты. Клистрон планируется использовать в линейном ускорителе на удвоенной стендфордской частоте (5712 МГц), разрабатываемом силами ООО «ЛЭУ МГУ».

С 1986 года НПП «Торий» производит серию компактных пакетированных 40-лучевых клистронов в 10-см диапазоне (КИУ-111, КИУ-147, КИУ-147А, КИУ-168), электродинамическая система которых базируется на кольцевых резонаторах, работающих на основном виде колебаний E_{010}. В такой конструкции зазор взаимодействия имеет форму кольца, по которому на двух концентрических кольцевых рядах расположены пролетные каналы. Конструкция с одним кольцевым рядом пролетных каналов имеет высокий КПД благодаря большей равномерности распределения поля по площади емкостного зазора. Однако рост рабочей частоты приводит к сближению основного вида колебаний с паразитным, согласно формуле

$$\Delta f = f_{E210} - f_{E010} = \frac{c^2}{\pi^2 D^2 (f_{E210} - f_{E010})},$$

где f_{E210} и f_{E010} – частоты видов колебаний E_{210} и E_{010} соответственно; D – диаметр средней линии резонатора.

Из приведенной формулы следует, что разница по частоте между рабочим и паразитным видами колебаний падает с ростом рабочей частоты. Кроме того, увеличение резонансной частоты приводит к росту радиальной неравномерности СВЧ-поля резонатора в зазоре взаимодействия с двумя рядами пролетных каналов, которая приводит к низкому КПД. Поэтому применение кольцевых резонаторов на виде E_{010} для клистрона в 5-см диапазоне невозможно.

Решением описанных сложностей может быть переход на кольцевые резонаторы на высших

4(527).indd 103 17.12.2015 11:26:39

видах колебаний, в частности на E_{020}. В этом случае по радиусу кольцевого полого резонатора умещается не одна, а две полуволны, а в области двух максимумов электрического поля располагаются два кольцевых зазора взаимодействия разных диаметров (как показано на рис. 1). Помимо них в резонаторе есть три индуктивные кольцевые области: внутренняя, центральная и внешняя. Такая конфигурация позволяет получить значительную однородность поля по сечению пролетного канала, а также максимально отдалиться от паразитных видов колебаний (в данном случае – E_{210} и E_{120}).

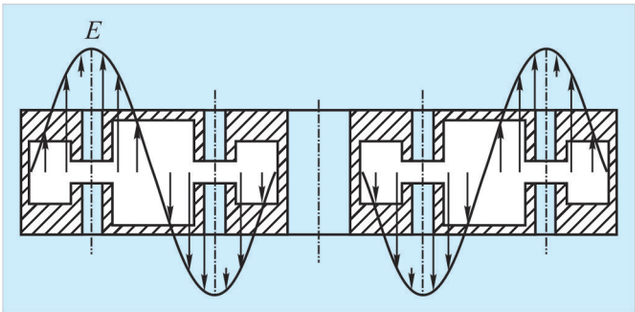


Рис. 1. Распределение электрического поля по диаметру полого резонатора, работающего на виде колебаний E_{020}

Электродинамическая система клистрона проектировалась под конкретный ускоритель. Напряжение катода на установке создается модулятором Scandy-Nova, с выходным напряжением 43 кВ и импульсным током до 180 А. Поэтому напряжение катода выбрано равным 43 кВ. Использование реверсной фокусирующей магнитной системы в клистроне приводит к ограничению первеанса на луч 0,55…0,6 мкА/В$^{3/2}$. Импульсный ток катода должен быть не более 140 А, чтобы обеспечить долговечность катодов. В связи с этим, исходя из первеанса на луч, количество лучей в приборе выбрано равным 26: 8 лучей расположено во внутреннем ряду, 18 – во внешнем. Диаметр средней линии кольцевого внутреннего зазора взаимодействия выбран таким, чтобы на нем уместилось 8 катодов, изготовленных по технологиям предприятия, и составляет 25 мм. Длина средней линии внешнего кольцевого зазора взаимодействия – 56 мм. Ширина емкостных зазоров – 5 мм, что соответствует диаметру пролетного канала (4 мм) с припуском по 0,5 мм с каждой стороны.

Взаимодействие СВЧ-поля с потоком электронов характеризуется характеристическим сопротивлением, величина которого пропорциональна ширине зазора взаимодействия. Длина зазора взаимодействия выбрана равной 4 мм, диаметр пролетного канала – 4 мм. При этом значении характеристическое сопротивление $\rho = 5$ Ом.

Электромагнитное поле в кольцевом резонаторе на виде колебаний E_{020} имеет аксиальную симметрию, то есть равномерно по азимуту. Для максимального КПД прибора требуется равномерность характеристических сопротивлений по сечениям пролетных каналов и равенство их между различными пролетными каналами. Оба свойства обеспечиваются формой резонатора, а точнее, соотношением объемов трех индуктивных областей: внутренней, центральной и внешней.

Высота центральной индуктивной области влияет на частоты вида E_{n10} сильнее, чем на частоты вида E_{n20}, в связи с тем что для первых средняя линия центральной области проходит по максимуму электрического поля, а для вторых – по минимуму, что приводит к различному эф-

4(527).indd 104 17.12.2015 11:26:39

фекту от изменения емкости резонатора. Поэтому, варьируя высоту центральной резонансной области, можно выставить рабочий вид на равном по частоте удалении от ближайших паразитных видов.

Таким образом, работа по проектированию резонаторов для требуемого клистрона свелась к подбору внутренних и внешних диаметров кольцевого резонатора, а также высот трех индуктивных областей, при которых:

– характеристические сопротивления на осях различных пролетных каналов равны;

– характеристические сопротивления по сечению каждого пролетного канала максимально однородны;

– рабочая частота резонатора установлена в районе частоты 5712 МГц;

– паразитные виды колебаний максимально удалены от рабочего.

Оптимизация параметров проводилась при помощи численного моделирования. Конечным итогом оптимизации стали форма и размеры промежуточных резонаторов.

Для выполнения перечисленных условий в резонатор введен дополнительный кольцевой выступ на диаметре, соответствующем нулю электрического поля на виде колебаний E_{020} (рис. 2). В результате создана конструкция резонатора на виде колебаний E_{020}, в которой рабочий вид колебаний удален от паразитных видов на 500 МГц.

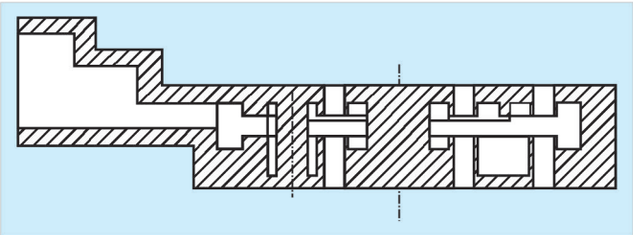


Рис. 2. Выходной кольцевой резонатор (вид E_{020}) в разрезе

Сложной задачей является обеспечение азимутальной равномерности поля в кольцевых резонаторах, связанных с нагрузкой аксиально-несимметричными элементами связи, например щелью или петлей. Необходимо было разработать элементы связи, не нарушающие симметрию поля.

Входной и выходной волноводные тракты сечением 20×40 мм подключены ко входному и выходному резонаторам одинаково: через ввод/вывод энергии и четвертьволновый трансформатор. Щель связи располагается на боковой стенке входного/выходного резонатора. Электромагнитное поле при этом перекашивается из-за внесенной щелью связи реактивности. Чтобы компенсировать это влияние, в центральной индуктивной области резонатора, напротив щели связи, устанавливается закорачивающий штырь (как показано на рис. 2). Азимутальная равномерность поля в резонаторе достигается подбором диаметра и положения штыря [1].

Повышение частоты приводит к дополнительным проблемам при разработке выходных окон вывода энергии сверхмощных клистронов. Уменьшение диаметра керамики окна вывода энергии приводит к возникновению пробоев по поверхности керамики, начинающихся в области охватывающих кольцевых спаев. Для данного клистрона разработан вывод энергии, имеющий минимальное поле на месте спая металла и диэлектрика. Такая структура поля достигается суперпозицией двух видов колебаний, E_{11} и H_{11}, в противофазе (как показано на рис. 3).

4(527).indd 105 17.12.2015 11:26:39

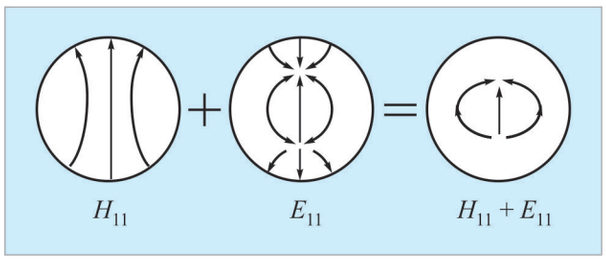


Рис. 3. Принцип сложения полей в окне вывода энергии

Серьезным препятствием для разработки клистронов с пространственно-развитыми резонаторами сложной формы, в особенности работающими на высших видах колебаний или на нескольких видах колебаний, является отсутствие программ расчета взаимодействия полей в резонаторах с неидентичными электронными лучами.

Для создания таких программ необходимы адекватные эквивалентные схемы резонаторов, моделирующие резонатор как многополюсник [2].

В настоящее время ведется работа по созданию эквивалентной схемы кольцевого резонатора на виде колебаний E_{0n0} в виде бесконечной периодической цепочки четырехполюсников [3].

Создание такой эквивалентной схемы позволит:

– определить фазовые и частотные изменения, связанные с подключением аксиально-несимметричной внешней нагрузки;

– подобрать форму элементов связи, компенсирующих эти изменения;

– создать программу для расчета клистронов с неидентичными лучами.

Таким образом, на данный момент закончена разработка эскизной КД, ведется производство деталей, к концу года планируется передача первого макетного образца в НИИЯФ МГУ для испытаний в макетных образцах аппаратуры. По результатам испытаний будет проведена работа по улучшению конструкции клистрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Назаров, С. Н.* Изменение полей и амплитудно-частотных характеристик по углу в нагруженных кольцевых резонаторах / С. Н. Назаров, В. И. Пасманник // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1983. – Вып. 4.

2. *Фрейдович, И. А.* Многолучевые пакетированные клистроны с кольцевыми резонаторами, предназначенные для систем СВЧ-питания электронных ускорителей: дис. канд. физ.-мат. наук / И. А. Фрейдович.

3. *Фрейдович, И. А.* Расчет амплитудно-частотных характеристик кольцевых резонаторов / И. А. Фрейдович, М. Ю. Воробьев, Н. А. Кокорев // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 8. – С. 1013 – 1021.

Статья поступила 30 июня 2015 г.

4(527).indd 106 17.12.2015 11:26:39

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ
статей, опубликованных в течение 2015 г. в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника»

Попов Р.М. – НИИ-160 – фронту. – Вып. 1 (524). – С. 6–20.

I. Антенны

1. *Перов В.В.* – Антенна двойной круговой поляризации СВЧ-локатора малой дистанции. – Вып. 1 (524). – С. 68–73.

II. Катоды и материалы

1. *Ли И.П., Петров В.С., Прокофьева Т.В., Леденцова Н.Е., Шуманов А.В., Силаев А.Д., Поляков В.С., Капустин В.И., Свитов В.И.* – Структура электронных уровней кислородных вакансий в оксиде бария. – Вып. 2 (525). – С. 45–58.

III. Краткие сообщения

1. *Балыко А.К., Балыко И.А.* – Колебательное движение электрона в кулоновском поле. – Вып. 2 (525). – С. 71–79.

IV. Медицинская электроника

1. *Ашанин И.А.* – Численное моделирование динамики пучка протонов в сверхпроводящем линейном ускорителе для протонной лучевой терапии. – Вып. 1 (524). – С. 74–79.

2. *Казаринов К.Д., Маречек С.В., Полников И.Г.* – Вопросы измерения поглощенной мощности микроволнового излучения в биофизическом эксперименте. – Вып. 2 (525). – С. 59–70.

V. Радиоэлектронные устройства

1. *Дроздов А.А.* – Модель СВЧ-локатора малой дальности и фиксированной дистанции. – Вып. 2 (525). – С. 37–44.

VI. Твердотельная электроника

1. *Андросов А.В., Куприянов П.В., Гутенко С.В., Лебедев К.В., Петров С.А., Кожин Е.С.* – Приёмопередающий модуль цифрового радиолокатора 8-мм диапазона длин волн. – Вып. 1 (524). – С. 21–28.

2. *Буторин В.М.* – Моделирование электродинамической системы генератора на кольцевом полупроводниковом диоде. – Вып. 1 (524). – С. 29–39.

3. *Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М., Городецкий А.Ю., Трофимов А.А., Епифанцев А.А., Киселева Е.В.* – Исследование мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона длин волн на нитридгаллиевых транзисторах. – Вып. 2 (525). – С. 4–20.

4. *Ющенко А.Ю., Айзенштат Г.И., Пласкеев А.А., Безрук А.В., Иващенко А.И., Фролова У.М., Федотова Ф.И.* – Контактные устройства для зондовых измерений СВЧ нитридгаллиевых усилителей мощности в импульсном режиме. – Вып. 1 (524). – С. 40–46.

4(527).indd 107 17.12.2015 11:26:40

VII. Труды научно-технической конференции АО "НПП "Исток" им. Шокина" "СВЧ-электроника, 2015. Наука. Технология. Производство"

(13–14 мая 2015 года, г. Фрязино)

1. *Азов Г.А., Ганеев Э.Р., Хриткин С.А.* – Проектирование и разработка спиральной ЛБВ сантиметрового диапазона с мощностью 400 Вт. – Вып. 3 (526). – С. 15–21.

2. *Бажанов А.С., Дутышев И.Н., Скопин В.И., Захаров А.И.* – Радары для обнаружения живых людей за стенами. – Вып. 3 (526). – С. 56–64.

3. *Бажанов А.С., Некрасов С.С., Матвеев В.И., Москаль В.И.* – Система радиолокационной диагностики. – Вып. 3 (526). – С. 65–73.

4. *Галина Н.М., Дюбуа Б.Ч., Литвинюк И.Ю., Поливникова О.В., Соколов А.М., Ткаченко О.Н.* – Возможные причины нестабильности сигнала атомно-лучевой трубки в системе «ГЛОНАСС-М». – Вып. 4 (527). – С. 8–13.

5. *Григорьев А.Д., Иванов А.С., Ильин В.А., Лучинин В.В., Титов В.Н.* – Проектирование лампы бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов». – Вып. 4 (527). – С. 28–34.

6. *Григорьев А.Д., Морозов С.Н.* – Проектирование усилительного клистрона *W*-диапазона». – Вып. 4 (527). – С. 22–27.

7. *Данилин Н.С., Булаев И.Ю., Бражников М.А., Соловьев М.К.* – Модернизация космической электронной инфраструктуры на основе альянса систем частного применения кристаллов в корпусе». – Вып. 4 (527). – С. 41–49.

8. *Журавлев К.С., Гуляев Д.В., Бакаров А.К., Торопов А.И., Протасов Д.Ю., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю.* – Свойства DA-pHEMT AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктур для мощных СВЧ-транзисторов. – Вып. 4 (527). – С. 35–41.

9. *Иванов И.М., Ефремова М.В., Скрипкин Н.И., Вагин А.И., Ходатаев К.В.* – Расчет и экспериментальное исследование сумматора мощности магнетронов 3-мм диапазона с выводом энергии в свободное пространство тремя когерентными излучателями. – Вып. 3 (526). – С. 22–26.

10. *Иовдальский В.А., Виноградов В.Г., Манченко Л.В., Земляков В.Е., Лапин В.Г.* – Совершенствование конструкции ГИС малошумящего усилителя СВЧ-диапазона. – Вып. 4 (527). – С. 85–90.

11. *Иовдальский В.А., Дудинов К.В., Давронов С.К.* – Выводная рамка для многокристального полупроводникового прибора СВЧ. – Вып. 4 (527). – С. 70 –73.

12. *Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.Г., Гринберг Д.С.* – Многокристальный составной ПТШ для ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазон. – Вып. 4 (527). – С. 74–76.

13. *Иовдальский В.А., Манченко Л.В.* – Дальнейшее совершенствование конструкции внутрисхемных соединений ГИС СВЧ-диапазона. – Вып. 4 (527). – С. 77–84.

14. *Иовдальский В.А., Манченко Л.В., Давронов С.К.* – Совершенствование геометрии плоских выводов кристаллов компонентов ГИС СВЧ-диапазона. – Вып. 4 (527). – С. 67–70.

15. *Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Трегубов В.Б., Молдованов Ю.И., Коцюба А.М., Гринберг Д.С.* – Улучшение характеристик ГИС выходного каскада усилителя мощности СВЧ-диапазона. – Вып. 4 (527). – С. 63–67.

16. *Каргин А.Н., Морозов О.А., Морозов А.О., Савенко Г.П., Симоненко А.Н., Федотов В.В.* – Электронная оптика современных магнетронов. – Вып. 3 (526). – С. 27–35.

17. *Каргин А.Н., Соколов А.М.* – Взаимодействие кислорода с поверхностью оксидного катода в магнетроне. – Вып. 4 (527). – С. 13–22.

18. *Ключевская Ю.Д.* – Компактный ускоритель электронов с рабочей частотой 27 ГГц. – Вып. 3 (526). – С. 111–118.

4(527).indd 108 17.12.2015 11:26:40

19. *Косарев Р.А., Прокофьев Б.В., Фрейдович И.А.* – Электродинамическая система мощного 26-лучевого клистрона. – Вып. 4 (527). – С. 103–106.

20. *Котов А.С., Мелешкевич П.М., Закурдаев А.Д., Востров М.С., Поляков А.В., Хромов А.В., Захаров С.М., Моторин В.П., Полякова В.М., Шипило Е.М., Гришина Е.А., Харабадзе Э.Т., Левашов Н.И.* – Состояние и перспективы развития малогабаритных бортовых твердотельно-вакуумных СВЧ комплексированных изделий. – Вып. 3 (526). – С. 90–110.

21. *Курочкин А.А., Боженова Н.С.* – Оптимизация процессов токарной обработки молибдена. – Вып. 3 (526). – С. 41–47.

22. *Мирошник П.С., Чепурных И.П.* – Проектирование малоэлементной волноводно-щелевой резонансной антенны. – Вып. 3 (526). – С. 52–56.

23. *Налогин А.Г., Кузнецов И.С., Попов Р.Н.* – Совершенствование технологии изготовления поликристаллических ферритов для СВЧ-приборов. – Вып. 3 (526). – С. 77–81.

24. *Пархоменко М.П., Еремин И.С., Колесникова В.М.* – Выбор рабочего вида колебаний прямоугольного резонатора при определении малых изменений диэлектрической проницаемости веществ. – Вып. 4 (527). – С. 91–102.

25. *Пашков А.Н., Терешенок А.П., Курдогло Е.Д., Налогин А.Г., Зубков Н.П., Потапов С.Н., Анисимов И.А., Калинин А.С.* – Некоторые особенности изготовления облегченных теплоотводящих оснований из композиционного материала SiC–Al для субмодулей АФАР. – Вып. 3 (526). – С. 81–89.

26. *Пугнин В.И., Юнаков А.Н., Евсеев С.В.* – Модернизация конструкции мощного клистрона S-диапазона с целью увеличения рабочей полосы частот и выходной мощности. – Вып. 3 (526). – С. 48–52.

27. *Пчелин В.А., Трегубов В.Б., Корчагин И.П., Далингер А.Г., Манченко Л.В., Красник В.А., Малыщик В.М.* – Гибридно-интегральные малогабаритные усилители мощности. – Вып. 4 (527). – С. 57–62.

28. *Саблин В.М., Фрейдович И.А., Акимов П.И., Невский П.В., Терентьев Д.А., Фролов И.С.* – Результаты проектирования ЭОС мощного 26-лучевого клистрона. – Вып. 3 (526). – С. 36–41.

29. *Федоров В.В., Горбунов А.В.* – Пассивные электронные компоненты. Современные направления развития в ОАО "НИИ "Феррит-Домен". – Вып. 3 (526). – С. 11–14.

30. *Шалин Т.И., Федонин Ю.А.* – Приемопередающий модуль АФАР 2-см диапазона длин волн. – Вып. 3 (526). – С. 74–76.

31. *Шахрай В.И., Перегонов С.А., Лисицын А.А., Никитин С.В.* – Особенности построения аппаратуры передачи данных трансляционно-командных систем наведения подвижных объектов. – Вып. 3 (526). – С. 4–10.

32. *Щитов А.М., Дюков Д.И., Чеченин Ю.И.* – Широкополосные умножители частоты КВЧ-диапазона на интегральных диодных микросборках. – Вып. 4 (527). – С. 50–57.

VIII. Электровакуумные приборы

1. *Азов Г.А., Ефремова М.В., Хриткин С.А.* – Оценка конструктивных параметров основных узлов импульсной ЛБВ *W*-диапазона с выходной мощностью не менее 30 Вт. – Вып. 1 (524). – С. 47–53.

2. *Бакунин Г.В., Батраков А.А., Галдецкий А.В., Натура И.П., Ракова Е.А., Сапрынская Л.А., Соколова И.М., Чепурных И.П.* – Многолучевая "прозрачная" ЛБВ миллиметрового диапазона. – Вып. 1 (524). – С. 54–67.

3. *Геворкян В.М., Перевезенцев С.А.* – Сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры *L*…*C*-диапазонов для трактов со средней мощностью до 100 Вт. – Вып. 2 (525). – С. 30–36.

4. *Лопин М.И., Галдецкий А.В.* – Достоинства и недостатки многолучевых конструкций ЭВП О-типа. – Вып. 2 (525). – С. 21–29.

4(527).indd 109 17.12.2015 11:26:40

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ
авторов, опубликовавших свои работы в “СВЧ-технике” – первой серии научно-технического сборника “Электронная техника” в течение 2015 г.

Цифры, стоящие рядом с фамилией автора, показывают: первая (римская) – номер раздела тематического указателя, в котором помещена статья, вторая (арабская) – порядковый номер статьи в соответствующем разделе.

Азов Г.А. VII.1; VIII.1
Айзенштат Г.И. VI.4
Акимов П.И. VII.28
Андросов А.В. VI.1
Анисимов И.А. VII.25
Ашанин И.А. IV.1
Бажанов А.С. VII.2, 3
Бакаров А.К. VII.8
Бакунин Г.В. VIII.2
Балыко А.К. III.1
Балыко И.А. III.1
Батраков А.А. VIII.2
Безрук А.В. VI.4
Бер Б.Я. VII.8
Боженова Н.С. VII.21
Бражников М.А. VII.7
Булаев И.Ю. VII.7
Буторин В.М. VI.2
Вагин А.И. VII.9
Виноградов В.Г. VII.10
Востров М.С. VII.20
Галдецкий А.В. VIII.2, 4
Галина Н.М. VII.4
Ганеев Э.Р. VIII.1
Геворкян В.М. VIII.3
Горбунов А.В. VII.29
Городецкий А.Ю. VI.3
Григорьев А.Д. VII.5, 6
Гринберг Д.С. VII.12, 15
Гришина Е.А. VII.20
Гуляев Д.В. VII.8
Гутенко С.В. VI.1
Давронов С.К. VII.11, 14
Далингер А.К. VII.27
Данилин Н.С. VII.7
Дроздов А.А. V.1
Дудинов К.В. VI.3; VII.11
Дутышев И.Н. VII.2
Дюбуа Б.Ч. VII.4
Дюков Д.И. VII.32
Евсеев С.В. VII.26
Емельянов А.М. VI.3
Епифанцев А.А. VI.3
Еремин И.С. VII.24
Ефремова М.В. VII.9; VIII.1
Журавлев К.С. VII.8
Закурдаев А.Д. VII.20
Захаров А.И. VII.2
Захаров С.М. VII.20
Земляков В.Е. VII.10
Зубков Н.П. VII.25
Иванов А.С. VII.5
Иванов И.М. VII.9
Иващенко А.И. VI.4
Ильин В.А. VII.5
Иовдальский В.А. VII.10–15
Казанцев Д.Ю. VII.8
Казаринов К.Д. IV.2
Калинин А.С. VII.25
Капустин В.И. II.1
Каргин А.Н. VII.16, 17
Киселева Е.В. VI.3
Ключевская Ю.Д. VII.18
Кожин Е.С. VI.1
Колесникова В.М. VII.24
Корчагин И.П. VII.27
Косарев Р.А. VII.19
Котов А.С. VII.20
Коцюба А.М. VII.15
Красник В.А. VII.27
Кузнецов И.С. VII.23
Куприянов П.В. VI.1
Курдогло Е.Д. VII.25
Курочкин А.А. VII.21
Лапин В.Г. VII.10, 12, 15
Лебедев К.В. VI.1
Левашов Н.И. VII.20
Леденцова Н.Е. II.1
Ли И.П. II.1
Лисицын А.А. VII.31
Литвинюк И.Ю. VII.4
Лопин М.И. VIII.4
Лучинин В.В. VII.5
Малыщик В.М. VII.27
Манченко Л.В. VII.10, 13, 14, 27
Маречек С.В. IV.2
Матвеев В.И. VII.3
Мелешкевич П.М. VII.20
Мирошник П.С. VII.22
Молдованов Ю.И. VII.15
Морозов А.О. VII.16
Морозов О.А. VII.16
Морозов С.Н. VII.6
Москаль В.И. VII.3
Моторин В.П. VII.20
Налогин А.Г. VII.23, 25
Натура И.П. VIII.2
Невский П.В. VII.28
Некрасов С.С. VII.3
Никитин С.В. VII.31
Пархоменко М.П. VII.24
Пашков А.Н. VII.25
Перевезенцев С.А. VIII.3
Перегонов С.А. VII.31
Перов В.В. I.1
Петров В.С. II.1
Петров С.А. VI.1
Пласкеев А.А. VI.4
Поливникова О.В. VII.4
Полников И.Г. IV.2
Поляков А.В. VII.20
Поляков В.С. II.1
Полякова В.М. VII.20
Попов Р.М. VII.23
Потапов С.Н. VII.25
Прокофьев Б.В. VII.19
Прокофьева Т.В. II.1
Протасов Д.Ю. VII.8
Пугнин В.И. VII.26
Пчелин В.А. VII.12, 15, 27
Ракова Е.А. VIII.2
Саблин В.М. VII.28
Савенко Г.П. VII.16
Сапрынская Л.А. VIII.2
Свитов В.И. II.1
Силаев А.Д. II.1

4(527).indd 110 17.12.2015 11:26:40

Симоненко А.Н. VII.1**6**
Скопин В.И. VII.2
Скрипкин Н.И. VII.9
Соколов А.М. VII.4, 17
Соколова И.М. VIII.2
Соловьев М.К. VII.7
Темнов А.М. VI.3
Терентьев Д.А. VII.28
Терешенок А.П. VII.25
Титов В.Н. VII.5
Ткаченко О.Н. VII.4
Торопов А.И. VII.8
Трегубов В.Б. VII.15, 27
Трофимов А.А. VI.3
Федонин Ю.А. VII.30
Федоров В.В. VII.29
Федотов В.В. VII.16
Федотова Ф.И. VI.4
Фрейдович И.А. VII.19, 28
Фролов И.С. VII.28
Фролова У.М. VI.4
Харабадзе Э.Т. VII.20
Ходатаев К.В. VII.9
Хриткин С.А. VII.1; VIII.1
Хромов А.В. VII.20
Чепурных И.П. VII.22; VIII.2
Чеченин Ю.И. VII.32
Шалин Т.И. VII.30
Шахрай В.И. VII.31
Шипило Е.М. VII.20
Шуманов А.В. II.1
Щитов А.М. VII.32
Юнаков А.Н. VII.26
Ющенко А.Ю. VI.4

4(527).indd 111 17.12.2015 11:26:40

ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В научно-техническом СБОРНИКЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в “Редакторе формул” Word. Непосредственно в Worde допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); векторная графика – в формате CorelDraw, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с авторов статей, в том числе с аспирантов, за публикацию рукописей не взимается.

4(527).indd 112 17.12.2015 11:26:40

КАТАЛОГ

информационных изданий на 2016 г.

Проводится подписка на следующие виды изданий:

- «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» (4 вып. в год). Стоимость подписки – 2400 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.
  Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).
- «Новости СВЧ-техники» – информационный сборник (10 вып. в год). Стоимость подписки – 2400 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ОАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на «_____» на 2016 г. и направлять по адресу:

Куда _____

(почтовый индекс, адрес)

_____

Кому _____

(название организации)

_____

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____

на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 30.10.2015 г.
Усл. п. л. 14,0
Уч.-изд. л. 14,5
Индекс 36292
Формат 60×88 1/8
Тираж 500
16 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а
Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru

4(527).indd 113 17.12.2015 11:26:40

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2015, вып. 4(527), с. 1-112

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

4(527).indd 114 17.12.2015 11:26:40