ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1 **СВЧ-ТЕХНИКА**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1 (489)

2007

Издается с 1950 г.

Главный редактор д.т.н. **А.Н. Королев**

Редакционная коллегия:

д.т.н. С.И. Ребров (зам. главного редактора), к.т.н. С.А. Зайцев (зам. главного редактора), д.т.н. Б.Н. Авдонин (зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»), к.т.н. В.Н. Батыгин, Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. А.В. Галдецкий, Б.Ф. Горбик, С.И. Гришин, д.ф.-м.н. Б.Ч. Дюбуа, д.т.н. С.С. Зырин, к.т.н. Ю.А. Кондрашенков, к.т.н. А.С. Котов, к.т.н. Е.А. Котюргин, к.т.н. П.В. Куприянов, к.т.н. В.В. Лисс, д.т.н. М.И. Лопин, В.М. Малыщик, В.А. Мальцев, к.т.н. П.М. Мелешкевич, д.ф.-м.н. А.Б. Пашковский, Е.Н. Покровский, к.т.н. А.В. Потапов, к.т.н. С.Е. Рожков, д.т.н. К.Г. Симонов, В.П. Стебунов (ответственный секретарь), к.т.н. А.М. Темнов, д.т.н. Н.Д. Урсуляк, д.т.н. М.М. Трифонов (ЗАО НПП «Исток-Система»), **О.А. Морозов** (ЗАО НПП «Магратеп»), к.т.н. А.Г. Михальченков (МУП «ДПРН Фрязино»), д.ф.-м.н. А.И. Панас (ИРЭ РАН), к.т.н. **В.В. Абрамов** (ФГУП СКБ ИРЭ РАН), А.А. Туркевич (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.)

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2007 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Выпуск 1(489)	2007
К 100-летию академика Николая Дмитриевича Девяткова	5
Памяти Вадима Федоровича Коваленко	9
Применение электронных приборов	
Белугин В.М., Ветров В.В., Елян В.В., Мищенко А.В., Пироженко В.М., Розанов Н.Е., Сит- ников В.М., Сычёв Б.С., Королев А.Н., Симонов К.Г., Кокоровец Ю.Я., Свищ В.М., Шумейко Н.А., Яценко С.Я., Рыжиков В.Д. – Рентгенографический комплекс «По- лискан-3» для контроля содержимого морских контейнеров и большегрузных авто- мобилей.	11
<i>Духновский М.П., Гагарин С.В., Петров А.И., Федоров Ю.Ю.</i> – Влияние на стойкость к воздействию дозы гамма-излучения электрического режима полевых переключательных транзисторов	20
Твердотельная электроника	
Бабинцев Д.В., Королев А.Н., Красник В.А., Климова А.В., Лапин В.Г., Малыщик В.М., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б., Язан В.Ю. – Транзисторный импульсный усилитель с выходной мощностью 911 Вт в диапазоне частот 15,916,4 ГГц	25
Богданов Ю.М., Лапин В.Г., Темнов А.М., Щербаков Ф.Е. – Монолитный двухпозици- онный переключатель для диапазона частот 0,518 ГГц, согласованный по всем каналам	33
Иовдальский В.А. – Эволюция конструкции типовых фрагментов ГИС СВЧ-диапазона	38
Аверин В.В., Гудкова Н.Б., Мицук Е.В., Темнов А.М. – Модернизация бескорпусных дио- дов СВЧ	46
Богданов Ю.М., Красник В.А., Лапин В.Г., Лукьянов В.А., Темнов А.М., Петров К.И., Самсонова И.В. – Ряды устройств для преобразования частоты на основе многофун- кциональной GaAs МИС	50
<i>Иовдальский В.А.</i> – Концепция применения металлических вставок в диэлектрической подложке ГИС СВЧ	58

СОДЕРЖАНИЕ (окончание)

Иовдальский В.А., Пелипец О.В., Зубков Н.П., Ковалев В.И. – Исследование состава алма- зоподобных пленок углерода, используемых в изделиях микроэлектроники	70
Гудкова Н.Б., Зуева О.С., Самсонова И.В., Юсупова Н.И., Мазанова О.Н., Мальцев В.А., Балыко А.К. – Методика определения параметров модели диодов СВЧ	80
Электровакуумные приборы	
<i>Плешанов С.А., Самарцев И.И., Турутин Ю.А.</i> – Цезиевая атомно-лучевая трубка с оп- тической селекцией атомных состояний на входе в СВЧ-резонатор	87
<i>Щелкунов Г.П.</i> – Группа новых СВЧ-приборов для генерации рентгеновского излучения и их применение	93
Медицинская электроника	
Борисенко Г.Г., Полников И.Г., Казаринов К.Д. – Использование гидродинамической неустойчивости при микроволновом облучении жидких сред в биохимическом эксперименте	98

Краткие сообщения

Королев А.Н., Абакумова Н.В., Мицук Е.В., Мальцев В.А., Морозов В.С., Самсонова И.В.,	
Сафонова Е.О. – Очистка текстильных материалов с помощью СВЧ-энергии	107
Королев А.Н., Абакумова Н.В., Зуева О.С., Мальцев В.А., Морозов В.С., Самсонова И.В.,	
Сафонова Е.О. – Способ извлечения ртути из ртутных ламп	109

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Published by Federal State Unitary Enterprise "RPC "Istok", The Federal Agency on Industry, The Russian Federation

CONTENTS

Issue 1(489)	2007	Founded in 1950

To the 100-th anniversary of academician Nikolay Dmitryevich Devyatkov	5
In memory of Vadim Fyodorovich Kovalenko	9
Applications of electronic devices	
Belugin V.M., Vetrov V.V., Yelyan V.V., Mishchenko A.V., Pirozhenko V.M., Rozanov N.E., Sitnikov V.M., Sychov B.S., Korolev A.N., Simonov K.G., Kokorovets U.Ya., Svishch V.M., Shumeyko N.A., Yatsenko S.Ya., Ryzhikov V.D. – X-ray complex "Poliscan-3" for inspection of the contents of sea containers and bulky vehicles	11
<i>Dukhnovsky M.P., Gagarin S.V., Petrov A.I., Fyodorov Yu.Yu.</i> – The influence of the electric mode of switched-type FETs on gamma radiation dose resistance	20
Solid-state electronics	
Babintsev D.B., Korolev A.N., Krasnik V.A., Klimova A.V., Lapin V.G., Malyshchik V.M., Manchenko L.V., Pchelin V.A., Tregubov V.B., Yazan V.Yu. – The transistor pulse amplifier with 911 W output power and 15.916.4 GHz frequency range	25
<i>Bogdanov Yu.M., Lapin V.G., Temnov A.M., Scherbakov F.E.</i> – A monolithic two-way switch for 0.518 GHz frequency range matched in all channels	33

C O N T E N T S (continued)

<i>Iovdalsky V.A.</i> – The concept of metallic insertion in microwave HIC dielectric substrate	38
Averin V.V., Gudkova N.B., Mitsuk E.V., Temnov A.M. – Upgrading of package-free microwave diodes	46
Bogdanov Yu.M., Krasnik V.A., Lapin V.G., Lukyanov V.A., Temnov A.M., Petrov K.I., Samso- nova I.V. – Sets of devices for frequency conversion based on multifunctional GaAs MIC	50
<i>Iovdalsky V.A.</i> – The design evolution of microwave HIC typical fragments	58
<i>Iovdalsky V.A., Pelipets O.V., Zubkov N.P., Kovalev V.I.</i> – The investigation of diamond-like carbon film composition used in microelectronic devices	70
Gudkova N.B., Zueva O.S., Samsonova I.V., Yusupova N.I., Maltsev V.A., Balyko A.K. – Limiting diode parameter calculation methodology	80
Electrovacuum devices	
<i>Pleshanov S.A., Samartsev I.I., Turutin Yu.A.</i> – Cesium atomic-beam tube with an optical selection of atom states at the input to microwave resonator	87
Schelkunov G.P. – A group of new microwave devices for X-ray generation and their applications	93
Medical electronics	
<i>Borisenko G.G., Polnikov I.G., Kazarinov K.D.</i> – The use of hydrodynamic instability at microwave radiation of liquid media in biochemical experiment	98
Short information	
Korolev A.N., Abakumova N.V., Mitsuk E.V., Maltsev V.A., Morozov V.S., Samsonova I.V., Saphonova E.O. – Cleaning of textile materials by microwave energy	107
Korolev A.N., Abakumova N.V., Zueva O.S., Maltsev V.A., Morozov V.S., Samsonova I.V., Saphonova E.O. – A way of mercury extraction from mercury tubes	109



Николай Дмитриевич Девятков (1907–2001 гг.)

C. C. C. P.

T-78

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ СРЕДСТВ СВЯЗИ

ТРУДЫ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА

Ответственный редактор А. А. СОСОНИН Зам. ответственного редактора Н. Д. ДЕВЯТНОВ

6459/pm1-

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. А. Астрин, С. А. Зусмановский, В. Ф. Коваленко, В. С. Лукошков, Г. А. Метани, Д. Д. Оленин, А. П. Пастухов, Н. И. Струтинский, А. П. Федосеев, Б. М. Царев

Nº 1

1950

HUN u/414

С этого номера «Трудов НИИ-160» началась история научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника»

К 100-ЛЕТИЮ АКАДЕМИКА НИКОЛАЯ ДМИТРИЕВИЧА ДЕВЯТКОВА

Н.Д. Девятков родился 11 апреля 1907 года в исконно русском городе Вологде в семье ремесленника купеческого рода. В 1924 г. он закончил Вологодское реальное училище и переехал в Ленинград. Здесь он вольнослушателем стал посещать лекции и лабораторные занятия в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ) и одновременно поступил на должность лаборанта в Ленинградский физико-технический институт (ЛФТИ), в радиолабораторию выдающегося ученого и талантливого изобретателя А.А.Чернышева, известного автора работ в области энергетики и радиоэлектроники. Первая работа Н.Д. Девяткова была связана с созданием уникальной высоковольтной установки для борьбы с загрязнением воздуха в Ленинграде, которая впоследствии нашла широкое применение и стала выпускаться серийно.

После окончания в 1931 г. ЛПИ и до 1942 г. Н.Д. Девятков работал в ЛФТИ, а затем – в выделившемся из него НИИ-9. За это время им были выполнены важные исследования в различных областях техники, результаты которых опубликованы в двенадцати печатных работах и шести авторских свидетельствах на изобретения. Начиная с 1935 г. он осуществляет пионерные исследования в области генерирования сверхвысоких частот (СВЧ). Н.Д. Девяткову принадлежит приоритет в создании СВЧ-триодов с плоскопараллельными электродами – маломощных генераторных ламп с практически безынерционным выводом сетки. Оригинальные идеи, заложенные в конструкции СВЧ-триодов, послужили основой для создания множества типов таких ламп, а также усилителей и генераторов на их основе не только в СССР, но и в Англии, США и Германии. Продолжая работы в этом направлении, Н.Д. Девятков с сотрудниками в 1939 г. приходит к выдающемуся изобретению – отражательному клистрону, который впоследствии стал основным промышленным типом электровакуумных приборов, используемым до настоящего времени в различных радиоэлектронных системах.

Н.Д. Девятков сыграл значительную роль в становлении и развитии отечественной радиолокации. Разработанные им приборы были положены в основу создания целого ряда отечественных радиолокационных установок. Государственный комитет обороны 10 февраля 1942 г. принял Постановление о разработке и серийном производстве отечественных станций орудийной наводки (СОН). За восемь месяцев под руководством Н.Д. Девяткова были созданы и организован выпуск тридцати типов электровакуумных приборов и усилительных радиоламп. Это позволило уже к ноябрю 1942 г. закончить разработку и изготовление двух опытных образцов СОН. Испытание и приемка станций успешно прошли прямо в прифронтовой полосе под Москвой. С начала 1943 г. был организован уже серийный выпуск «СОН-2».

В 1943 году Н.Д. Девятков был переведен в созданный на базе фрязинского завода «Радиолампа» научно-исследовательский институт № 160 с опытным заводом (ныне ФГУП «НПП «Исток»), основной целью которого были разработка и выпуск электронных приборов для радиолокационной техники. С тех пор и до конца жизни, за исключением трехлетней послевоенной командировки в Берлин, Николай Дмитриевич трудился на нашем предприятии. За заслуги перед отечественной наукой и техникой, мощное развитие которых обеспечило победоносное окончание войны с немецкими захватчиками, имя академика Н.Д. Девяткова навечно вписано в энциклопедию «Великая Отечественная война 1941-1945 гг.» (М.: Советская энциклопедия, 1985).

За более чем полувековой период работы на «Истоке», во многом благодаря усилиям Н.Д. Девяткова, на предприятии нашли свое развитие многие современные научные направления. Под его научным руководством на предприятии впервые в мире были начаты работы по освоению миллиметрового диапазона длин волн. К впечатляющим достижениям последних десятилетий по праву относятся работы Н.Д. Девяткова в области применения СВЧ электронных приборов и квантовых генераторов (лазеров) в народном хозяйстве и медицине. Широта и глубина познаний, высокая интеллигентность и доброжелательность, уважительное отношение к нему ученых и исследователей позволили Н.Д. Девяткову выполнить исключительно важную миссию, которая, возможно, и была посильна только ему, – создать уникальные творческие коллективы для совместных работ в таких разрозненных областях, как электроника, медицина, биология и т.д.

На протяжении всей своей долгой жизни Николай Дмитриевич вел поистине титаническую научно-техническую работу. С 1975 года и до конца дней он являлся председателем Научного совета АН СССР и РАН по проблеме «Физическая электроника», в течение 10 лет был членом Отделения общей физики и астрономии АН СССР, 25 лет входил в состав Высшей аттестационной комиссии (ВАК) и пленума ВАК, много лет был членом Комитета по Ленинским и Государственным премиям СССР в области науки и техники, членом НТС Военно-промышленного комитета, возглавлял НТС Министерства электронной промышленности СССР по СВЧ-электронике, был членом НТС министерства.

С момента организации в 1950 году и до последних дней жизни он возглавлял редколлегию научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника». Н.Д. Девятков горячо поддержал созданную в 1946 г. во Фрязино аспирантуру при «Истоке» и до конца жизни являлся главным вдохновителем ее работы. На протяжении многих лет являлся председателем двух диссертационных советов по защите докторских и кандидатских диссертаций: при «Истоке» и ИРЭ РАН. 12 лет (1983-1995 гг.) Н.Д. Девятков был главным редактором журнала «Радиотехника и электроника», издаваемого Академией наук.

Заслуги Н.Д. Девяткова перед отечественной наукой и техникой отмечены самыми высокими званиями и правительственными наградами: доктор технических наук, действительный член (академик) АН СССР, Герой Социалистического Труда, лауреат Сталинской (Государственной) премии, Ленинской премии, Государственной премии Российской Федерации, премии Совета Министров СССР, премии Правительства Российской Федерации, лауреат золотой медали имени А.С. Попова, кавалер двух орденов Ленина, ордена Октябрьской Революции, двух орденов Трудового Красного Знамени, ордена Красной Звезды.

Он был не только выдающимся ученым, но и необыкновенным человеком. Особых слов благодарности жителей города Фрязино, в котором Н.Д. Девятков прожил более 50 лет, заслуживает его глубокое великодушие, проявляющееся в многочисленных фактах содействия фрязинцам, нуждающимся в медицинской помощи. Не бывало случая, чтобы Николай Дмитриевич отказал кому-либо в этом. Его телефонные звонки и рекомендательные письма в лучшие больницы страны были подчас теми самыми спасательными ниточками, которые позволили продлить жизнь многим жителям нашего города. Для всех, кто его знал, Николай Дмитриевич являлся образцом русского интеллигента, готового прийти на помощь каждому, кто в ней нуждается, человеком большого ума и высокой внутренней культуры. Память об этом удивительном человеке навсегда останется в наших сердцах.

ПАМЯТИ ВАДИМА ФЕДОРОВИЧА КОВАЛЕНКО

3 марта 2007 года исполняется 100 лет со дня рождения инженера, ученого, изобретателя Вадима Федоровича Коваленко, много лет проработавшего в ФГУП «НПП «Исток».

Вадим Федорович родился 3 марта 1907 года в г. Харькове в семье учителя начальных школ. Он рано (в 1920 г.) потерял мать и уже с 14 лет начал работать, сначала конторщиком, затем учителем в школе-семилетке. В 1925-1927 гг. он обучается в Донецком институте народного образования на физико-математическом отделении, после окончания которого вновь работает учителем. Еще через год его командируют на учебу в Ленинградский политехнический институт.

После окончания института в 1932 г. Вадим Федорович был направлен на работу в Ленинградский электрофизический институт, в лабораторию профессора В.А. Рожанского.

С 1935 г. Вадим Федорович работал в НИИ-9 под руководством выдающегося ученого, члена-корреспондента АН СССР М.А. Бонч-Бруевича. В НИИ-9 В.Ф. Коваленко трудился в основном над созданием



1907 - 1989 гг.

маломощных микроволновых генераторов и усилителей. В 1940 г. он получил 7 авторских свидетельств на изобретения, которые до сих пор актуальны.

В число изобретений В.Ф. Коваленко вошли: многосекционный клистрон, отражательный клистрон, способ модуляции частоты клистрона (изменением напряжения отражателя). Самым крупным научно-техническим достижением Вадима Федоровича, по-видимому, является изобретение многолучевого клистрона на основном виде колебаний.

С началом войны Вадим Федорович сразу был мобилизован на фронт и сражался в 122 Краснознаменной танковой бригаде, будучи начальником связи в звании инженер-капитана. В 1944 году он получил тяжелое осколочное ранение руки. После лечения в госпиталях В.Ф. Коваленко как инвалид второй группы был демобилизован из армии. Его мужество в Великой Отечественной войне отмечено боевыми наградами: медалями «За боевые заслуги», «За отвагу», орденом «Красной Звезды», памятными медалями «За оборону Ленинграда», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг.» и другими.

После демобилизации Вадим Федорович полтора года работал в г. Куйбышеве, ожидая пока жена закончит институт. В 1945 году он переехал в Москву, где в мае 1946 г. был принят на должность ведущего инженера в ЦНИИ-108 Министерства промышленности средств связи. Работая в институте, Вадим Федорович написал диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук и успешно защитил ее. В августе 1948 г. В.Ф. Коваленко переводится на работу в г. Фрязино, в НИИ-160 на должность старшего научного сотрудника.

В январе 1949 года В.Ф. Коваленко назначают начальником отдела 170. Продолжая научную работу, он пишет книгу «Введение в электронику сверхвысоких частот». Эта книга написана исключительно ясным и понятным языком. В ней приведено много конкретных расчетов узлов и устройств СВЧ-приборов, параметров зарубежных приборов, экспериментальных данных. Книга В.Ф. Коваленко заслуженно пользовалась успехом у студентов, техников, инженеров и научных сотрудников.

В феврале 1952 года Вадима Федоровича по его личной просьбе переводят с поста начальника отдела 170 на должность старшего научного сотрудника. Под его личным руководством в отделе было разработано 3 новых прибора, налажен их серийный выпуск на заводе, который продолжался до 1967 г., с выходом до 40 000 шт. ежегодно. В те же годы он написал замечательную книгу - учебник по СВЧ-электронике, подал несколько заявок на изобретения, получил 4 авторских свидетельства, ряд технических статей.

С ноября 1955 года Вадим Федорович - начальник отдела научно-технической информации № 100. Его информационно-аналитическая деятельность распространяется на работы как НИИ-160, так и других предприятий отрасли. С 1971 по 1979 гг. он выпускает 6 обстоятельных обзоров, посвященных состоянию и перспективам развития электроники СВЧ в СССР и за рубежом.

В 1965 г. группа специалистов института по разработке маломощных узкополосных клистронов в составе Н.Д. Девяткова, В.Ф. Коваленко, М.Б. Голанта, Д.М. Петрова была удостоена Ленинской премии.

В 1965-1968 гг. В.Ф. Коваленко работает начальником лаборатории анализа и обобщений отдела 100, после чего переходит (по личной просьбе) на работу старшим научным сотрудником. К этому времени у него было 55 научных трудов: 20 книг и брошюр, 19 статей, 16 авторских свидетельств.

В 70-е годы В.Ф. Коваленко пишет три главы книги о физических процессах при изготовлении ЭВП СВЧ.

В 1975 году в издательстве «Советское радио» выходит его книга «Теплофизические процессы и электровакуумные приборы». Книга написана ясным образным языком и содержит массу фактических данных о свойствах материалов в ЭВП и других вакуумных устройствах. При написании книги Вадим Федорович совершил гигантский труд, изучив 233 работы, опубликованные в стране и за рубежом, и массу справочников.

К Вадиму Федоровичу часто обращались сотрудники института за советом или консультацией по научно-техническим вопросам. Он часто редактировал статьи, которые присылались в журнал «Электроника СВЧ», издаваемый на «Истоке». Вадим Федорович активно участвовал в работе аспирантуры и ученого совета, членом которого он был с самого его основания в институте.

Вадим Федорович Коваленко умер в 1989 году. Он останется в нашей памяти как талантливый изобретатель и большой ученый России.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

УДК 621.386.8

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ПОЛИСКАН-3» Для контроля содержимого морских контейнеров и большегрузных автомобилей

В. М. Белугин, В. В. Ветров, В. В. Елян, А. В. Мищенко, В. М. Пироженко, Н. Е. Розанов, В. М. Ситников, Б. С. Сычёв

ФГУП «Московский радиотехнический институт РАН»

А. Н. Королёв, К. Г. Симонов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Ю. Я. Кокоровец, В. М. Свищ, Н. А. Шумейко, С. Я. Яценко

НТ СКБ «ПОЛИСВИТ» ГНПП «Объединение Коммунар», г. Харьков

В. Д. Рыжиков

НТК «Институт монокристаллов», г. Харьков

Рентгенографический комплекс «Полискан-3» предназначен для бесконтактного рентгенографического контроля содержимого морских контейнеров и большегрузных автомобилей. Для повышения информативности контроля содержимого инспектируемого объекта просвечивание осуществляется в двух проекциях. Инспекционный комплекс содержит две ускорительные установки, каждая из которых имеет источник рентгеновского излучения с локальной биозащитой, две детекторные системы для обработки результатов просвечивания и представления их в виде теневого изображения инспектируемого объекта на экранах видеомониторов, а также систему транспортировки инспектируемого объекта в зоне просвечивания и систему контроля и управления работой оборудования комплекса. Источник рентгеновского излучения включает в себя линейный ускоритель электронов на энергию 7,3 МэВ, конверсионную мишень для преобразования мощности электронного пучка в мощность рентгеновского излучения, локальную защиту от облучения и средства выравнивания дозы облучения. В качестве ускоряющей системы в ускорителе электронов применяется бипериодическая ускоряющая структура на стоячей волне, которая запитывается от магнетронного генератора с рабочей частотой 2,8 ГГц. Ускоритель генерирует интенсивный пучок электронов без использования внешнего фокусирующего магнитного поля. Эта характерная особенность дает возможность применить локальную защиту ускоряющей системы из ферромагнитных материалов для обеспечения радиационной безопасности обслуживающего персонала и охраны окружающей среды. Корпус биозащиты, изготовленный из чугуна, обеспечивает снижение мощности дозы неиспользуемого рентгеновского излучения до уровня, гарантирующего безопасность персонала. Оборудование комплекса реализует высокую чувствительность детектирования и высокую проникающую способность рентгеновского излучения.

X-ray complex "Poliscan-3" is designed for contactless X-ray inspection of the contents of sea containers and bulky vehicles. To get more information of the inspected object contents the radiation is made in two projections. The inspection complex consists of two accelerating units, each of them having an X-ray source with a local bioshielding, two detector systems for processing the results of the radiation and presenting them as a shadow image of the inspected object on the screens of videomonitors, as well as a system for transportation of the inspected object in radiation zone and a system of control and regulation for the complex equipment operation. The X-ray source includes a linear accelerator of electrons to 7.3 MeV energy, a conversion target to convert the power of electron beam into the power of X-ray radiation, a local radiation shielding and means for levelling the radiation doze. A biperiodic accelerating structure on a standing wave which is fed from magnetron oscillator with 2.8 GHz operating frequency is used as an accelerating system in electron accelerator. The accelerator generates an intensive beam of electrons without using an external focusing magnetic field. This feature enables the use of a local shielding of accelerating system made of ferromagnetic materials to provide radiation safety of personnel and environment. The bioshielding body made of cast iron provides the decrease of not-used X-ray radiation doze power down to the level which guarantees personnel safety. The complex equipment provides high sensitivity of detection and high permeability of X-ray radiation.

1. В В Е Д Е Н И Е

Комплекс «Полискан-3» предназначен для рентгенографического контроля содержимого морских контейнеров и большегрузных автомобилей в морских портах и на пограничных переходах. Метод контроля основан на просвечивании инспектируемых объектов рентгеновскими лучами и формировании прямого теневого изображения на экранах видеомониторов. Источником рентгеновского излучения является компактный линейный СВЧ-ускоритель электронов с конверсионной мишенью и локальной биозащитой. Высокая информативность контроля комплекса обеспечивается высокой проникающей способностью излучения с граничной энергией 7,3 МэВ, а также двухпроекционным просвечиванием инспектируемого объекта, что на 50% повышает информативность теневого изображения.

Отличительными особенностями комплекса «Полискан-3» являются разработка и применение следующих компонентов:

 компактный линейный СВЧ-ускоритель электронов без магнитных фокусирующих устройств;

– электронный инжектор, формирующий пучок электронов с заданным «фазовым портретом»;

 – локальная радиационная защита ускоряющей системы, гарантирующая низкий уровень неиспользуемого рентгеновского излучения в помещениях комплекса и безопасность работы персонала;

– двухпозиционный формирующий коллиматор пучка рентгеновского излучения, обеспечивающий его ослабление в зоне контроля до безопасного для персонала уровня даже при включенном рентгеновском излучателе.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА

Комплекс «Полискан-3» [1] включает в себя следующие основные компоненты:

- два источника рентгеновского излучения;

- две системы детектирования рентгеновского излучения, прошедшего через объект контроля;

 – аппаратуру для обработки результатов просвечивания, формирования и визуализации теневых изображений;

- систему транспортирования инспектируемого объекта в зоне просвечивания;

- аппаратуру электропитания оборудования комплекса;
- систему радиационного мониторинга;
- систему контроля и управления работой оборудования комплекса.

Комплекс «Полискан-3» расположен в стационарном здании (рис. 1). В состав комплекса входят два источника рентгеновского излучения, формирующие веерообразные рентгеновские лучи, которые перекрестно облучают объект контроля в горизонтальном и вертикальном на-

правлениях, обеспечивая таким образом рентгенографическое изображение инспектируемого объекта в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Импульсный электронный пучок, генерируемый линейным СВЧ-ускорителем электронов, тормозится в конверсионной мишени, генерируя при этом рентгеновское излучение. Ускоряющая структура и мишень расположены внутри корпуса локальной биозащиты, в передней части которого вырезана узкая щель – коллиматор, формирующий узкий веерообразный рентгеновский пучок.

Локальная биозащита обеспечивает ослабление неиспользуемого рентгеновского излучения, гарантирующее безопасность работающего персонала и низкий уровень паразитного рассеянного излучения на детекторах. Использование локальной биозащиты позволяет упростить проект и конструкцию здания, уменьшить толщину стен с 2...3 до 0,5...1 м и значительно снизить стоимость сооружения здания комплекса.



Рис. 1. Расположение аппаратуры радиографического комплекса

Характеристики инспекционного комплекса

Энергия электронов	7,3 МэВ
Толщина просвечивания (сталь)	350 мм
Максимальные размеры контейнера	12 х 2,5 х 2,5 м
Скорость сканирования	0,4 м/с
Производительность	15-20 объектов/ч

3. ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источник рентгеновского излучения базируется на компактном линейном CBЧ-ускорителе электронов с локальной биозащитой. Его структурная схема приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема

источника рентгеновского излучения: 1 – электронный инжектор; 2 – ускоряющий резонатор; 3 – преобразующая (конверсионная) мишень; 4 – корпус локальной биозащиты; 5 – двухпозиционный коллиматор; 6 – электромеханический привод коллиматора; 7 – блок АПЧ; 8 – СВЧ-генератор; 9 – средства вакуумной откачки; 10 – импульсный модулятор; 11 – аппаратура электропитания; 12 – система водяного охлаждения; 13 – аппаратура управления и контроля

Характеристики ускорителя электронов

Рабочая частота	2,8 ГГц
Полное число ячеек структуры	33
Длина резонатора	0,9 м
Импульсный ток электронного пучка	150 мА
Длительность импульса тока пучка	10 мкс
Частота повторения импульсов	100 Гц
Коэффициент связи	3 %
Импульсная мощность СВЧ-генератора	2,5 MB1

Длительность импульса и энергосодержание пучка электронов в импульсе важны для получения требуемого значения сигналов от детекторов рентгеновского излучения при заданной толщине просвечивания по стали. Размеры апертуры и шаг расположения детекторов определяют пространственное разрешение инспекционной системы в вертикальной плоскости, а также геометрические искажения рентгенографического изображения при заданной скорости перемещения контролируемых объектов в зоне просвечивания.

В качестве ускоряющей используется бипериодическая структура с осевыми ячейками связи, работающая в режиме стоячей $\pi/2$ -волны (рис. 3). Ускоряющие ячейки структуры имеют оптимизированную форму, а ячейки связи представляют собой узкие цилиндрические объемы.



Рис. 3. Ускоряющая структура: 1 – группирующая ячейка; 2 – ячейка связи; 3 – ускоряющая ячейка; 4 – СВЧ-зонд; 5 – волновод; 6 – водяной кожух

Соседние ячейки структуры связаны между собой с помощью двух индуктивных щелей. В двух первых, группирующих ячейках, имеющих размеры, отличающиеся от размеров остальных ячеек, происходит группирование электронного пучка. Электронный инжектор устанавливается непосредственно на торец ускоряющей структуры, при этом стенка первой ячейки служит анодом инжектора. Структура охлаждается водой, циркулирующей внутри водяного кожуха, что гарантирует хорошую стабильность температуры и соответственно стабильность собственных частот ячеек при работе с большой СВЧ-мощностью. На рис. 4 показан внешний вид ускоряющей структуры, установленной на специальной опоре.



Рис. 4. Внешний вид ускоряющей структуры

СВЧ-поле в структуре обеспечивает продольное группирование и ускорение электронного пучка, а также его поперечную фокусировку. Так как ускоряющая структура расположена внутри корпуса биозащиты, выполненного из чугуна и обладающего остаточной намагниченностью, внешние устройства для магнитной фокусировки пучка не могут быть использованы [2]. Основной проблемой разработки ускорителя такого типа является получение приемлемого захвата инжектированных электронов в процессе ускорения и требуемых характеристик электронного пучка на конверсионной мишени. Эта проблема решается путем правильного выбора фаз частиц, проходящих ускоряющие зазоры ячеек структуры. Для достижения этой цели размеры ячеек и амплитуда поля в них тщательно рассчитываются и оптимизируются.

Как показывают расчеты динамики электронного пучка, выполненные с помощью специализированных программ [3], на выходе ускорителя с СВЧ-фокусировкой пучок имеет следующее характерное распределение: часть его (иногда называемая «ядром») расположена в приосевой области с очень маленьким диаметром, а остальная часть («ореол») распространяется достаточно далеко по радиусу. Так как «ядро» пучка с высокой плотностью энергии может повредить конверсионную мишень, это препятствует применению ускорителя такого типа в комплексах с высокой средней мощностью, если не применять специальных мер.

Для формирования, ускорения и доведения до мишени электронного пучка с требуемым радиусом и хорошим распределением пучок должен иметь определенный «фазовый портрет» на входе в ускоряющую структуру. «Фазовый портрет» - это распределение частиц пучка по радиусу и фазе СВЧ-поля, а также по продольным, радиальным и азимутальным скоростям. Такое распределение пучка формируется в электронном инжекторе, имеющем специальную конструкцию. Затем пучок проходит через ускоряющую структуру, с достаточной степенью точности сохраняя указанные распределения [4] за счет тщательно подобранных длин ускоряющих зазоров в ячейках, а также амплитуд и профилей СВЧ-поля в них.

Ускоряющий резонатор запитывается от СВЧ-генератора, построенного на магнетроне МИ-456А, работающего в режиме «затягивания» частоты. Система СВЧ-питания содержит также волновод с герметизирующим окном [5], волноводный ферритовый У-циркулятор, измерительную секцию и блок автоматической подстройки частоты. Ферритовый циркулятор применяется для защиты магнетрона от отраженной (от резонатора) волны на фронтах импульсов, при пробоях и искрениях в резонаторе, а также с целью реализации требуемого ослабления отраженной волны для обеспечения режима «затягивания» частоты.

4. СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Система детектирования рентгеновского излучения обеспечивает многоканальное детектирование, усиление и аналого-цифровое преобразование, необходимые для получения теневого изображения инспектируемого объекта. Она включает в себя детекторы излучения, расположенные в детекторной линейке, каналы обработки и преобразования сигналов и схемы коммутации и контроля.

Характеристики системы детектирования

Количество детекторов рентгеновского излучения	1024
Полная длина детекторной линейки	5,1 м
Размеры апертуры детектора	4,3 х 5 мм
Динамический диапазон аппаратуры детектирования	6,5 x 10 ⁴

В системе детектирования применяются детекторы рентгеновского излучения типа сцинтиллятор+фотодиод. В качестве сцинтилляторов используются кристаллы вольфрамата кадмия CdWO₄, имеющие хорошую чувствительность, малое время послесвечения, низкий уровень остаточного послесвечения и высокую стойкость к излучению.

5. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Ускорители электронов комплекса «Полискан-3» защищены от излучения в окружающее пространство посредством размещения их ускоряющих структур в корпусах локальной биозащиты, которые, в свою очередь, состоят из блоков, изготовленных из чугуна. Корпуса окружают электронный инжектор, ускоряющий резонатор и конверсионную мишень. Защита имеет самую большую толщину в месте расположения конверсионной мишени. Узкая щель – коллиматор прорезана в широком конце защиты и предназначена для формирования веерообразного пучка рентгеновского излучения. Источник рентгеновского излучения устанавливается на раме и может поворачиваться (рис. 5 и 6) для обеспечения юстировки взаимного положения источника, детекторной линейки и ограничивающего коллиматора.



Рис. 5. Конструкция источника рентгеновского излучения



Рис. 6. Источник рентгеновского излучения

Характеристики корпуса радиационной защиты

Длина корпуса	2,3 м
Максимальный диаметр корпуса	1,1 м
Ослабление рассеянного излучения	10 ⁴ -10 ⁵
Масса корпуса	13 т

Толстая радиационная защита гарантирует достаточное ослабление рассеянного излучения в месте расположения детекторов и обеспечивает высокую чувствительность системы детектирования.

Дальнейшее увеличение чувствительности и динамического диапазона аппаратуры детектирования достигается благодаря применению двухпозиционного коллиматора для рентгеновских лучей. Коллиматор имеет специальную конструкцию [6] и может принимать два положения. В первом положении он работает как коллиматор рентгеновских лучей, а во втором – он полностью ослабляет рентгеновское излучение. Двухпозиционный коллиматор позволяет нормировать приемно-детектирующий тракт во время работы ускорителя и компенсировать фоновые сигналы в аппаратуре детектирования, сигналы, вызываемые темновыми токами фотодиода в детекторе и рассеянным излучением в месте нахождения детекторов. Такая калибровка детекторов увеличивает чувствительность системы и улучшает качество изображения.

6. ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В этом разделе излагаются планируемые работы по усовершенствованию рентгенографических комплексов в части создания источника СВЧ-мощности и ускорителя электронов. Эти устройства в значительной степени определяют эксплуатационные характеристики и надёжность работы рентгенографического комплекса.

В настоящее время в рентгенографических комплексах для инспекции крупногабаритных грузов используются магнетроны или клистроны однолучевой конструкции. Магнетроны, хотя и требуют относительно низких питающих напряжений (порядка 50 кВ), неудобны в эксплуатации из-за относительно малого срока службы и сложности управления (в частности, из-за необходимости осуществления автоматической подстройки частоты или синхронизации при их использовании в двухпроекционных рентгенографических комплексах). Клистроны однолучевой конструкции не имеют этих недостатков, однако они требуют питающих напряжений выше 100 кВ, что усложняет их эксплуатацию.

В качестве источника СВЧ-мощности предлагается использовать многолучевой клистрон, обладающий высокой надёжностью, большой долговечностью и относительно низким питающим напряжением. Предприятие «Исток» является родоначальником создания многолучевых клистронов в мире. Здесь созданы различные типы многолучевых клистронов, которые широко используются в науке и технике. В связи с этим «Исток» может в кратчайшие сроки создать многолучевой клистрон для рентгенографических комплексов с СВЧ-мощностью 3...4 МВт и питающим напряжением до 60 кВ и осуществить серийный выпуск таких клистронов.

Во всех существующих рентгенографических комплексах используются линейные СВЧускорители, в которых ускоряющая структура, инжектор электронов, окно ввода СВЧ-энергии в ускоритель и конверсионная мишень, преобразующая энергию ускоренных электронов в рентгеновское излучение, являются отдельными элементами. Такие ускорители работают в режиме непрерывной откачки, осуществляемой вакуумными откачными системами. Время ввода ускорителя в эксплуатацию при первом его включении составляет примерно неделю, а замена катодного узла в инжекторе электронов (катодный узел необходимо менять примерно через каждые 2 месяца) занимает время около двух суток.

Для улучшения эксплуатационных возможностей комплекса и уменьшения времени его простоев предприятия «МРТИ РАН» и «Исток» предлагают создать отпаянную конструкцию ускорителя. В ней ускоряющая структура, инжектор электронов, окно ввода СВЧ-энергии и конверсионная мишень будут выполнены в виде единого блока, заранее откачанного, герметизированного на предприятии «Исток» и подготовленного к эксплуатации на стенде «МРТИ РАН». Такой ускоритель будет эксплуатироваться без применения вакуумных систем откачки. Существенно (до единиц часов) сократится время ввода ускорителя и всего ускорительного инспекционного рентгенографического комплекса в эксплуатацию и повысится надёжность работы комплекса, т.к. не потребуются вышеупомянутые недельные и двухсуточные простои ускорительного рентгенографического комплекса для ввода его в эксплуатацию и для замены катодного узла.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени оборудование комплекса «Полискан-3» изготовлено, смонтировано и испытано. Разработана проектно-сметная документация на строительство здания для размещения комплекса, ведется подготовка к строительству в морском порту (Украина).

В части улучшения эксплуатационных характеристик ускорительных инспекционных рентгенографических комплексов планируется создание источника СВЧ-мощности на базе многолучевого клистрона и разработка отпаянной конструкции ускорителя, исключающей вакуумную систему откачки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Complex for X-ray inspection of large containers / V. Pirozhenko, V. Belugin, A. Mischenko, N. Rozanov, B. Sychev, V. Vetrov, Yu. Kokorovets, V. Ryzhikov, N. Shumeiko, S. Yatsenko, A. Korolev, K. Simonov, V. Elyan // Proceedings of EPAC 2006. – Edinburgh, Scotland, 2006. – P. 2388-2390.

2. Compact electron linacs for radiation technology systems / V.M. Belugin, A.N. Korolev, A.V. Mischenko, V.M. Pirozhenko, N.E. Rozanov, K.G. Simonov, A.A. Zavadtsev // Proceedings of PAC2001. – Chicago, USA, 2001. – P. 2515-2517.

3. *Розанов Н.Е.* Компьютерные программы DINA для расчета динамики сильноточных пучков в линейных ускорителях // Научная сессия МИФИ-2003: Сб. – М.: МИФИ, 2003. – Т. 7. – С.167-168.

4. Патент 2245588 РФ. Источник рентгеновского излучения / В.М. Белугин, В.М. Пироженко, Н.Е. Розанов, К.Г. Симонов. 2003.

5. Патент 2207655 РФ. Баночное окно ввода и/или вывода энергии СВЧ / В.С. Галкин, А.Н. Королев, Ю.А. Кутепов, В.М. Лямзин, Б.В. Прокофьев, К.С. Симонов. 2002.

6. Патент 2256905 РФ. Радиографический инспекционный комплекс / Э.А. Мирочник, А.В. Мищенко, В.М. Пироженко. 2003.

Статья поступила 20 декабря 2006 г.

УДК 621.382.323

ВЛИЯНИЕ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОЛЕВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

М. П. Духновский, С. В. Гагарин, А. И. Петров, Ю. Ю. Федоров

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Излагаются результаты исследований влияния на стойкость полевых переключательных транзисторов электрического режима, используемого при воздействии экспозиционной дозы гамма-излучения. Показано, что облучение транзисторов в рабочем режиме значительно повышает их стойкость к воздействию данного фактора.

The investigation results of the influence of the electric mode used at the effect of exposition dose of gamma-radiation on switched-type FET resistance are given. It is shown that the radiation of transistors in the operating mode significantly increases their resistance to this factor effect.

В настоящее время широкое применение в стабилизированных преобразователях напряжений получили кремниевые переключательные транзисторы с изолированным затвором. Как и для всех ИЭТ, к этим транзисторам предъявляются требования на стойкость к воздействию специальных факторов.

Испытания на стойкость к тому или иному спецфактору проводятся в рабочем режиме при максимально допустимой температуре среды (или на корпусе изделия), обеспечивающих наибольшую чувствительность параметров – критериев годности (ПКГ) к данному виду воздействия. Для переключательных транзисторов традиционно облучение проводят при максимально допустимом смещении на затворе и нулевом напряжении сток-исток. После воздействия спецфакторов производится измерение ПКГ, которыми для кремниевых полевых транзисторов являются начальный ток стока $I_{c.нач}$, измеряемый при максимально допустимом напряжении сток-исток и нулевом смещении на затворе, и пороговое напряжение U_{nop} , измеряемое при заданном токе стока (обычно сотни микроампер) и нулевом напряжении затвор-сток [1, 2].

Анализ условий применения полевых переключательных транзисторов в радиоэлектронной аппаратуре показывает, что никогда не реализуется электрический режим, используемый при их испытаниях на соответствие требованиям ТЗ по стойкости к воздействию спецфакторов: транзистор может находиться либо в закрытом («ждущем») состоянии при нулевом смещении на затворе и напряжении сток-исток, не превышающем максимально допустимое, либо в открытом (рабочем) состоянии при смещении на затворе, задаваемом требованиями аппаратуры, и минимальном напряжении сток-исток. Поэтому результаты испытаний могут не соответствовать условиям применения транзисторов в аппаратуре.

В предлагаемой статье изложены результаты исследований влияния рабочих режимов полевых переключательных транзисторов, используемых при облучении, на их стойкость к воздействию экспозиционной дозы (далее дозы) гамма-излучения, являющегося наиболее критичным по воздействию на ПКГ. Исследования проводились на транзисторах, разработанных в ФГУП «НПП «Исток». Основные характеристики транзисторов следующие.

Максимально допустимое напряжение сток-исток	200 B
Максимальный импульсный ток	39 A
Начальный ток стока при $U_{3\mu} = 0, U_{c\mu} = 200 \text{ B}$	
и нормальной температуре	не более 25 мкА
Пороговое напряжение при $U_{3\mu} = U_{c\mu}$, $I_c = 250$ мкА	2-4 B
Максимально допустимое напряжение	
затвор-исток	±20 B

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) транзисторов приведена на рис. 1.



Рис. 1. Типичная вольт-амперная характеристика транзисторов

В качестве ПКГ при испытаниях на стойкость к воздействию спецфакторов установлены начальный ток стока – не более 25 мкА и пороговое напряжение – не менее 0,8 В (при нормальной температуре на корпусе транзистора).

Транзисторы облучались в двух режимах:

- традиционном при нулевом напряжении сток-исток и смещениях на затворах 0, +5, +10 и +20 В. Электрическая схема облучения приведена на рис. 2;



Рис. 2. Традиционная электрическая схема питания полевых транзисторов при испытаниях на установке

- рабочем импульсном при напряжении сток-исток +30 В и подаче на затвор прямоугольных импульсов смещения с амплитудой 20 В, длительностью 40 мкс, частотой повторения 1500...2000 Гц. Этот режим позволил разогреть транзисторы до предельно допустимой температуры на корпусе и обеспечить требования, предъявляемые к условиям испытаний. Электрическая схема облучения приведена на рис. 3.



Рис. 3. Электрическая схема питания полевых транзисторов в рабочем режиме при испытаниях на установке

Напряжение $U_{c.n}$ = +30 В находится на рабочем участке ВАХ транзистора (см. рис.1). Импульс с амплитудой +20 В, подаваемый на затвор, полностью открывает транзистор, и на нагрузке $R_{\mu} = 2,6$ Ом выделяется импульс, практически равный по амплитуде напряжению питания транзистора. Этот импульс регистрируется осциллографом на согласующем резисторе (50 Ом).

Экспериментальные зависимости начального тока стока и порогового напряжения от дозы гамма-излучения приведены на рис. 4 и 5 соответственно (для традиционного метода испытаний).









Установлено, что:

 воздействие гамма-излучения приводит при любых смещениях на затворе к возрастанию начального тока стока и уменьшению порогового напряжения;

– при смещении на затворе, равном максимально допустимому, начальный ток стока выходит за пределы допуска по ТУ при уровне воздействия 16 кР, а пороговое напряжение – при уровне воздействия 22 кР;

– уменьшение смещения на затворе до величин, не превышающих +10 В, обеспечивает сохранение начального тока стока и порогового напряжения в пределах допусков по ТУ, установленных для спецвоздействий, до уровней воздействия примерно 26 кР.

Совсем другой эффект наблюдался в случае облучения транзисторов в рабочем режиме. На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов тока транзистора до и после воздействия дозы гамма-излучения с уровнем 200 кР. Осциллограммы практически идентичны.



Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока транзистора: *1* – до воздействия; *2* – после воздействия дозы с уровнем 200 кР

Результаты измерений ПКГ приведены в таблице.

ПКГ	Сдаточная норма	До воздействия	После воздействия
Начальный ток стока, мкА	≤ 25	0,003 - 0,174	0,05 - 0,54
Пороговое напряжение, В, при токе стока 250 мкА	≥2	3,7-4,3	4,05 - 4,66

Облучение транзисторов в рабочем режиме показало, что начальный ток стока после воздействия хотя и возрастает, но не превышает сдаточных норм; пороговое напряжение, в отличие от традиционной схемы облучения, возрастает на 0,36 В.

Транзисторы, облучающиеся в рабочем режиме, сохраняют работоспособность после воздействия дозы гамма-излучения, в 10 раз превышающей дозу, приводящую к отказу при традиционном методе испытаний.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что применяемая в настоящее время методика испытаний полевых переключательных транзисторов на соответствие требованиям ТЗ по стойкости к воздействию дозы гамма-излучения не соответствует условиям схемотехнического применения этих транзисторов, т.к. в результате её применения занижается фактическая стойкость транзисторов к данному виду спецвоздействий и тем самым ограничивается область возможного применения транзисторов в радиоаппаратуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов В.Д.* Радиационная физика приборов со структурой металл–диэлектрик–полупроводник. – М.: МИФИ, 1984.

2. Лысенко В.С., Ткачев Ю.Д., Турчанинов В.И. Исследование и моделирование процессов накопления заряда в МОП структурах с поликремниевым электродом под действием гамма-излучения // Радиационно-надежностные характеристики изделий электронной техники в экстремальных условиях эксплуатации: Сб. научн.тр. – С.-Пб.: РНИИ «Электронстандарт», 1994.

Статья поступила 4 августа 2006 г.

УДК 621.375.4

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 9...11 ВТ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 15,9...16,4 ГГЦ

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

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработан транзисторный импульсный усилитель с выходной мощностью 9...11 Вт в диапазоне частот 15,9...16,4 ГГц и коэффициентом усиления 36...38 дБ для РЛС разведки наземных движущихся целей. Описаны принципы проектирования, конструкция и электрические параметры усилителя.

The transistor pulse amplifier for radar surveillance of the ground moving targets with 9...11 W output power, 15,9...16,4 GHz frequency band and 36...38 dB amplification factor has been developed. The design concept, design and electric parameters of the amplifier are described.

Проведена опытно-конструкторская работа по созданию транзисторного импульсного усилителя с выходной мощностью не менее 9 Вт в диапазоне частот 15,9...16,4 ГГц для РЛС разведки наземных движущихся целей. Усилитель обеспечивает коэффициент усиления $K_y = 36...38$ дБ, малые амплитудные и фазовые шумы, глубокое подавление сигнала в паузе между импульсами, регулировку K_y , имеет малые габаритные размеры и массу. В усилителе (далее модуле) использованы СВЧ полевые транзисторы КРПГ.432152.037, КРПГ.432152.030, КРПГ.432153.010, изготовленные в ФГУП «НПП «Исток».

Модуль состоит из двух отсеков: в одном расположены СВЧ-узлы на гибридно-интегральных схемах, в другом – модулятор. В модуль входят семь СВЧ усилительных каскадов. Вход модуля коаксиальный СРГ-50-751ФВ, выход волноводный сечением 16 х 4 мм. СВЧ-отсек герметизирован. Модуль снабжён схемой контроля работоспособности и управляемым аттенюатором на входе.

Блок входных каскадов включает в себя три усилительных каскада. Первый и второй каскады выполнены с использованием одиночных транзисторов КРПГ.432152.037 с шириной затвора 0,5 мм, третий каскад – тех же транзисторов на мостах Ланге. Для уменьшения паразитных составляющих и температуры монтажа транзисторов применены балочные выводы [1]. Платы каскадов припаяны к золочёному основанию из сплава МД-50 толщиной 1 мм с помощью эвтектики золото-кремний. На платах расположены полосковые фильтры питания и СВЧ-развязки типа «ласточкин хвост». Под основания проложен мягкий припой ПОИН-50. Электрические характеристики входного каскада показаны на рис. 1. Суммарный коэффициент усиления блока входных каскадов составляет 20...21 дБ, неравномерность K_p не превышает 1 дБ, потребляемый ток – 280...300 мА. Для устойчивой работы блока в цепи питания затворов и стоков введены стабилизирующие резисторы.



Рис. 1. Коэффициент усиления входного каскада на транзисторе КРПГ.432152.037

Блок промежуточных каскадов состоит из двух балансных каскадов на транзисторах КРПГ.432152.030 с шириной затвора 1,2 мм. Первый каскад суммирует мощность двух транзисторов, второй – четырёх. Суммирование мощности во втором каскаде двухступенчатое: первая ступень представляет собой модифицированный мост Вилкинсона, вторая ступень – мост Ланге. Цепи питания, фильтрации, развязки аналогичны цепям во входных каскадах. Транзисторы монтировались с помощью балочных выводов, как и во входных каскадах. Цепи согласования определялись с помощью методики [2-5]. Характеристики блока промежуточных каскадов приведены на рис. 2. Выходная мощность каскада с двумя транзисторами в цепи питания затворов и стоков – 600...700 мВт, с четырьмя – 1200 мВт. Потребляемый ток блока промежуточных каскадов в цепи питания затворов и стоков – 1,8 А.



Рис. 2. Коэффициент усиления балансного каскада на двух транзисторах КРПГ.432152.030

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(489), 2007

В блок выходных каскадов входят предвыходной и выходной каскады, развязанные вентилем. Предвыходной каскад включает в себя транзистор КРПГ.432153.010 с шириной затвора 13,5 мм, схемы согласования секций кристалла на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью, сумматоры/делители на поликоре, выполняющие также функцию согласования, фильтры питания, развязки по постоянному току. Кристалл припаян к основанию припоем ПЗлОл 78.5. Подробное описание методики определения большесигнальной модели, способы измерения электрических характеристик, вопросы монтажа, особенности работы транзистора в импульсном режиме изложены в работах [2-4].

После определения нелинейной модели и топологии согласующих цепей транзистора КРПГ.432153.010 была проведена дополнительная проверка электрических параметров как секции, так и транзистора в целом. Для заданного диапазона частот важнейшими параметрами являются индуктивности проволочных выводов затворов L₂ и стоков L₂ транзистора. От точности их определения зависит, по существу, топология предвыходного каскада. Экспериментально была подобрана топология согласующих цепей затвора и стока одной секции транзистора на поликоре толщиной 0,5 мм, обеспечивающая максимальную выходную мощность. Результаты измерений приведены в табл. 1. С помощью полученной топологии рассчитаны величины входных $Z_{_{\rm BX}}$ и выходных $Z_{_{\rm BMX}}$ комплексных сопротивлений секции. Затем был проведен расчёт АЧХ представленной схемы с использованием S-параметров, измеренных ранее на этой же секции. При расчёте проводился подбор величин L₂ и L₂, при которых расчетная АЧХ максимально совпадала бы с экспериментальной. В результате были получены следующие значения: $L_{2} = 0,095$ нГн и $L_{2} = 0,12$ нГн. Так как транзистор состоит из восьми секций, включённых параллельно, проводился расчёт коэффициента отражения от входа и выхода согласующей суммирующей схемы, нагруженной на полученные Z_{вх} и Z_{вых}. Проверка показала, что рассчитанная по модели транзистора топология обеспечит минимальный коэффициент отражения от входа и выхода схемы в заданной полосе частот.

Таблица 1

Входная мощность,	Выходная мощность, мВт, при частоте, ГГц				
мВт	15,89	16,2	16,39		
7,5	43,75	43,75	39		
75	425	450	380		
112,5	625	637,5	580		
150	750	775	720		

Амплитудные характеристики секции транзистора КРПГ.432153.010

Электрические характеристики каскадов приведены на рис. 3, 4. В выходном каскаде суммируется мощность двух транзисторов с помощью симметричного сумматора/делителя Вилкинсона. Цепи суммирования/деления моста выполняют также функцию согласования.

Некоторое расхождение экспериментальных данных с расчётом (рис. 4) связано, вероятно, с недостаточно точным представлением модели транзистора и согласующих суммирующих цепей выходного каскада на низкочастотном краю диапазона.



Рис. 3. Коэффициент усиления предвыходного каскада на транзисторе КРПГ.432153.010 (*P*_{вх} = 1,1 Вт)



Рис. 4. Коэффициент усиления выходного каскада на двух транзисторах КРПГ.432153.010 ($P_{_{\rm RX}}$ = 3 Вт)

Схема аттенюатора имеет балансную конструкцию и выполнена на диодах типа 2А553. В конструкции используются гибридный мост типа «тандем» и мост Вилкинсона.

На рис. 5 представлены экспериментальные характеристики плавного аттенюатора. Видно, что при изменении управляющего напряжения от 0 до 5 В ослабление изменялось в диапазоне 0...26 дБ, а линейный участок составил 2...26 дБ при $U_{ynp} = 2,32...3,32$ В. При изменении ослабления в диапазоне 0...13 дБ изменение фазы не превышало ±1,2 град. Начальные потери аттенюатора – не более 2,5 дБ.

Детектор используется для контроля выходной мощности. В конструкции микрополосковой платы детектора проходного типа применяется диод с балочными выводами типа 2A131A-3. Чувствительность детектора при прохождении мощности 10 Вт составила 500 мкА.



Рис. 5. Зависимости ослабления аттенюатора от напряжения (*a*) и изменения фазы от величины ослабления (*б*)

Для обеспечения импульсной работы в цепи питания стоков усилительных каскадов включён модулятор. Его электрическая схема приведена на рис. 6.



Рис. 6. Электрическая схема модулятора

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(489), 2007

Усилитель тока работает на микросхеме 1554ЛАЗ. Он предназначен для согласования низкого входного сопротивления фазоинвертора со стандартным ТТЛ-уровнем сигнала управления.

Фазоинвертор собран на транзисторе *VT3*. Применение этого каскада, работающего в активном режиме, позволило избежать удлинения выходного импульса за счёт отсутствия времени рассасывания заряда транзистора *VT3*.

Стабилизатор напряжения на транзисторе *VT2*, предназначенный для питания микросхемы *DD1*, собран по схеме эмиттерного повторителя и имеет выходное напряжение около 5 В.

В схеме защиты использован транзистор VT1. В штатном режиме потенциал базы транзистора равен 0, при этом транзистор закрыт. При отсутствии питания (-5 В) ток от источника (+10 В) через резистор R2 открывает транзистор и таким образом блокируется прохождение сигнала управления модулятором.

Ключевой каскад изготовлен на девяти параллельно включённых транзисторах VT4...VT12. Такое включение обусловлено получением заданного импульсного тока (около 10 A) и минимального падения напряжения на модуляторе (не более 1В). Для обеспечения выравнивания токов управления в цепи баз включены резисторы R8, R12, R16, R19, R21, R23, R25, R27, R29. Потребляемый импульсный ток модулятора составляет 1,3...1,5 A, падение напряжения – 0,8...1 В. Длительность задающего импульса – 0,3...15 мкс, скважность – не менее 10.

Необходимо отметить, что существенного улучшения электрических параметров (уменьшения падения напряжения, уменьшения времени запаздывания включения/выключения, увеличения стабильности параметров в интервале температур) и уменьшения в 4...5 раз габаритных размеров модулятора можно достичь в результате использования импортных полевых *p*-канальных транзисторов типа IRF9Z24NS, IRF9024, IRF9084. Однако отечественные аналоги в настоящее время отсутствуют.

Для реализации возможностей модулятора источник питания (+10 В) должен иметь низкое выходное сопротивление в широком диапазоне частот и заданном температурном диапазоне.

Основной электрический параметр модуля – выходная мощность для шести образцов приведена в табл. 2.

Таблица 2

№ усилителя	Выходная мощность, Вт, при частоте. ГГп					
	15,89	16,0	16,1	16,2	16,3	16,39
1	11,6	11,4	11	11,34	11,0	10,75
2	10,0	9,8	10,0	10,0	10,0	9,6
3	9,2	9,9	10,4	10,4	10,3	9,8
4	9,0	9,7	10,0	9,8	9,3	8,75
5	10,2	10,6	10,6	10,6	10,3	9,8
6	9,8	10,3	10,5	10,5	9,8	9,1

Выходная мощность усилителей в зависимости от частоты

Неравномерность K_p в любой части диапазона не превышает 0,3 дБ в полосе 100 МГц. Усилитель устойчив, уровень внеполосных составляющих от 0,3 кГц до 26,5 ГГц не превышает 70 дБ относительно выходного сигнала.

Амплитудно-фазовые шумы модуля при отстройке 5 кГц не превышают -135 и -120 дБ/Гц соответственно. Подавление входного сигнала в паузе между импульсами составляет не менее 70 дБ за счёт затухания, вносимого усилительными каскадами в отсутствие напряжения на стоках (в паузе). Параметры огибающей СВЧ-сигнала при длительности управляющего импульса $\tau = 15$ мкс показаны на рис. 7.



Скос вершины импульса Δ при $\tau = 15$ мкс не превышает 6 %, задержка переднего $\tau_{_{3.n,\varphi}}$ и заднего $\tau_{_{3.3,\varphi}}$ фронтов огибающей CBЧ относительно задающего импульса модулятора питания – 70 и 150 нс соответственно. При температуре окружающей среды +70 °C задержка спада $\tau_{_{3.3,\varphi}}$ увеличивается на 20...30 нс, при -60 °C $\tau_{_{3.3,\varphi}}$ уменьшается на такую же величину. Длительность фронта $\tau_{_{n,\varphi}} = 40...70$ нс, спада $\tau_{_{3.3,\varphi}} = 30...40$ нс. Задержка выходного CBЧ-импульса относительно входного показана на рис. 8.



Рис. 8. Задержка выходного СВЧ-импульса относительно входного

Применение новых мощных GaAs полевых транзисторов, изготовленных в ФГУП «НПП «Исток», создание нелинейных моделей этих транзисторов и на их основе схем согласования, разработка подложек с высокой диэлектрической проницаемостью, отработка технологических процессов монтажа мощных кристаллов позволили создать модуль с выходной мощностью, более чем на порядок превышающей уровень, достигнутый на сегодняшний день отечественной промышленностью. Фотография модуля показана на рис. 9.

Зарубежный каталогизированный аналог SSPA 9,0...9,5–10 [6] работает в 3-см диапазоне длин волн и имеет выходную мощность 10 Вт.



Рис. 9. Транзисторный импульсный усилитель с выходной мощностью 9...11 Вт в диапазоне частот 15,9...16,4 ГГц

ЛИТЕРАТУРА

 Патент 2235390 РФ, МКИ⁷ Н 01 L 27/13, Н 05 К 1/16 / В.А Пчелин, В.А. Иовдальский; приоритет 17.04.00.
Мощные внутрисогласованные транзисторы 10-, 5-, 3-, 2-см диапазонов длин волн, созданные в ФГУП «НПП «Исток» / А.Н. Королев, А.В. Климова, В.А. Красник, Л.В. Ляпин, В.М. Малыщик, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 2(488). – С. 29-34.

3. Особенности проектирования 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 // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 2(488). – С. 26-28.

4. Разработка ряда мощных внутрисогласованных СВЧ усилительных транзисторов (ВСТ) диапазонов 10 см, 5 см, 3 см, 2 см с выходной мощностью от 1,0 Вт до 10 Вт для передающих каналов радиоэлектронной аппаратуры / *В.А. Пчелин* и др. // Техн. отчет № 5-9258, ОКР «Шест». – ФГУП «НПП «Исток», 2005.

5. Сравнение нелинейных моделей для транзисторов с субмикронным затвором / А.В. Климова, В.А. Красник, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин // Радиотехника. –2006. – №3. – С. 54-57.

6. SSPA9092 Aethercomm, CША. Каталог 2005.

Статья поступила 21 июля 2006 г.

УДК 621.316.543.1

МОНОЛИТНЫЙ ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 0,5...18 ГГЦ, СОГЛАСОВАННЫЙ ПО ВСЕМ КАНАЛАМ

Ю. М. Богданов, В. Г. Лапин, А. М. Темнов, Ф. Е. Щербаков

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Предложена схема двухканального переключателя, содержащего в каждом канале по два последовательно и три параллельно включенных ПТШ. Малые КСВН достигаются за счет включения в истоки оконечных ПТШ резисторов с сопротивлениями, близкими к 50 Ом. Показано, что в полосе частот 0,5...18 ГГц прямые потери не превышают 2 дБ, затухание превосходит 100 дБ, а КСВН не превышает 1,3. Разработана топология монолитного переключателя.

A circuit of two-way switch containing two serially and three parallel switched MESFETs in each channel is presented. Low VSWRs are gained due to including resistors with resistances close to 50Ω into the sources of the terminal MESFETs. It is shown that the direct loss doesn't exceed 2dB, the attenuation is over 100 dB, and VSWR is not more than 1.3 in 0.5...18 GHz frequency range. The topology of a monolithic switch has been developed.

Развитие электроники СВЧ идет по пути миниатюризации электронных приборов. Дальнейшие этапы миниатюризации связаны с переходом от ГИС к монолитным интегральным схемам (МИС). Последние выполняются на кристалле из арсенида галлия, а составляющие их активные и пассивные элементы изготавливаются в едином технологическом цикле.

При создании монолитных переключателей необходимо решить широкий круг задач – от физического и математического моделирования полевых транзисторов с барьером Шотки (ПТШ) в ключевом режиме до проектирования топологии монолитного переключателя [1-4]. Если в открытом канале малая величина КСВН сверхширокополосного переключателя достигается за счет малых прямых потерь, то для обеспечения таких же значений КСВН в закрытом канале необходим поиск новых схемных решений.

Цель настоящей работы – выполнить схемотехническое и топологическое проектирование монолитного двухканального переключателя, удовлетворяющего следующим электрическим параметрам:

Рабочий диапазон частот	0,5 – 18 ГГц
Минимально возможные потери в открытом состоянии	не более 2 дБ
Максимально возможные потери в закрытом состоянии	не менее 100 дЕ
КСВН во всем диапазоне	не более 1,3

Основу монолитного переключателя составили разработанные в $\Phi \Gamma \Psi \Pi$ «Исток» ПТШ с параметрами: длина затвора l = 0,3 мкм; ширина затвора w = 300 мкм; толщина актив-

ного слоя a = 0,2 мкм; концентрация носителей $N = 4 \cdot 10^{17}$ см⁻³; напряжение отсечки – 2 В; ток насыщения – 100 мА.

Для определения параметров в ключевых режимах транзистор, включенный по схеме с общим истоком, припаивался к специальной измерительной микрополосковой оправке. Измерение малосигнальных *S*-параметров проводилось на анализаторе цепей в интервале частот 0,5...18 ГГц для двух состояний транзистора: $E_g = 0$, $E_d = 0$, $I_{ds} = 0$ («открыто»); $E_g = -3$ В, $E_d = 0$, $I_{ds} = 0$ («закрыто»). Здесь E_g и E_d – напряжения питания в цепях затвора и стока соответственно; I_{ds} – ток между стоком и истоком.

Напрямую воспользоваться измеренными малосигнальными *S*-параметрами для проектирования переключателей не представляется возможным. Во-первых, схемы включения ПТШ в переключателе отличаются от используемой при измерении *S*-параметров схемы с общим истоком. Во-вторых, монолитные переключатели не должны содержать проводники, используемые при припаивании ПТШ к измерительной микрополосковой схеме, поэтому индуктивности проводников, входящие в *S*-параметры, должны быть исключены. Указанные причины приводят к необходимости расчета параметров эквивалентных схем ПТШ в ключевых состояниях по специальной методике.

С помощью оптимизационных процедур определялись значения параметров малосигнальных эквивалентных схем ПТШ (рис. 1), при которых сумма квадратов разности измеренных и рассчитанных S-параметров достигала минимального значения. При этом в состоянии «открыто» ПТШ описывался эквивалентной схемой, показанной на рис. 1,*a*, а значения рассчитанных в результате оптимизации параметров составили: $C_{gs} = C_{gd} = 0,27 \text{ пФ}$; $R_{ds} = R_0 = 3,3 \text{ OM}$; $R_g = 1,3 \text{ OM}$; $R_d = 1,25 \text{ OM}$; $R_s = 1,1 \text{ OM}$; $L_g = 0,3 \text{ нГн}$; $L_d = 0,33 \text{ нГн}$; $L_s = 0,06 \text{ нГн}$.



Рис. 1. Эквивалентные схемы ПТШ в ключевых состояниях

В состоянии «закрыто» схема имела вид, показанный на рис. 1, δ , со следующими оптимальными значениями параметров: $C_{gs} = 0,2 \ \pi \Phi$; $C_{gd} = 0,06 \ \pi \Phi$; $C_{ds} = 0,09 \ \pi \Phi$.

Сопротивления R_g , R_d , R_s и индуктивности L_g , L_d , L_s в процессе оптимизации в состоянии «закрыто» не изменялись и принимались такими же, что и в режиме «открыто».

Используя полученные эквивалентные схемы ПТШ в ключевых состояниях, были рассчитаны основные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) двухканального переключателя, схематично изображенного на рис. 2. В каждом канале переключателя используются последовательные и параллельные схемы включения ПТШ. При последовательном включении входной сигнал подается на исток, а выходной – снимается со стока. При параллельном включении ПТШ исток соединен с «землей», сигнал подается и снимается со стока. В обоих случаях управляющее напря-



Рис. 2. Принципиальная электрическая схема двухканального переключателя

жение подается на затвор. В каждом канале переключателя используются пять транзисторных структур, поскольку, как показали оценочные расчеты, применение меньшего числа транзисторов не позволяет достичь требуемого уровня ослабления.

Для снижения КСВН предложено в оконечном ПТШ в цепь истока включать резистор, расчетное значение которого составило 45 Ом. В состоянии «закрыто» сопротивление транзистора во много раз превышает сопротивление резистора и влияние его на прямые потери и КСВН открытого канала незначительно. В состоянии «открыто» сопротивление транзистора, составляющее примерно 5 Ом, складывается с сопротивлением последовательно включенного резистора (45 Ом) и закрытый с помощью других ПТШ канал на входе имеет сопротивление, равное волновому сопротивлению подводящей линии.

Для снижения прямых потерь между двумя параллельными ПТШ в каждом канале включена индуктивность *L*, роль которой сводится к дополнительному согласованию этих ПТШ. На рис. 3 приведены зависимости от частоты развязки и потерь в каналах переключателя. При опти-



Рис. 3. Потери (1) и развязка (2) в открытом и закрытом состояниях соответственно
мальных величинах индуктивностей потери снижаются до 2 дБ в диапазоне частот, а ослабление увеличивается до 100 дБ. При этом КСВН на входе и двух выходах переключателя не превышают 1,2 (рис. 4).



Рис. 4. КСВН всех портов переключателя: *1* – порт 1 (вход); *2* – порт 2 (открыт); *3* – порт 3 (закрыт)

На основании проведенных расчетов была разработана топология монолитной схемы переключателя, показанная на рис. 5.



Рис. 5. Топология переключателя

ЛИТЕРАТУРА

1. A higli integrated X-Band MMIC SPDT switch in CPW technique / R. Mehran, M.M. Bokatuy and al. // 11th Conference and Exhibition on Microwave. Germany, Stuttgart. – May 2001. – P. 223-225.

2. *Muldavin J.B., Rebeiz G.M.* High-isolation CPW MEMS shunt switches. Part 2: Design // IEEE Trans. MTT-48. – 2000. – Vol. 48, No.6. – P. 403-407.

3. A 50 MHz - 30 GHz broadband coplanar waveguide SPDT pin diode switch with 45-dB isolation / *K.W. Kobayashi, L. Tran, A.K. Oki, D.C. Streit* // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1995. – Vol. 5, No. 2. – P. 56-58.

4. Проектирование монолитного двухканального переключателя СВЧ / А.К. Балыко, А.В. Климова, В.Г. Лапин и др. // Радиотехника. – 2004. – № 2. – С. 40-47.

Статья поступила 16 октября 2006 г.

\equiv новые книги \equiv

Мощные биполярные транзисторы для импульсных источников питания, ТV-приемников и мониторов. Справочник / Сост. Ю.Ф. АВРАМЕНКО. - М.: Издательский дом «Додэка-XXI», К.: «МК-Пресс», 2006. - 544 с., ил.

В справочнике приведены электрические характеристики мощных биполярных транзисторов, имеющих высокую скорость переключения. Данные приборы применяются в импульсных источниках питания различного назначения, в промышленном оборудовании, в бытовой и профессиональной видео- и аудиотехнике. В книге представлены изделия следующих ведущих производителей полупроводниковых приборов: FAIRCHILD, HITACHI, MOTOROLA (ON SEMICONDUCTOR), PANASONIC, PHILIPS, SANKEN, SAMSUNG, SANYO, SHINDENGEN, ST-MICROELECTRONICS, TOSHIBA и ZETEX. Таблица аналогов полупроводниковых приборов составлена на основании руководства Master Replacement Guide. Справочник рассчитан на специалистов, занимающихся обслуживанием и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры, а также на радиолюбителей. УДК 621.3.049.77.029.64

ЭВОЛЮЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТИПОВЫХ ФРАГМЕНТОВ ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Приводятся различные конструктивно-технологические варианты исполнения типового фрагмента ГИС СВЧ, состоящего из кристаллов ПТШ и двух блокировочных конденсаторов, которые установлены на диэлектрическую подложку платы всевозможными способами. Поясняются преимущества приводимых конструкций фрагмента. На рассматриваемых примерах фрагментов прослеживается эволюция ГИС СВЧ.

Different design-technological versions of realization of a microwave HIC typical fragment consisting of MESFET chips and two bypass capacitors arranged on board dielectric substrate by all possible ways are shown. The advantages of the given fragment designs are explained. One can follow microwave HIC evolution on the examples of the fragments considered.

1. В В Е Д Е Н И Е

Стремление разработчиков к улучшению электрических, тепловых и массогабаритных характеристик ГИС СВЧ влечет за собой неминуемое совершенствование их конструкции и, как следствие, изменение технологии изготовления.

Появление новых технологических возможностей, в свою очередь, открывает новые пути создания совершенных конструкций ГИС СВЧ с улучшенными характеристиками. Таким образом, можно наблюдать эволюцию ГИС СВЧ и их постоянное конструктивно-технологическое совершенствование.

2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

В конструкциях ГИС СВЧ есть часто используемые элементы или их сочетания. Таким фрагментом ГИС может быть, например, сочетание кристалла транзистора, расположенного на металлизированной площадке на лицевой стороне диэлектрической подложки микрополосковой платы (МПП), и двух блокировочных конденсаторов в виде кристаллов, установленных нижней обкладкой на металлизированной площадке и соединенных через металлизированные отверстия с экранной заземляющей металлизацией, которая нанесена на обратную сторону диэлектрической подложки МПП (рис. 1) [1]. Этот типовой фрагмент конструкции ГИС СВЧ наиболее часто применяется в усилительных балансных каскадах входных усилителей и приемопередающих модулей. Причем используются обычно два одинаковых типовых фрагмента. Таким образом, улучшение конструкции типового фрагмента ГИС СВЧ является актуальной задачей и может оказать влияние на улучшение характеристик схемы.





Рис. 1. Фрагмент ГИС СВЧ с кристаллами ПТШ и конденсаторов на поверхности подложки платы: *1* - диэлектрическая подложка; *2* - металлизированная площадка в составе топологического рисунка металлизации на лицевой стороне диэлектрической подложки платы; *3* - экранная заземляющая металлизация на обратной стороне диэлектрической подложки; *4* - кристалл ПТШ; *5* - кристалл конденсатора; *6* - нижняя обкладка конденсатора; *7* - металлизированное отверстие в диэлектрической подложке, заполненное связующим веществом; *8* - контактная площадка кристалла ПТШ; *9* - соединительный проволочный или балочный проводник; *10* - верхняя обкладка конденсатора; *11* - диэлектрик конденсатора; *12* - металлическое теплоотводящее основание; *13* - связующее вещество Одним из путей улучшения совокупности электрических, тепловых и массогабаритных характеристик ГИС СВЧ является использование объема подложки МПП для размещения компонентов схемы, в частности кристаллов транзистора (ПТШ) и конденсаторов. На рис. 2 показан типовой фрагмент в подобном исполнении [2].



Рис. 2. Фрагмент конструкции ГИС СВЧ с расположением кристаллов ПТШ и конденсаторов в объеме диэлектрической подложки МПП:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - металлизированное фигурное углубление на лицевой стороне диэлектрической подложки; 3 - экранная заземляющая металлизация; 4 - кристалл ПТШ; 5 - кристалл конденсатора; 6 - нижняя обкладка конденсатора; 7 - металлизированное отверстие, заполненное связующим веществом; 8 - контактная площадка кристалла ПТШ; 9 - соединительный проволочный проводник; 10 - верхняя обкладка конденсатора; 11 - диэлектрик конденсатора; 12 - металлическое теплоотводящее основание; 13 - связующее вещество

Представленная конструкция позволяет улучшить электрические характеристики за счет уменьшения паразитной индуктивности соединительных проводников в результате сокращения их длины. Кроме того, подложка под тепловыделяющим элементом – транзистором стала тоньше, чем на рис. 1. Следовательно, уменьшится ее тепловое сопротивление, а значит, улучшатся тепловые характеристики. И наконец, расположение группы кристаллов в фигурном металлизированном углублении, выполненном в диэлектрической подложке платы, позволяет снизить высоту и массу ГИС СВЧ и тем самым улучшить массогабаритные характеристики. Однако такая конструкция, хотя и обладает рядом преимуществ, сложна в изготовлении. Поэтому работы по совершенствованию конструкции и технологии типового фрагмента конструкции ГИС СВЧ были продолжены. Так появилась конструкция, представленная на рис. 3 [3].

В этой конструкции кристаллы ПТШ и конденсаторов помещены на фигурную металлическую вставку, установленную, в свою очередь, в металлизированное отверстие, выполненное в диэлектрической подложке платы, на металлическое теплоотводящее основание. Металлические детали (в данном случае вставки) со сложным профилем изготовить проще, чем сложнопрофильные углубления в подложке платы, поэтому такой вариант более технологичен. Пре-



Рис. 3. Фрагмент ГИС СВЧ с кристаллами ПТШ и конденсаторов, установленными в объеме подложки на фигурную металлическую составную вставку:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - металлизированное отверстие в диэлектрической подложке; 3 - экранная заземляющая металлизация; 4 - кристалл ПТШ; 5 - кристалл конденсатора; 6 - нижняя обкладка конденсатора; 7 - верхняя обкладка конденсатора; 8 - контактная площадка конденсатора; 9 - соединительный проводник; 10 - металлическое теплоотводящее основание; 11 - фигурная металлическая составная вставка; 12 - связующее вещество (припой или клей)

имущества такой конструкции по сравнению с предыдущей – хороший теплоотвод от транзистора и высокая технологичность.

Появление конструкции конденсаторов в составе МПП [4], в которой в качестве диэлектрика конденсатора используется материал подложки, в качестве нижней обкладки конденсатора – экранная заземляющая металлизация, а верхняя обкладка выполняется в составе топологического рисунка металлизации, позволило дополнительно улучшить электрические характеристики за счет применения более коротких и плоских балочных выводов. Кроме того, в результате сокращения числа паяных соединений повысилась надежность и снизилась трудоемкость изготовления ГИС СВЧ (рис.4).

Однако и эта конструкция ГИС СВЧ имеет недостаток: невозможность получения блокировочных конденсаторов емкостью более единиц пикофарад, так как остаточная толщина платы должна обеспечивать прочность конструкции.

Появление пленочных конденсаторов в составе МПП, выполненных на металлических вставках [5], позволило устранить этот недостаток и создать новую конструкцию рассматриваемого фрагмента ГИС СВЧ с улучшенными электрическими и тепловыми характеристиками (рис. 5).

Кристалл ПТШ располагается в углублении, выполненном на поверхности диэлектрической подложки платы таким образом, что плоскость лицевой стороны кристалла ПТШ совпадает с плоскостью диэлектрической подложки лицевой стороны платы. Металлические вставки, выполняющие роль нижних обкладок конденсаторов, могут быть расположены в непосредственной близости от кристалла ПТШ (или даже вплотную) и являются мощным теплоотводом. Такое расположение конденсаторов обеспечивает уменьшение длины плоских балочных



Рис. 4. Фрагмент конструкции ГИС СВЧ с пленочными конденсаторами, встроенными в объем подложки:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - топологический рисунок металлизации; 3 - экранная заземляющая металлизация; 4 - конденсатор; 5 - металлизированное отверстие, глухое с лицевой стороны диэлектрической подложки;
 6 - нижняя обкладка конденсатора; 7 - углубление на лицевой стороне диэлектрической подложки; 8 - связующее вещество; 9 - кристалл полупроводникового прибора (ПТШ); 10 - контактные площадки кристалла полупроводникового прибора; 11 - плоский балочный вывод; 12 - верхняя обкладка конденсатора; 13 - теплоотводящее основание; 14 - связующее электро- и теплопроводящее вещество; 15 - дно металлизированных отверстий, глухих с лицевой стороны диэлектрической подложки; 16 - металлизация углубления на лицевой стороне диэлектрической подложки; 17 - теплоотводящая вставка; 18 - металлизированное отверстие, выполненное в дне углубления на лицевой стороне диэлектрической подложки;



Рис. 5. Фрагмент конструкции ГИС СВЧ с пленочными конденсаторами, выполненными на металлических вставках:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - топологический рисунок металлизации; 3 - верхняя обкладка конденсатора;
 4 - диэлектрик конденсатора; 5 - нижняя обкладка конденсатора; 6 - отверстие в диэлектрической подложке;
 7 - металлизация стенок отверстия; 8 - металл, заполняющий отверстие (металлическая вставка); 9 - углубление на лицевой стороне диэлектрической подложки; 10 - металлизация углубления; 11 - связующее вещество; 12 - кристалл полупроводникового прибора; 13 - контактная площадка кристалла полупроводникового прибора; 14 - плоский балочный вывод (соединительный проводник); 15 - металлизированное отверстие в дне углубления; 16 - экранная заземляющая металлизация; 17 - связующее электро- и теплопроводящее вещество; 18 - теплоотводящее основание

соединительных проводников, а значит, уменьшает их паразитную индуктивность и тем самым улучшает электрические характеристики.

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Очевидно, что с изменением конструкции типового фрагмента ГИС СВЧ меняется технология его изготовления.

Так, для реализации конструкции, представленной на рис. 1, достаточно применения типовой технологии изготовления МПП, операций посадки кристаллов транзистора и конденсаторов на поверхность платы и термокомпрессионного присоединения проволочных соединительных проводников.

Использование конструкции МПП со сложнопрофильным углублением (рис. 2) требует дополнительно применения процессов прецизионного фрезерования диэлектрических подложек. Для выполнения фрагмента ГИС СВЧ, представленного на рис. 3, в технологический маршрут изготовления МПП включают сверх перечисленных процессы изготовления фигурной металлической вставки, закрепления ее в отверстии, выполненном в подложке МПП, и на металлическом теплоотводящем основании и монтажа кристаллов на металлическую вставку.

Следующий вариант, с использованием в качестве диэлектрика конденсаторов материала подложки (рис. 4), требует внесения в технологический маршрут изготовления МПП операций прецизионного фрезерования диэлектрических подложек и посадки кристалла транзистора в углубление.

Применение в ГИС СВЧ пленочных конденсаторов на металлических вставках (рис. 5) также имеет свою специфику и требует изготовления металлических вставок, их монтажа в подложку и т.д.

Таким образом, каждый из конструктивно-технологических вариантов изготовления ГИС СВЧ имеет свою специфику. Однако для их реализации не требуется специального дорогостоящего оборудования, что делает возможным их применение в серийном производстве ГИС.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы установлено:

1. Причиной изменения конструкции типового фрагмента ГИС СВЧ является стремление улучшить электрические, тепловые и массогабаритные характеристики.

2. Путями дальнейшего улучшения характеристик ГИС являются:

 совершенствование конструкции составных частей ГИС СВЧ, в частности конструкции блокировочных конденсаторов;

- совершенствование конструкции соединений (применение плоских балочных выводов);

– совершенствование конструкции самой ГИС за счет более удачного взаимного расположения ее составных частей, что связано прежде всего с активным использованием объема и материала подложки МПП ГИС.

На примере совершенствования типового фрагмента удалось проследить эволюцию конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ за последние годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Патент 2025822С1 РФ, МКИ⁵ Н 01 L 21/00. Гибридная интегральная схема / В.А. Иовдальский, Э.И. Рыжик, Б.А. Тархов. Приоритет 19.03.91.

3. *Иовдальский В.А., Моргунов В.Г., Лисицин А.А.* Совершенствование конструкции ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2005. – Вып.2(486). – С. 34-38.

4. Патент 2227345 РФ, МКИ⁷ Н 01 L 27/13, Н 05 К 1/16. Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / *В.А. Иов- дальский, И.Н. Калинин*. Приоритет 26.02.02.

5. Патент 2235390С1 РФ, МКИ⁷ Н 01 L 27/13, Н 05 К 1/16. Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В.А. Иовдальский, В.А. Пчелин, К.Б. Джуринский. Приоритет 27.01.03.

Статья поступила 8 ноября 2006 г.

\equiv новые книги \equiv

АЛМАЗОВ-ДОЛЖЕНКО К.И., КОРОЛЕВ А.Н. **Техническая электродинамика** и устройства СВЧ. - М.: Научный мир, 2006. - 263 с., ил.

Учебное пособие предназначается для студентов ВТУЗов специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», изучающих курс «Техническая электродинамика и устройства СВЧ».

Рассматриваются некоторые особенности диапазона СВЧ и области применения устройств этого диапазона. Изучаются основные виды линий передачи СВЧ и типовые пассивные элементы СВЧ трактов (ослабители, согласователи, фильтры, мосты, резонаторы, ферритовые устройства и др.), широко используемые в различных СВЧ установках. Имеются разделы по антеннам СВЧ, экранированию и измерениям.

По конкретным типам СВЧ устройств рекомендуется литература, позволяющая провести их расчет и конструирование.

Для повышения наглядности в каждом разделе приводятся примеры практического применения СВЧ узлов в различных схемах и установках.

Пособие представляет собой краткое изложение основных вопросов учебной программы по курсу и рекомендуется для первоначального ознакомления с изучаемым предметом.

Книга может быть полезна также для студентов родственных специальностей и частично - для студентов колледжей радиотехнического направления.

УДК 621.382.2.029.64

МОДЕРНИЗАЦИЯ БЕСКОРПУСНЫХ ДИОДОВ СВЧ

В. В. Аверин, Н. Б. Гудкова, Е. В. Мицук, А. М. Темнов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Представлены результаты разработки и модернизации широко используемых в устройствах СВЧ импульсных, смесительных и варакторных диодов СВЧ. Проведены эксперименты с алмазным теплоотводом, показавшие снижение теплового сопротивления на 10...20 % по сравнению с медным теплоотводом.

The results of the development and upgrading of pulsed, mixing and varactor microwave diodes widely used in microwave units are presented. The experiments with a diamond heat sink were made which showed 10 ... 20% decrease of heat resistance as compared to copper heat sink.

В связи с разработкой СВЧ-приборов и устройств с повышенными выходными параметрами большое внимание уделяется совершенствованию технологии изготовления полупроводниковых приборов, в том числе и диодов СВЧ [1].

В работе приведены результаты разработки широко используемых в устройствах СВЧ импульсных, смесительных и варакторных диодов СВЧ.

Разработка импульсных диодов включала в себя четыре основные задачи: разработка технологии изготовления диодов, разработка конструкции и технологии сборки диодов, оптимизация параметров эпитаксиальных структур, разработка и оптимизация конструкции измерительной оснастки.

Основные отличия технологии изготовления импульсных диодов по сравнению с непрерывными обусловлены их спецификой: более высокая плотность импульсного тока (порядка 100...150 кА/см²) и большая площадь мезаструктуры. Первая особенность предъявляет повышенные требования к омическим контактам, в связи с чем была разработана технология напыления омической металлизации (Cr – Pd - Au), позволяющая получать контактное сопротивле-



ние не хуже 6·10⁻⁶ Ом·см². Для реализации мезаструктур с большой площадью был разработан комплект фотошаблонов, обеспечивающий получение мезаструктур диаметром 100 мкм и выше.

Конструкция диода схематично представлена на рис. 1.

В процессе работы исследовались различные варианты конструктивного исполнения: варьировались размеры рубиновой втулки, способы ее посадки на кристаллодержатель, способы приварки крышки, геометрия вывода. Критериями выбора оптимальной конструкции являлись, в первую очередь, максимальная выходная мощность и заданный диапазон частот. Вместе с тем большое значение придавалось механической прочности и надежности. В результате был получен оптимальный комплекс параметров конструкции: внешний диаметр втулки – 0,5 мм, внутренний – 0,2 мм, высота – 0,15 мм; ширина крестообразного вывода – 120 мкм; емкость кристалла при напряжении пробоя – 2,5...2,8 пФ. Режим термокомпрессии втулки: температура – 280°С, давление – 3 атм. Режим термокомпрессии крышки (вместо пайки): температура – 280°С, давление – 2,5 атм.

С помощью теоретических расчетов были определены основные параметры эпитаксиальных структур: длина и концентрация носителей в слоях двухпролетного ЛПД. Экспериментальные исследования показали, что наилучшие результаты достигаются при следующих параметрах: длина контактного слоя – 0,15 мкм; концентрация носителей в контактном слое – $8 \cdot 10^{19}$ см⁻³; длина *n*-области – 0,4 мкм; концентрация в *n*-области – 1,8 $\cdot 10^{17}$ см⁻³; длина *p*-области – 0,4 мкм; концентрация в *p*-области – 1,8 $\cdot 10^{17}$ см⁻³.

Для измерения параметров импульсных диодов была разработана резонансная волноводная камера (рис. 2), представляющая собой отрезок волновода пониженного сечения (0,4×2,4 мм) с последующим переходом на стандартное сечение волновода.

Были опробованы дисковый и штыревой типы резонатора. Полученные результаты показали предпочтительность последнего. Большое внимание уделялось





оптимизации параметров фильтра в цепи питания. Были установлены оптимальные размеры резонансной камеры: диаметр штыря – 0,8 мм; диаметр фильтра – 3 мм, высота – 1 мм.

В результате проделанной работы получены: выходная импульсная мощность – более 10 Вт; диапазон рабочих частот – 90...98 ГГц; импульсный ток – не более 15 А.

Данные параметры получены при длительности импульса 100 нс и скважности 500.

Разработка базовой технологии изготовления смесительных диодов предполагала решение следующих задач: выбор материала барьерного металла; выбор материала омического контакта; формирование диэлектрического носителя.

Выбор материала барьерного металла определяет величину барьера и, следовательно, пороговую чувствительность смесителя. В качестве барьерных металлов исследовались Ti, Cr, NiCr. Выбор материалов регламентировался наличием оборудования для напыления металлических слоев. Величина барьера определялась из измерений вольт-фарадных характеристик тестовых структур и готовых диодов. Величина барьера составила 0,65 В для нихрома и 0,63 В для титана. Еще одной важной характеристикой, определяющей чувствительность, является коэффициент идеальности. Он находится из ВАХ диода, и величина его составила 1,33 для диодов с барьером из нихрома.

Качество омического контакта влияет на величину сопротивления диода, а значит, на величину потерь преобразования. В качестве контактной была выбрана система титан–палладий, имеющая контактное сопротивление 7·10⁻⁶ Ом·см².

Одновременно исследовалась возможность формирования барьерного и омического контактов в едином технологическом процессе. Выбор титана в качестве барьерного металла обусловлен еще и хорошей адгезией его к двуокиси кремния, который является несущим диэлектриком. Однако температура напыления системы титан–палладий для обеспечения хорошей адгезии и низкого контактного напряжения высокая (300...350 °C), поэтому исследовалось влияние температуры напыления на величину барьера и коэффициента идеальности. В качестве критериев оценки выбирались дифференциальное сопротивление диода и прямое падение напряжения. Температура варьировалась в диапазоне 150...350 °C. С учетом величины естественного разброса параметров по пластине существенного изменения указанных величин обнаружено не было. Таким образом, в качестве системы металлизации использовалась композиция термически напыленных слоев титана и палладия. Причем формирование омического и барьерного контактов проводилось в едином технологическом цикле.

Серьезной проблемой является формирование диэлектрика. Величина конструктивной емкости определяется толщиной и диэлектрической проницаемостью диэлектрика, а также площадью балочного вывода, проходящего на поверхности кремния. Традиционно в качестве диэлектрика используется двуокись кремния, имеющая, однако, повышенную хрупкость, что приводит к ухудшению характеристик при монтаже, уменьшению надежности и процента выхода годных при сборке.

Для повышения прочности балочных выводов был использован дополнительный диэлектрический слой на основе полиимида. Преимуществом данного материала является возможность формирования локальных областей заданной толщины и конфигурации методом фотолитографии в едином технологическом процессе. Предложенная технология позволила получить отрывное усилие не менее 0,4 г.

Разработанные диоды имеют следующие параметры: емкость – не более 0,13 пФ; сопротивление – не более 12 Ом; потери преобразования – не более 7,5 дБ.

Были проведены исследования низкочастотных шумов диодов. Диоды имеют коэффициент шума порядка 20 дБ на частоте 15 ГГц, промежуточная частота составила 20 кГц, мощность гетеродина – 6 мВт.

При изготовлении варакторных диодов необходимо было решать аналогичные задачи: выбор материала омического контакта; разработка локального золочения; разработка технологии разделения кристаллов и утонения подложки.

Эпитаксиальные структуры для варакторных диодов имеют следующие параметры: длина контактного слоя – 0,23 мкм; концентрация носителей в контактном слое – $8 \cdot 10^{19}$ см⁻³; длина *n*-области – 0,1 мкм; концентрация в *n*-области – (4...7)· 10^{17} см⁻³; длина *n*⁻области – 2,2 мкм; концентрация в *p*-области – (1...3)· 10^{15} см⁻³.

Высокая величина добротности предъявляет жесткие требования к омическим контактам, в связи с чем была разработана технология напыления омической металлизации (Cr – Pd - Au), позволяющая получать контактное сопротивление не хуже 6·10⁻⁶ Ом·см². Технологический процесс изготовления варакторных диодов включал операции предварительного утонения пластины до толщины 6...8 мкм и формирования контактных площадок и балочных выводов на обеих сторонах пластины. Для обеспечения конструктивной прочности в процессе изготовления (после напыления контактной металлизации и формирования балочного вывода на одной стороне пластины) формировался несущий слой гальванически выращенной меди и производились утонение пластины и формирование балочного вывода на противоположной стороне пластины. Далее слой меди удалялся. Мезаструктуры диодов формировались плазмохимическим травлением, при этом маской служили верхние балочные выводы. Контроль плазмохимического про-

цесса осуществлялся по величине требуемой емкости. Емкость диодов измерялась непосредственно на пластине. Готовые диоды покрывались защитным лаком АД9103. Измерение емкости проводилось на установке Е7-12. Коэффициент перекрытия измерялся при напряжении $U = U_{\rm np}$ - 3 B, где $U_{\rm np}$ – пробивное напряжение варакторного диода.

Разработанные диоды имеют следующие параметры: емкость – 1...10 пФ; коэффициент перекрытия – более 15; пробивное напряжение – не менее 50 В.

Для определения добротности производилось измерение *S*-параметров варактора, включенного в микрополосковую линию в качестве оконечного элемента. По результатам измерений определялись параметры эквивалентной схемы и вычислялась добротность, приведенная к частоте 50 МГц. Добротность разработанных варакторов составила от 4000 до 10 000.

4. ДИОДЫ НА АЛМАЗНОЙ ПОДЛОЖКЕ

Интерес к теплопроводящим диэлектрическим подложкам постоянно растет, тем более к алмазным, обладающим уникально высокой теплопроводностью. В области разработки генераторных устройств на основе ЛПД этот интерес обусловлен тем, что позволяет снизить тепловое сопротивление ЛПД. Это, в свою очередь, обеспечивает либо снижение рабочей температуры кристалла и тем самым повышение его надежности, либо повышение рабочих токов и, следовательно, выходной мощности. Проведенные эксперименты показали возможность снижения теплового сопротивления на 10...20 % по сравнению с медным теплоотводом.

При выполнении работы был опробован вариант генератора на основе волноводно-щелевой линии. Однако получить существенный выигрыш по выходной мощности не удалось. По-видимому, это связано с недостаточно хорошим согласованием ЛПД с нагрузкой.

Учитывая этот опыт, был разработан резонатор, в котором только диод расположен на алмазной подложке, а остальные элементы выполнены в чисто волноводном варианте. Это позволило исследовать принципиально возможные преимущества таких генераторов.

В результате проведенных исследований были получены параметры генераторов: выходная мощность – 150...160 мВт; рабочая частота – 90...98 ГГц; температурный коэффициент частоты – 6...7 мГц / °С.

Для сравнения надо сказать, что генераторы с диодами, собранные на медном теплоотводе, имеют выходную мощность 70...100 мВт в том же диапазоне.

Исследование возможности синхронизации такого генератора показало, что полоса синхронизации составляет 300...600 МГц при мощности накачки 70 мВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гусятинер М.С., Горбачев А.И.* Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. – М.: Радио и связь, 1983.

Статья поступила 24 ноября 2006 г.

УДК 621.375.4.029.64

РЯДЫ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ GaAs МИС

Ю. М. Богданов, В. А. Красник, В. Г. Лапин, В. А. Лукьянов, А. М. Темнов, К. И. Петров, И. В. Самсонова

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Приведены результаты разработки промышленных конструкций и технологий четырех модульных гибридно-монолитных интегральных устройств СВЧ: делителя частоты на 2; активного балансного умножителя частоты на 2; двойного балансного смесителя; балансного преобразователя частоты.

The results of development of industrial designs and technologies for four microwave modular hybrid-monolithic integrated circuits are presented: a frequency divider by 2; an active balanced frequency multiplier by 2; a double balanced mixer; a balanced frequency converter.

1. ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени актуальной является задача разработки и внедрения в серийное производство надежной, высококачественной СВЧ полупроводниковой элементной базы для обеспечения выпуска современной РЭА [1–3].

В данной работе поставлена и решена задача по разработке и организации производства функционально полного набора МИС СВЧ для преобразования спектра сигналов. Важной особенностью изделий является их взаимная увязка по входным и выходным параметрам, что обеспечивает возможность каскадного соединения изделий одного или разных типов.

В гибридно-монолитных устройствах, описанных в работе, используются балансные схемы включения полевых транзисторов с барьером Шотки (ПТШ). Это обстоятельство привело к необходимости разработки универсального многофункционального активного кристалла по схеме аналогового балансного перемножителя частоты (МИС АБПЧ) [3].

2. ОПИСАНИЕ МИС АБПЧ

Принципиальная электрическая схема МИС АБПЧ приведена на рис. 1. Микросхема размещена на кристалле арсенида галлия и содержит три полевых транзистора и четыре микроконденсатора с номиналами от 0,4 до 2,5 пФ. В качестве базовой при разработке микросхемы АБПЧ использована технология монолитных интегральных схем на арсениде галлия на основе ПТШ с длиной затвора 0,25 мкм. Микросхема имеет восемь выводов для подачи на транзисторы напряжений смещения, ввода и вывода СВЧ-сигналов. Поскольку все транзисторы выполнены на едином кристалле и по единой технологии, то соответствующие их параметры отличаются незначительно, что является необходимым условием работы балансной схемы. Преимуществом балансной схемы является высокая развязка между СВЧ-входами и выходами.

Используя различные варианты включения микросхемы АБПЧ, можно реализовать следующие различные типы гибридно-монолитных приборов: делителя частоты, активного балансного умножителя частоты, двойного балансного смесителя, балансного преобразователя частоты.

3. ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Несмотря на то, что делители частоты относятся к числу наиболее используемых в аппаратуре СВЧ узлов, остается актуальной задача создания современных приборов на основе технологии монолитных интегральных микросхем.

В настоящей работе создан литерный монолитный делитель частоты на 2 на основе ПТШ, работающий в диапазоне частот по входу 1...12 ГГц. Коэффициент деления более 2 обеспечивается каскадным соединением нескольких делителей частоты на 2. Принципиальная схема делителя частоты приведена на рис. 2.

Микросхема АБПЧ размещена на кристалле арсенида галлия. Остальные элементы – на подложке из сапфира.

Расчет линейной и нелинейной частей схемы производился с помощью пакета программ Serenada. Топологическое проектирование выполнено с помощью программы Autocad-2000. Теоретический анализ схем осуществлен на основе построенных линейной и нелинейной моделей трех типов ПТШ.

Для реализации полного диапазона частот по входу 1...12 ГГц разработано восемь типов плат на сапфировой подложке. Результаты испытаний приведены в табл. 1.



Рис. 1. Принципиальная электрическая схема МИС АБПЧ



Рис. 2. Пример реализации СВЧ-делителя частоты на основе МИС АБПЧ

Таблица 1

Результаты испытаний делителя частоты

Параметр	Норма			
	не менее	номинал	не более	
Рабочий диапазон частот входного сигнала <i>f</i> _p , ГГц	1	Ι	12	
Коэффициент деления, отн.ед.	_	2^N	_	
Выходная мощность, мВт	2	_	8	
Полоса рабочих частот по входному сигналу, ГГц	2	_	_	
Потребляемый ток, мА	_	-	45 x <i>N</i>	
Напряжение источника питания, В	4,75	5,0	5,25	
Входная мощность, мВт: для f _p =28 ГГц для f _p =812 ГГц	5 10	_	20 30	
КСВН входа/выхода, отн.ед.	_	_	2	

4. УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Известные умножители частоты строятся преимущественно на основе варакторов или дискретных ПТШ. Недостатками диодных умножителей являются узкий диапазон рабочих частот; высокая подводимая мощность; склонность к нежелательным параметрическим эффектам при отрицательных температурах, приводящим к «рассыпанию» спектра; большие потери преобразования.

Умножители на дискретных ПТШ при несколько больших полосах рабочих частот имеют неудовлетворительные спектральные характеристики, что требует применения достаточно сложных фильтров и ферритовых развязывающих устройств на выходе умножителя.

Используя преимущества монолитной технологии, а также новые схемотехнические и конструктивные решения, удалось создать умножители, лишенные отмеченных недостатков. В настоящей работе создан литерный балансный монолитный умножитель частоты на 2 на основе ПТШ, работающий в диапазоне частот по входу 1...9 ГГц.

Балансная схема умножителя обеспечивает подавление гармоник спектра на выходе не менее чем на 15...20 дБ. Умножение частоты можно производить при относительно небольших мощностях в трактах, что положительно сказывается на электромагнитной совместимости аппаратуры.

Эквивалентная схема умножителя частоты приведена на рис. 3.

Элементы схемы, не входящие в состав микросхемы АБПЧ, размещены на подложке из сап-



Рис. 3. Эквивалентная схема умножителя частоты на основе МИС АБПЧ

фира. Для реализации полного диапазона частот по входу 1...9 ГГц разработано шесть типов плат на сапфировой подложке. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний умножителя частоты

Параметр	Норма		
	не менее	номинал	не более
Рабочий диапазон частот по входному сигналу $f_{\rm p}$,			
ГГц	1	_	9
Коэффициент умножения частоты, отн.ед.	_	2	_
Потери преобразования (на умножение), дБ:			
для <i>f</i> _p =15 ГГц	-3	—	3
для <i>f</i> _p =57,5 ГГц	0	—	4
для ƒ _p =7,59 ГГц	3	_	7
Полоса рабочих частот одной литеры, %	20	_	_
Относительный уровень мощности сигнала			
входной частоты в спектре выходного сигнала, дБ	—	—	-15
Потребляемый ток, мА	—	_	50
Напряжение источника питания, В	8,55	9	9,45
Входная мощность, Вт:	7,5	_	80
КСВН входа/выхода, отн.ед.	_	_	2,5

5. БАЛАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Как правило, преобразователи частоты используются для переноса спектра НЧ- или ВЧсигнала в область СВЧ или сдвига «вверх» или «вниз» спектра сигнала СВЧ. В первом случае сигнал СВЧ является гетеродинным, а НЧ- или ВЧ-сигнал «сигнальным», во втором случае назначение сигналов обратное. Часто гетеродинным является более низкочастотный сигнал и соответственно изделия относятся ко второму типу. Однако разработанные в данной работе преобразователи, могут использоваться в обоих режимах. К преобразователям частоты предъявлялись следующие требования (табл. 3).

Таблица 3

Параметр	Норма		
	не менее	номинал	не более
Рабочий диапазон частот сигнала гетеродина f_r , ГГц	2	_	12
Рабочий диапазон частот входного сигнала f_{c} , ГГц	0,01	_	2
Рабочий диапазон частот выходного сигнала, ГГц	_	$ \begin{array}{c} f_{\Gamma} + f_{c,} \\ f_{\Gamma} - f_{c} \\ f_{c} - f_{\Gamma} \end{array} $	_
Полоса рабочих частот по выходному сигналу одной литеры, %	10	_	_
Потери преобразования, дБ	_	_	3
Развязка между каналами гетеродин →выход, сигнал→выход, сигнал ↔ гетеродин, дБ	15	_	_
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, мВт	1	_	_
Потребляемый ток, мА	_	_	50
Напряжение источника питания, В	8,55	9,0	9,45
Мощность сигнала гетеродина, мВт	7	_	15
КСВН входа/выхода, отн.ед.	_	_	1,5

Требования, предъявляемые к преобразователям частоты

Эквивалентная схема преобразователя частоты в диапазоне частот по выходу 2...12 ГГц приведена на рис. 4.

Для реализации полного диапазона частот по выходу несколькими литерами 2...12 ГГц разработано шесть типов плат на сапфировой подложке.

Наличие в преобразователе входа для внешнего напряжения балансировки позволяет при



Рис. 4. Эквивалентная схема балансного преобразователя частоты

необходимости увеличить развязку входов и выхода преобразователя в условиях большого перепада мощности гетеродина. Однако более чем 10 %-ный разброс статических параметров транзисторов VT1 и VT2 не допустим, что является одним из существенных факторов, определяющих процент выхода годных. Настройка преобразователей по параметрам CBЧ не проводится и сводится к разбраковке по параметрам – критериям годности.

Наиболее критичным параметром, как и предполагалось, является подавление паразитных полос преобразования. Полученные типичные значения отношений мощности полезной спектральной компоненты к нежелательным (при отключенном входе балансировки) составили 12...15 дБ. При оптимальном напряжении балансировки – 22...28 дБ.

Удалось успешно решить задачу по снижению зависимости критичных параметров преобразователя от величины мощности гетеродина. Изменение мощности гетеродина на 3 дБ приводит к изменению потерей преобразования не более чем на ±0,5 дБ.

6. ДВОЙНОЙ БАЛАНСНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ

Электрические параметры двойных балансных смесителей, созданных на основе МИС АБПЧ, приведены в табл. 4.

Из приведенных параметров следует, что частоты колебаний на сигнальном входе смесителя и на выходе ПЧ могут совпадать, но при этом должна быть обеспечена межканальная развязка. Такому требованию удовлетворяет балансный смеситель. Если учесть необходимость по-

Таблица 4

Параметры двойного балансного смесителя

Параметр	Норма		
	не менее	номинал	не более
Рабочий диапазон частот входного сигнала и сигнала гетеродина, ГГц	2	-	12
Рабочий диапазон частот выходного сигнала ПЧ, ГГц	0,01	_	2,0
Потери преобразования, дБ	_	_	3
КСВН входа (для входного сигнала), отн.ед.	—	_	2
Коэффициент шума, дБ	_	_	13
Развязка между каналами гетеродин →ПЧ, сигнал→ПЧ, сигнал ↔ гетеродин, дБ	15	-	_
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, мВт	1	-	_
Ток по цепи $U_{\text{пит1}}$, мА	—	_	110
Ток по цепи $U_{\text{пит2}}$, мА	_	_	10
Напряжение источника питания, В:			
положительное	4,75	5,0	5,25
отрицательное	-4,75	-5	-5,25
Мощность гетеродина, мВт	7	—	20

давления сигнала гетеродина в цепи ПЧ (чтобы не перегрузить усилительный каскад), то оптимальным является двойной балансный смеситель.

Всем требованиям, предъявляемым к двойным балансным смесителям, отвечает так называемый аналоговый перемножитель. В качестве активного элемента в нем используются чаще всего биполярные транзисторы. Эти смесители обладают широким диапазоном частот, высокой межканальной развязкой и положительным коэффициентом передачи. Недостатком таких смесителей является невысокая верхняя граница диапазона рабочих частот.

В связи с развитием технологии МИС на арсениде галлия появилась возможность значительно повысить верхнюю частоту рабочего диапазона смесителей по схеме аналогового перемножителя.

В обычных аналоговых перемножителях инвертирование фазы гетеродина и сигнала производится с помощью специально предназначенных для этого транзисторов. В предложенной схеме каждый из двух транзисторов совмещает функции перемножителя частот и инвертирующего каскада, благодаря чему сокращается число транзисторов и расширяется граница диапазона рабочих частот. Последнее обстоятельство связано с уменьшением крутизны ФЧХ по каждому из двух входов смесителя из-за уменьшения числа каскадов.

7. СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ К ВВФ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Изделия подвергались испытаниям на стойкость к ВВФ: на прочность к шумовой случайной вибрации, многократным ударам, линейному ускорению, смене температур. На прочность к воздействию одиночных ударов изделия испытаны при пиковом ускорении 500 g. Отказов изделий не зафиксировано. Параметры – критерии годности изделий до и после воздействий не отличались и были в пределах погрешности измерений.

В соответствии с требованиями изделия имели следующие показатели надежности: минимальная наработка – 80 000 ч; срок сохранности в составе аппаратуры – 25 лет.

8. ВЫВОДЫ

Приведены результаты комплексной разработки четырех типов ГМИС СВЧ: делителя частоты на 2 в диапазоне частот по входу 1...12 ГГц; активного балансного умножителя частоты на 2 в диапазоне частот по входу 1...9 ГГц; двойного балансного смесителя в диапазоне частот сигнала и гетеродина 2...12 ГГц; балансного преобразователя частоты в диапазоне частот по входу сигнала и гетеродина 2...12 ГГц.

Все разработанные изделия имеют достаточные производственный и технологический запасы по параметрам.

Изделия предназначены для применения в составе приемопередающих модулей РЛС, РЭБ и другой аппаратуры. По стойкости к ВВФ они удовлетворяют требованиям бортовой и наземной аппаратуры.

Все разработанные изделия унифицированы по габаритно-присоединительным размерам и напряжениям источников питания, что облегчает каскадное соединение МИС различного функционального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин В.Н., Кушниренко А.И., Петров Г.В. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1985.

2. Исследование возможности создания гибридно-монолитных преобразователей частоты в диапазоне 2...12 ГГц для синтезаторов частот: научно-техн. отчет № 103-8641 по теме «Овод» / ФГУП «НПП «Исток»; *Богданов Ю.М., Балыко А.К.* и др. – Фрязино,1990.

3. Разработка гибридно-монолитных приборов, малошумящих ПТШ и сосредоточенных емкостей: научнотехн. отчет № 5-9127 по теме «Созвездие-П» / ФГУП «НПП «Исток»; Богданов Ю.М., Дудинов К.В. и др. – Фрязино, 1997.

Статья поступила 24 ноября 2006 г.

УДК 621.3.049.776.002

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВСТАВОК В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ ГИС СВЧ

В. А. Иовдальский

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Представлены примеры применения металлических вставок в диэлектрической подложке ГИС СВЧ в качестве базовых элементов конструкции. Выявлены цели их применения. Рассмотрена технология изготовления ГИС приведенных конструкций. Сформулирована концепция применения металлических вставок в диэлектрической подложке.

The examples of using metallic insertions in microwave HIC dielectric substrate as construction basic element are shown. Their applications are found out. The manufacturing technology of HICs of shown designs is considered. The idea of using metallic insertions in microwave HIC dielectric substrate is formulated.

1. В В Е Д Е Н И Е

Постоянное повышение требований к характеристикам РЭА СВЧ-диапазона заставляет разработчиков искать новые конструктивно-технологические варианты изготовления ГИС СВЧ и микросборок (МСБ), поскольку современная РЭА СВЧ-диапазона базируется именно на них. Как неоднократно было показано [1-3], электрические характеристики как самих ГИС СВЧ, так и РЭА на их основе существенно зависят от применяемых принципов конструирования.

2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВСТАВКИ В ПОДЛОЖКЕ МПП ГИС СВЧ

Конструктивными элементами ГИС СВЧ могут быть отверстия или углубления, выполненные в диэлектрических подложках плат, а также металлические вставки. Примеров успешного применения металлических вставок вполне достаточно, что свидетельствует о целесообразности их использования [1-4]. Чаще всего это металлизированные отверстия, которые заполняются припоем при пайке платы на металлическое теплоотводящее основание, выполненные для заземления элементов и компонентов схемы, расположенных на лицевой стороне микрополосковой платы (МПП), или соединения пленочных элементов, расположенных на разных сторонах МПП [4]. Однако в настоящее время известны конструктивно-технологические решения, в которых создаются более крупные области – отверстия, углубления, системы рядов отверстий и их различные сочетания, заполняемые металлом и используемые для различных целей.

Так, известна конструкция ГИС СВЧ-диапазона [5], в которой с целью улучшения теплоотвода от кристалла полупроводникового прибора в диэлектрической подложке непосредственно под кристаллом создается отверстие, которое заполняется псевдосплавом медь-вольфрам. Соотношение компонентов сплава выбирается из соображений наилучшего сочетания теплопроводности и близости коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР) (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент конструкции МСБ с теплопроводящими столбиками в плате под тепловыделяющим компонентом – кристаллом ПП:
 1 - диэлектрическая подложка; *2* - пленочный проводник; *3* - вывод кристалла ПП; *4* - кристалл ПП;
 5 - теплопроводящий столбик; *6* - металлическое теплопроводящее основание

В других работах [6,7] для отвода тепла от полупроводникового прибора применена система сквозных отверстий, расположенных под прибором и заполненных металлом. Кроме функции теплоотвода, эти заполненные металлом отверстия служат для заземления элементов и компонентов схемы, расположенных на лицевой стороне диэлектрической подложки (рис. 2).



Рис.2. Фрагмент конструкции МСБ с системой теплоотвода в виде сквозных отверстий, заполненных теплопроводящим материалом

Помимо указанных функций, отверстия или щели в диэлектрической подложке микрополосковой платы могут выполнять функцию встроенной в подложку промежуточной монтажной плоскости. Примером этому может служить конструкция, представленная на рис.3 [8]. Такая конструкция за счет металлической вставки в диэлектрической подложке обеспечивает хороший теплоотвод от кристалла полупроводникового прибора.



Рис. 3. Конструкция ГИС с закрепленным кристаллом на выступе металлического основания: *1* - диэлектрическая подложка; *2* - топологический рисунок; *3* - соединительный проводник; *4* - контактная площадка; *5* - кристалл полупроводникового прибора; *6* - отверстие в подложке; *7* - связующее вещество; *8* - металлическое теплоотводящее основание; *9* - выступ основания

Применение металлических вставок с более сложным профилем позволяет наращивать число их функциональных возможностей. Примером этому служат конструкции ГИС, приведенные на рис. 4 [9]. В этом случае металлическая вставка выполняет функции теплоотвода от кристалла полупроводникового прибора, промежуточной монтажной плоскости для рас-



Рис. 4. Фрагмент конструкции мощного СВЧ-устройства, используемый в серийно выпускаемых усилителях мощности:

1 - металлическое теплоотводящее основание; 2 - выступ металлического основания; 3 - кристалл полупроводникового прибора; 4 - связующее вещество; 5 - диэлектрическая подложка; 6 - топологический рисунок металлизации платы; 7 - экранная заземляющая металлизация; 8 - отверстие в плате; 9 - сигнальный проводник в составе топологического рисунка; 10 - термокомпенсационная рамка

положения кристалла и коммутирующего элемента, например, для заземления истока в случае использования в качестве полупроводникового прибора полевого транзистора с барьером Шотки (ПТШ).

Развивая эту тенденцию, в следующей конструкции ГИС СВЧ-диапазона (рис. 5) увеличивается число промежуточных монтажных уровней, обеспечиваются хороший теплоотвод и низкоомный контакт с заземляющими элементами конструкции [10].

Привлекательным с точки зрения уменьшения длины выводов кристаллов полупроводниковых приборов является их монтаж на плату методом перевернутого кристалла (flip-chip) при помощи объемных (шариковых, столбиковых или балочных) выводов. Однако при этом затруднен отвод тепла от кристалла. В конструкции, предложенной в работе [11], этот недостаток может быть исключен за счет применения фигурной металлической вставки (рис. 6). В такой конструкции металлическая вставка используется для электрического соединения с заземляющими элементами конструкции и одновременно для создания теплоотвода от кристалла.



Рис. 5. Промежуточные монтажные плоскости в объеме диэлектрической подложки: *1* - диэлектрическая подложка; *2* - конденсатор; *3* - кристалл транзистора; *4* - металлическая теплоотводящая вставка; *5* - заземление; *6* - теплоотвод



Рис. 6. Теплоотводящая вставка на обратной стороне платы СВЧ-устройства:

1 - диэлектрическая подложка;
 2 - пленочный проводник;
 3 - экранная заземляющая металлизация;
 4 - кристалл полупроводникового прибора;
 5 - контактные площадки кристалла;
 6 - объемные (шариковые)
 выводы;
 7 - металлизированное отверстие;
 8 - углубление на обратной стороне платы;
 9 - металлизация углубления;
 10 - связующее теплоотводящее вещество;
 11 - металлическая теплоотводящая вставка;
 12 - металлическое теплоотводящее основание;
 13 - припой

Не всегда необходим непосредственный контакт тепловыделяющего элемента (или компонента) с металлической вставкой. Известны случаи применения металлических вставок для отвода тепла от пленочных резисторов или кристаллов полупроводниковых приборов путем встраивания их в углубления, выполненные на обратной стороне диэлектрической подложки платы или с обратной стороны кристалла полупроводникового прибора (рис.7,8) [12,13].



Рис. 7. Конструкция фрагмента ГИС с системой теплоотвода в виде выступа металлического основания:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - металлизационный топологический рисунок; 3 - посадочная площадка в составе топологического рисунка платы; 4 - кристалл полупроводникового прибора; 5 - теплоотводящая вставка в углублении с обратной стороны кристалла полупроводникового прибора; 6 - припой; 7 - теплоотводящая вставка в углублении подложки; 8 - остаточная толщина подложки; 9 - металлизационный слой, являющийся частью экранного заземляющего металлизационного слоя; 10 - припой



Рис. 8. Теплоотводящая вставка в виде металлического выступа теплоотводящего основания: *1* - диэлектрическая подложка; *2* - топологический рисунок металлизации (пленочный проводник); *3* - пленочный резистор; *4* - металлизированное углубление на обратной стороне платы; *5* - припой; *6* - металлизационный слой; *7* - выступ металлического основания

В связи с появлением конструкций, использующих материал подложки платы ГИС в качестве диэлектрика конденсатора, встроенного в микрополосковую плату, появилась возможность использования металлической вставки в качестве обкладки конденсатора (рис. 9) [14].



Рис. 9. Конструкция блокировочного конденсатора в составе МПП ГИС СВЧ:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - топологический рисунок металлизации; 3 - экранная заземляющая металлизация; 4 - верхняя обкладка конденсатора в составе топологического рисунка металлизации; 5 - диэлектрик конденсатора; 6 - углубление на обратной стороне диэлектрической подложки; 7 - металлизация углубления – нижняя обкладка конденсатора; 8 - связующее вещество; 9 - металлическое основание; 10 - подстроечные элементы

Это относительно новое применение металлической вставки получило развитие в конструкциях ГИС с пленочными конденсаторами (рис.10,11) [15,16]. Особенностью применения вставок в этом случае является возможность получения локальной гладкой металлической поверхности с шероховатостью не более 0,01 мкм в составе диэлектрической подложки с гораздо большей шероховатостью (0,08 мкм для поликоровой подложки) и формирования на этой области пленочного конденсатора с толщиной диэлектрика порядка 0,3 мкм.

Также новым применением металлической вставки является ее использование для упрочнения конструкции ГИС. Вставку закрепляют в соосных отверстиях в металлическом основании









Рис. 10. Конструкция блокировочного конденсатора в составе МПП ГИС СВЧ с использованием металлической вставки:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - топологический рисунок металлизации; 3 - экранная заземляющая металлизация; 4 - отверстие в диэлектрической подложке; 5 - диэлектрик конденсатора; 6 - металлическая вставка – нижняя обкладка конденсатора; 7 - верхняя обкладка конденсатора в составе топологического рисунка металлизации; 8 - припой; 9 - металлическое основание; 10 - связующее вещество (стекло, клей, припой) Рис. 11. Конструкция разделительного конденсатора в составе МПП ГИС СВЧ с использованием металлической вставки в углублении, выполненном в поликоровой пластине:

 1 - диэлектрическая подложка; 2 - топологический рисунок металлизации; 3 - экранная заземляющая металлизация;
 4 - верхняя обкладка конденсатора в составе топологического рисунка металлизации; 5 - углубление в диэлектрической подложке; 6 - диэлектрик конденсатора; 7 - металлическая вставка; 8 - связующее вещество (стекло, клей, припой);
 9 - контакт к металлической вставке; 10 - пленочный проводник; 11 - связующее вещество (припой); 12 - металлическое основание

и в диэлектрической подложке платы (рис. 12) [17]. В данном случае вставка упрочняет соединение платы и металлического теплоотводящего основания и одновременно является хорошим теплоотводом от кристалла полупроводникового прибора.



Рис. 12. Структура гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона:

1 - диэлектрическая подложка; 2 - топологический рисунок металлизации; 3 - экранная заземляющая металлизация; 4 - металлическое теплоотводящее основание; 5 - отверстие в диэлектрической подложке; 6 - металлическая электро- и теплоотводящая вставка; 7 - кристалл полупроводникового прибора; 8 - контактная площадка;
 9 - соединение контактных площадок с топологическим рисунком металлизации; 10 - отверстие в металлическом теплоотводящем основании

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Отверстия и углубления в диэлектрических подложках МПП могут быть выполнены различными методами или путем их сочетания в зависимости от свойств материала подложки. В настоящее время для изготовления МПП ГИС СВЧ достаточно широко используются подложки из поликора (керамика ВК-100, Ще0.781.000 ТУ) и сапфира (ЕТ0.032.654 ТУ). Эти материалы относятся к труднообрабатываемым, поэтому для их фрезерования могут быть рекомендованы методы ультразвуковой абразивной обработки [18], прецизионной лазерной обработки[19] или высокотемпературного углетермического травления [20,21]. При использовании других подложек могут применяться другие методы обработки.

Заполнение металлом отверстий и углублений в диэлектрических подложках может осуществляться также различным образом. Выбор метода зависит не только от материала подложек, но и от требований к вставкам, специфики их применения, технологических возможностей изготовителя. Известно несколько методов заполнения: припоем за счет капиллярного всасывания (для металлизированных отверстий); пастами с последующим высокотемпературным отжигом; путем впаивания металлических вставок с применением стекла (для неметаллизированных отверстий) или припоя (в металлизированные отверстия и углубления); за счет использования выступов металлического основания; гальваническим заращиванием.

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

Результаты анализа показывают, что функционально металлические вставки, а также отверстия и углубления, заполненные металлом, могут широко использоваться для различных целей:

1) в качестве теплоотвода от тепловыделяющих элементов и компонентов схемы;

2) для заземления (или коммутации с заземляющими элементами конструкции) элементов схемы, расположенных на лицевой стороне МПП ГИС СВЧ;

3) для упрочнения конструкции ГИС СВЧ;

4) в качестве обкладки конденсатора в составе МПП;

5) для коммутации элементов в многослойной ГИС СВЧ;

6) для создания промежуточных монтажных уровней в объеме подложки МПП ГИС СВЧ.

Часто вставка выполняет несколько функций, являясь одновременно теплоотводом, коммутационным (заземляющим) и, кроме того, упрочняющим элементом. Очевидно, что возможны и другие эффективные применения металлических вставок, еще не реализованные в настоящее время.

Поскольку ГИС СВЧ при сборке и термических испытаниях подвергаются значительным температурным воздействиям (нагреву до температуры 420°С и охлаждению до -60°С), условием сохранения целостности их конструкции и обеспечения надежности работы является близость материалов подложки МПП и металлической вставки по КТЛР.

На основании накопленного опыта можно сформулировать следующую концепцию: использование металлических вставок (отверстий или углублений, заполненных металлом) в подложке МПП ГИС СВЧ позволяет реализовать ряд элементов конструкций, эффективно решающих различные задачи (теплоотвод, упрочнение конструкции, создание промежуточных монтажных уровней, конденсаторов и т.д.) для улучшения характеристик и параметров ГИС СВЧ-диапазона.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы проанализированы конструкции ГИС СВЧ с металлическими вставками, а также отверстиями и углублениями, заполненными металлом, в качестве базовых элементов. Выявлены цели их применения. Рассмотрены технологические аспекты изготовления металлических вставок в МПП ГИС СВЧ. Показана возможность их использования для одновременного достижения различных целей. Проведено обобщение полученных результатов и сформулирована концепция применения металлических вставок в диэлектрической подложке МПП ГИС СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструирование и расчет БГИС, микросборок и аппаратуры на их основе / Под ред. Б.Ф. Высоцкого. – М.: Радио и связь, 1981.

2. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных схемах / Под ред. И.Н. Воженина. – М.: Радио и связь, 1983.

3. Радиопередающие устройства / Под ред. О.А. Челнокова. – М.: Радио и связь, 1982.

4. Заявка № 63-147350, МКИ⁴ Н 01 L 23/12 (Япония). Гибридная интегральная схема для размещения в плоском корпусе. Приоритет 20.06.88.

5. *M.P. Ram, Gary Sandowniczak, Vince Leon*. Thernal management and low paresitic elements // Microwave Journal. – 1990. – Vol. 33, No 10. – P. 99, 103-105.

6. Резников Г.В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1986.

7. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / П.А. Овсищер, Ю.В. Голованов, В.П. Ковещипков и др. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 213-215.

8. *Иовдальский В.А.* Совершенствование конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 2(456). – С. 35-39.

9. *Иовдальский В.А.* Совершенствование конструкции и технологии гибридно-интегральных мощных усилителей СВЧ-диапазона // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 1994. – Вып. 4(464). – С. 13-16.

10. Заявка № 2005135031 (РФ). Гибридная интегральная схема СВЧ диапазона / В.А. Иовдальский, В.Г. Моргунов, А.А. Лисицин. Полож. решение 11.11.05.

11. Патент 2148873 РФ. Гибридная интегральная схема СВЧ / В.А. Иовдальский, Э.В. Айзенберг, В.И. Бейль, М.И. Лопин. Приоритет 26.09.96.

12. Патент А 21-53565 Япония, МКИ⁴ H 01 L 23/46, 23/36, H 05 К 7/20. Интегральная схема. Приоритет 25.08.87.

13. Блейвас И.М., Иовдальский В.А., Ипполитов В.М. Анализ и оптимизация теплового режима теплонагруженных элементов мощных гибридных интегральных схем // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 2(466). – С.19-23.

14. Патент 2235390С1 РФ, МКП⁷ Н 01 L 27/13, Н 05 К 1/16. Гибридная интегральная схема / *В.А. Иовдальский, В.А. Пчелин, К.Б. Джуринский*. Приоритет 27.01.03.

15. Заявка № 2005115399 (РФ). Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В.А. Иовдальский, В.А. Пчелин, К.Б. Джуринский. Полож. решение 20.05.05.

16. *Иовдальский В.А.* Конструкция и технология конденсаторов для ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2005. – Вып. 1(485). – С. 34-43.

17. Заявка 20044136083 (РФ). Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В.А. Иовдальский, В.Г. Моргунов, А.А. Лисицин. Полож. решение 9.12.04. 18. Иовдальский В.А. Совершенствование конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 2(456). – С. 35-39.

19. Иовдальский В.А. Некоторые особенности конструкции микрополосковых плат для ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 3(457). – С. 34-37.

20. *Иовдальский В.А., Рыбкин В.Н.* Прецизионное химическое фрезерование корундовых материалов в технологии ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 4(458). – С. 25-29.

21. Иовдальский В.А., Маркин Б.В., Рыбкин В.Н. Исследование свойств алюмооксидных керамических подложек, прошедших углетермическое травление // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 5-6 (459-460). – С. 53-55.

Статья поступила 18 июля 2006 г.

— НОВЫЕ КНИГИ —

ОППЕНГЕЙМ А., ШАФЕР Р. **Цифровая обработка сигналов. -** М.: Техносфера, 2006. - 856 с., ил.

Книга, предлагаемая Вашему вниманию, - второе переработанное издание всемирно известного классического учебника «Цифровая обработка сигналов», опубликованного в 1975 году. В ее основу лег развернутый курс по дискретной обработке сигналов, преподававшийся в течение ряда лет в Массачусетском технологическом институте. Учебник посвящен математическим алгоритмам, реализуемым в дискретных системах. В нем опущены сложные доказательства математических утверждений, но все приемы и методы иллюстрированы многочисленными примерами и задачами.

Книга будет полезна как студентам, осваивающим предмет, так и инженерам-разработчикам и системотехникам. УДК 621.216.2:621.3.049.77

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК УГЛЕРОДА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В. А. Иовдальский, О. В. Пелипец, Н. П. Зубков, В. И. Ковалев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Представлены результаты исследования методами вторичной ионной масс-спектрометрии и эллипсометрии состава и свойств алмазоподобных пленок, полученных в плазме тлеющего разряда и в ходе ионной имплантации аргона.

The results of investigation of composition and properties of diamond-like films obtained in glow discharge plasma and argon ion implantation are shown by methods of secondary- ion-mass spectrometry and ellipsometry.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы участились случаи использования диэлектрических алмазоподобных пленок (АПП) углерода в различных изделиях микроэлектроники. Так, известны примеры использования АПП углерода для формирования диэлектрика МДП-структур на основе арсенида галлия [1-3]. Авторы этих работ отмечают перспективность применения АПП углерода в приборах интегральной электроники в связи с уникальностью ее свойств, таких, как высокая теплопроводность, электрическая прочность, химическая и радиационная стойкость, с целью улучшения электрических характеристик МДП-структур. Другим интересным применением является использование АПП углерода в качестве пассивирующих антикоррозионных защитных покрытий. В работе [4] приводятся результаты успешного применения АПП углерода для защиты металлических электродов кварцевых резонаторов, что позволяет снизить расходы золота при их изготовлении. А в работе [5] сообщается о возможности улучшения электрических характеристик микрополосковых фильтров и вентилей СВЧ-устройств за счет применения микрополосковых плат ГИС СВЧ с АПП углерода. Состав и методы выращивания АПП углерода определяют их свойства и область применения. Особенно важно знание состава АПП в двух случаях: во-первых, при подборе состава травителя для АПП при выполнении операции фотолитографии, а во-вторых, для выбора состава газовых сред, температурных режимов и состава флюсов при выполнении сборочных операций.

2. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время нет четкого представления о механизме возникновения, составе и свойствах АПП. В работах [6-11] делается предположение о возможности существования двух механизмов аномально сильной пассивации поверхности, связанной с образованием АПП при ионно-лучевой обработке металлов ионами аргона [10,11]. Один из них основан на образовании тонкой углеродсодержащей полимерной пленки. Второй отводит доминирующую роль структурно-химическим превращениям в приповерхностных слоях материала.

Первый механизм полимеризации имеет ряд экспериментальных обоснований и подтверждений. Результаты исследований с помощью электронной оже-спектроскопии выявили [10] особенность металлических слоев в определенных режимах пассивации значительно увеличивать содержание углерода как на поверхности, так и в объеме материала; отмечено также некоторое увеличение концентрации серы, азота, кислорода и хлора; кроме того, наблюдались значительные структурные превращения. Устойчивость образцов к механическому истиранию после пассивирующего облучения возросла в 3...5 раз [10]. Установлено [8], что в случае получения АПП методами ионного легирования выделение углерода, связанное со спецификой паромасляной откачки вакуумной системы, является наиболее характерным результатом загрязнений, обусловленным адсорбцией из состава остаточных газов СО, СО,, углеводородов. Свойства образованных сверхтонких полимерных пленок могут быть связаны с электронным механизмом ионостимулированной полимеризации [7]. Упрощенная модель этого механизма предполагает образование радикалов при ионизации молекулярных фрагментов пленки поверхностных загрязнений в столкновениях с падающими ионами и их дальнейшую сшивку по мере поступления электронов из нижерасположенного металлического слоя. Уменьшение количества электронов, туннелирующих к реакционной области, соответственно с увеличением толщины заполимеризовавшегося диэлектрического слоя приводит к замедлению роста и в дальнейшем – к стабилизации толщины полимерной пленки [10]. Причем наиболее интенсивно процесс протекает на участках с меньшей толщиной слоя, что обеспечивает высокую однородность и стабильность образовавшегося сверхтонкого полимерного покрытия. В связи с легированием «атомами отдачи» пленка обладает высокой адгезией к подложке.

В более ранней работе [3] приведены результаты исследования с помощью масс- и ожеанализа пленок, образующихся при облучении никеля и кремния ионами гелия (энергия ионов – 200 кэВ; плотность потока – 5...60 мкА/см², вакуум – $3 \cdot 10^{-3} ... 3 \cdot 10^{-4}$ Па). В этой работе показано, что на поверхности изделий, подвергающихся ионному облучению в установках с откачкой паромасляными насосами, отлагаются продукты диссоциации молекул углеводородов. Масс-спектр анализируемых пленок содержит ионы углерода и ряд углеводородов (CH⁺, CH₂⁺, C₂H⁺, C₂H₂⁺ и др.). Толщины этих пленок составляют 50...1000 нм и зависят от плотности ионного тока и вакуума в установке. Изучение зависимости толщины слоя от плотности тока в указанной работе проводилось при облучении одной и той же дозой (т.е. с изменением плотности тока изменялось и время облучения). Таким образом, можно сделать вывод, что толщина пленки растет с увеличением времени облучения и давления в камере. Данные работы [10] позволяют сделать вывод, что образованные таким образом углеродные пленки являются защитным барьером при химическом травлении образцов.

Если в работе [3] облучение проводилось ионами гелия, то в работах [1,2] имплантировались аргон с гелием в соотношении 10:1. В этой связи представляет интерес анализ пленок, полученных при облучении аргоном.

При осаждении АПП углерода в плазме тлеющего разряда путем разложения углеводородов (газообразного метана и остаточных загрязнений после откачки вакуумной камеры напылительной установки УРМЗ.279.014) механизм образования полимерной пленки отличается от механизма при ионно-лучевой обработке. Очевидно, что различные условия выращивания полимерных АПП углерода не могут не сказываться на их толщине, структуре, составе и свой-
ствах. Поэтому продолжение их исследования актуально для управления свойствами АПП и их эффективного использования. Кроме того, анализ пленок, полученных разложением в тлеющем разряде, ранее не проводился и представляет определенный интерес.

3. МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Для проведения исследования были подготовлены поликоровые подложки стандартного размера (48×60×0,5 мм) с адгезионным слоем хрома (с сопротивлением 100 Ом/мм²), поверх которого напылен слой меди толщиной 1 мкм.

Для нанесения диэлектрических защитных покрытий на медь были использованы два способа: ионной имплантации и разложения метана в плазме тлеющего разряда. В первом случае облучение ионами аргона проводилось на имплантаторе «Лада-30» при следующем режиме: энергия ионов – 60 кэВ, внесенная доза – 6,25·10¹⁵ ион/см², плотность ионного тока – 20 мкА/см², время пребывания в камере имплантатора на вращающейся карусели при облучении – 1 ч 15 мин. Откачка проводилась диффузионными насосами с полифениловым эфиром 5Ф4Э в качестве рабочей жидкости. Во втором случае использовалась установка вакуумного напыления УРМЗ.279.014. Осаждение осуществлялось в вакууме не хуже 20 Па при напряжении на катоде 850 В, токе разряда 100...120 мА в течение 10 мин. Температура подложки составляла 50...100 °C. В качестве источника углеводородов и плазмообразующего газа использовался метан. Толщина наносимых АПП определялась временем осаждения.

Для анализа были изготовлены четыре образца со следующими разновидностями АПП: первый образец – АПП получена разложением метана в плазме тлеющего разряда; второй – имплантацией ионов аргона; третий – имплантацией двух доз ионов аргона; четвертый – разложением метана в плазме тлеющего разряда (как первый образец), а затем имплантацией ионов аргона (как второй образец).

Полученные пленки анализировались двумя методами: методом вторичной ионной массспектрометрии (ВИМС) на масс-спектрометре MC-7201В и методом спектральной эллипсометрии. Вторичная эмиссия возбуждалась бомбардировкой ионами He⁺ с энергией 4 кэВ. Плотность ионного тока – 50 мкА/см².

4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПЛЕНОК

На рис. 1-4 представлены результаты исследования масс-спектров вторичных ионов. Полученные токи представлены в относительных единицах, где в качестве стандарта взята вторичная эмиссия ионов Al⁺ с поверхности алюминия. Для сравнения в таблице представлено соотношение интенсивности ионных токов углеродсодержащих ионов для глубины 1...2 нм. Ионный пик C⁺ в каждом спектре принят за единицу.

Номер образца	Bep	Толщина пленки,		
	C ⁺ (12)	$C^{+}(12)$ $CH^{+}(13)$ $CH_{2}^{+}(14)$		
1	1	0,39	0,43	66±15
2	1	0,30	0,1	6,6±1,4
3	1	0.20	0.15	11±2
4	1	0,22	0,40	34±8



Рис. 1. ВИМС пленки, полученной в плазме тлеющего разряда (первый образец): l - ионный ток C⁺; 2 - CH⁺; 3 - CH₂⁺; 4 - Cu⁺; 5 - CuO⁺



Рис. 2. ВИМС пленки, полученной в ходе ионной имплантации: l - ионный ток C⁺; 2 - CH⁺; 3 - CH₂⁺; 4 - CH₃⁺; 5 - Cu⁺; 6 - CuO⁺



Рис. 3. ВИМС пленки, полученной в ходе двух циклов ионной имплантации: l - ионный ток C+; 2 - CH+; 3 - CH_2+; 4 - CH_3+; 5 - Cu+; 6 - CuO+



Рис. 4. ВИМС пленки, полученной в плазме тлеющего разряда с последующей ионной имплантацией:

l- ионный ток С+; 2 - CH+; 3 - CH_2+; 4 - CH_3+; 5 - Cu+ ; 6 - CuO+

Приведенная в таблице толщина исследованных пленок определена по времени ионного распыления в ходе ВИМС-анализа. При этом предполагалась сходная скорость распыления у пленок различного состава. Видно сильное расхождение в составе спектра вторичных ионов. Для пленок, образованных с использованием ионной имплантации (образцы 3 и 4), в спектре характерна большая доля иона С⁺ по сравнению с другими ионами.

Из таблицы следует, что в пленке, образованной в результате облучения ионами аргона (образцы 2, 3), доля углеводородных компонентов по отношению к углероду существенно меньше, чем в пленке образца 1, полученной из плазмы, несмотря на то, что в качестве источника материала для роста был использован сложный по составу полифениловый эфир ($C_{30}H_{22}O_4$), а для плазменного покрытия применяли метан (CH_4). Кроме того, резкое уменьшение доли углеводородных компонентов наблюдается и в пленке, полученной из плазмы метана (образец 1), а затем подвергнутой облучению ионами аргона (образец 4, т.е. та же пластина 1, но прошедшая последующую ионную обработку). При этой, последующей, ионной обработке наращивается новый слой с параметрами, аналогичными данным пленки 3. Полученный результат свидетельствует о диссоциации ранее высаженных углеводородов под воздействием ионов и о последующем выделении водорода и фрагментов углеводородов. Можно отметить, что средняя глубина проникновения аргона с энергией 100 кэВ в слой углерода составляет около 80 нм, т.е. ионный пучок проникает через всю толщину пленки.

В то же время сравнение результатов анализа поверхности меди после одного и двух циклов имплантации показывает рост пленки. Это позволяет сделать вывод о том, что на поверхности при ионной бомбардировке одновременно происходят три процесса. Это сорбция паров масел, его полимеризация с увеличением доли кратных связей и частичное распыление образующейся пленки. Кроме того, отмечена незначительная доля ионов CuO⁺ в спектре верхнего (до 5 нм) слоя меди и прослеживается более интенсивная эмиссия ионов Cu⁺ на глубине 3...5 нм, чем для более глубинных слоев. Для пленок, полученных из плазмы, такое явление не наблюдалось.

Эллипсометрические данные получены на двухканальном спектральном эллипсометре. На рис. 5 и 6 (где *n* - показатель преломления; *k* - показатель поглощения) представлены экспериментальные и «модельные» зависимости эллипсометрических углов, а также данные для чистой меди. Получено хорошее соответствие между экспериментальными данными и моделью, что подтверждает ее справедливость. Видна существенная разница в эллипсометрических углах для пленок, полученных в плазме тлеющего разряда и в ходе ионной имплантации. В последних заметно наличие проводящей фазы, что сказывается на затухании. Пленки, полученные из газовой фазы в тлеющем разряде, являются диэлектрическими во всем диапазоне (от 300 до 1100 нм). Сравнение данных таблицы показывает, что оба метода хорошо согласуются по определяемым толщинам АПП и модифицированного поверхностного слоя меди в случае облучения Ar⁺.

Для изготовления микрополосковых плат топологический рисунок металлизации, за исключением контактных площадок, покрывался АПП углерода в плазме тлеющего разряда метана [4,5]. На контактные площадки методом гальванического осаждения наносились никель (толщиной 0,6 мкм) и золото (3 мкм).

При гальваническом наращивании металлических слоев у некоторых пластин на острых кромках пленочных проводников, покрытых АПП, наблюдалось высаживание металла (никеля или золота). Кроме того, на части пластин наблюдалось точечное высаживание металла. Оче-



Рис 5. Сравнение экспериментальных (*a*) и расчетных (*б*) спектров эллипсометрических углов для медных подложек до и после их обработки в аргоновом пучке



Рис 6. Сравнение экспериментальных (*a*) и расчетных (б) спектров эллипсометрических углов для медных подложек до и после их обработки в плазме тлеющего разряда

видно, это связано с неравномерным ростом АПП в плазме. При уменьшении толщины наступает пробой АПП и затем высаживание металла. При гальваническом покрытии контактных площадок, защищенных АПП, которые получены в ходе ионной имплантации, высаживания металла в защищенных местах не наблюдается. Это свидетельствует о высокой однородности поверхностного слоя, образованного в ходе ионной имплантации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа показывает, что при образовании пленки в ходе ионной имплантации участвуют несколько механизмов. Основными, в порядке протекания, можно назвать структурную модификацию поверхности, сорбцию на поверхности углеводородов и других остаточных газов, а затем модификацию и частичное распыление сорбированной пленки. В целом эти механизмы присутствуют одновременно, но вклад их меняется. Изменяя условия процесса, можно получить поверхность с нужными свойствами. Это показано на примере обработки в ходе ионной имплантации АПП, полученной в плазме тлеющего разряда: уменьшилась толщина и изменился состав в сторону уменьшения содержания водорода. Таким образом, выбирая условия получения и обработки АПП, можно варьировать толщину, состав, пассивирующие, диэлектрические и др. свойства. Это открывает широкие возможности для их использования в различных изделиях микроэлектроники. В частности, полученные АПП хорошо показали себя при использовании в качестве маски при локальном гальваническом осаждении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективы применения алмазоподобных пленок (АПП) в технологии приборов на арсениде галлия / В.Ф. Дорфман, А.В. Емельянов, В.Н. Инкин и др. // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника. – 1991. – Вып. 3(142). – С. 35-38.

2. МДП структура с алмазоподобной пленкой углерода / *Н.И. Белецкий, А.В. Дядченко, А.М. Мишнёв* и др. // Труды конференции. – КрыМико'99, Севастополь, сентябрь 1999. – С. 275-276.

3. Белецкий Н.И., Полянский Н.Е., Мишнёв А.М. Алмазоподобный углерод в арсенидгаллиевых МДП структурах // Микроволны и телекоммуникационные технологии: Материалы 11^в Международной конференции. – Кры-Мико2001, Севастополь, 10-14 сентября 2001. – С. 462-463.

4. Использование алмазоподобных углеродных покрытий для защиты металлических электродов кварцевых резонаторов / Б.А. Балашев, В.А. Титов, А.С. Золотарёв, А.Т. Лебедев, Ю.А. Рябиков // Электронная техника. Сер. 5, Радиодетали и радиокомпоненты. – 1991. – Вып. 4(985). – С. 54-55.

5. Совершенствование конструкции и технологии микрополосковых линий ГИС СВЧ / В.А. Иовдальский, Ю.А. Рябиков, О.П. Пугачёва, Е.В. Вантюсов, С.В. Верба // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника. – 2002. – Вып.1(479). – С. 50-56.

6. Влияние ионной имплантации на химическую активность твердых тел / В.Ф. Дорфман, А.И. Фролов, Б.В. Козейкин, В.В. Севастьянов // Приборы и системы управления. – 1980. – № 3. – С. 41-42.

7. О влиянии ионной бомбардировки на химическую активность металлических пленок / В.Ф. Дорфман, В.В. Севастьянов, Б.В. Козейкин и др. // Микроэлектроника. – 1982. – Т. 11, вып. 4. – С. 353-356.

8. *Тондегоде А.Я*. Образование и свойства тонких углеродных пленок на поверхности металлов // Материалы V Всесоюзной конференции, ч. III. – Минск, 1978. – С.183-186.

9. Образование химических соединений при ионной бомбардировке тонких пленок переходных металлов Cr, Ni, Mo / И.М. Белый, Ф.Ф. Комаров, В.С. Тишков, В.М. Янковский // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 1. – С. 48-53.

10. Эффекты аномальной химической пассивации металлов при бомбардировке ионами аргона / В.В. Перинский, Б.А. Маренко, Б.В. Козейкин, А.И. Фролов, А.Г. Гурьянов, Ю.Н. Юрасов // Электронная техника. Сер. Упр. качеством, стандартизация, метрология, испытания. – 1987. – Вып. 2 (125). – С. 40-42.

11. Козейкин Б.В., Фролов А.И., Чеботарёв А.С. Ионная литография без резисторов // Электронная техника. Сер. 7, ТОПО. – 1987. – Вып. 2(141). – С. 29-30.

12. Структурные превращения при ионной бомбардировке железа, никеля, молибдена ионами Ar, N, C / П.Б. Павлов, Д.И. Тетельбаум, А.П. Павлов, Е.К.Зорин // ДАН СССР. –1974. – Т. 217, №2. – С. 330-335.

Статья поступила 18 июля 2006 г.

≡ новые книги ≡

БОГАТЫРЕВ Е.А., ЛАРИН В.Ю., ЛЯКИН А.Е. Энциклопедия электронных компонентов. Большие интегральные схемы. Т. 1 / Под ред. А.Н. Еркина. - М.: ООО «МАКРО ТИМ», 2006. - 224 с.

Книга начинает серию энциклопедических справочников по современной элементной базе электронной техники. Отличительной особенностью справочника является широкое использование ссылок на электронные базы компонентов фирм-производителей. В книге приводятся все необходимые сведения, позволяющие понять принципы работы, систему классификации, терминологию, типовые параметры и схемы включения, а вся фактическая информация о конкретных микросхемах содержится в виде ссылок на сайты производителей. Такой подход позволил в книге небольшого формата разместить данные о 10 видах современных БИС: ЦАП, АЦП, синтезаторах частот, ИМС памяти, микропроцессорах, микроконтроллерах, цифровых сигнальных процессорах, программируемых логических матрицах, схемах с квадратурной обработкой и кодеках. Приведены необходимые теорические понятия и даны примеры конкретных схем включения. Книга может быть использована как учебное пособие по курсу ЭК, в качестве руководства по выбору элементной базы для менеджера, занимающегося поставками ЭК, а также может быть полезна как краткий справочник для разработчиков РЭА.

Транзисторы в SMD-исполнении. Т. 1. Справочник / Сост. *Ю.Ф. Авраменко.* - К.: «МК-Пресс», 2006. - 544 с., ил.

Этот справочник продолжает новую серию «Элементная база», в которой представлены технические данные на современные полупроводниковые приборы и интегральные схемы ведущих производителей, и содержит в себе справочные данные на биполярные транзисторы в SMD-исполнении. Справочник предполагается как издание из 3-5 томов, в которое будут включены биполярные и полевые транзисторы, предназначенные для поверхностного монтажа. При составлении этого тома использовалась техническая документация следующих производителей: HITACHI, NEC, PANASONIC, RENESAS, ROHM, SANYO и TOSHIBA. УДК 621.382.233

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИОДОВ СВЧ

Н. Б. Гудкова, О. С. Зуева, И. В. Самсонова, Н. И. Юсупова, О. Н. Мазанова, В. А. Мальцев, А. К. Балыко

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Предложена методика расчета электрических и тепловых параметров диодов CB4, основанная на использовании эквивалентной схемы полупроводникового диода с учетом основных нелинейностей ее элементов. На основе этой методики проведены расчеты параметров отечественных ограничительных диодов.

Method of calculating electric and heat parameters of limiting diodes, based on using semiconductor diode equivalent circuit taking into account its main elements nonlinearities is proposed. The calculation of domestic limiting diodes parameters is made based on this method.

1. В В Е Д Е Н И Е

В основе проектирования устройств управления амплитудой сигнала на диодах CBЧ (ограничительных, переключательных и p-i-n-диодах) [1] лежит нелинейная модель диода, которая в простейшем случае описывается эквивалентной схемой с элементами (емкостью, проводимостью, источником тока и т.п.), величины которых являются нелинейными функциями приложенных к этим элементам напряжений. Параметры этих функций могут быть определены по измеренным вольт-амперным (BAX) и вольт-фарадным характеристикам диода.

Поскольку зависимость тока от напряжения диодов СВЧ представляет собой резко возрастающую функцию, то обычно ВАХ измеряют при сравнительно малых значениях тока, протекающего через диод. В то же время при работе в устройствах управления амплитудой, особенно в защитных устройствах, ток через диод может достигать значительной величины, и поэтому ошибки в поведении ВАХ при больших токах могут существенно сказаться на результатах проектирования [2].

В работе предложена методика определения параметров ВАХ по результатам измерения значений тока, напряжения и дифференциального сопротивления.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Диод СВЧ, как правило, имеет низкое сопротивление при прямом включении и высокое при обратном. Это свойство диода может быть описано с помощью эквивалентной схемы (рисунок), содержащей сопротивление потерь R_s , источник тока I(U) и емкость C(U), зависящие от напряжения на *p*-*n*-переходе диода *U*. Зависимость I(U) обычно имеет вид [3]:

$$I(U) = I_{S}(e^{U/V_{T}} - 1),$$
(1)

где V_T – температурный потенциал (в идеальном случае $V_T = k T/e$, *e* – заряд электрона, *k* – постоянная Больцмана, *T* – температура); I_S – ток насыщения. При комнатной температуре *T* = 300 K и V_T = 0,026 B.

Емкость диода C(U) описывается соотношением [2]:

$$C(U) = C_0 / (1 + U / U_r)^m$$

где U_{κ} – контактная разность потенциалов; *m* – показатель нелинейности.

Если к внешним клеммам диода приложить напряжение U_0 , то через диод будет протекать ток *I*. Величины напряжения U_0 и тока *I* могут быть измерены. Часть напряжения в диоде падает в полупроводниковом слое, который описывается сопротивлением R_s , поэтому внешнее напряжение U_0 распределяется между *p*-*n*-переходом и этим слоем:

 $U_0 = U + IR_{s}$



схема диода

С учетом условия $I >> I_s$ и выражения (1) это равенство можно записать в виде

$$U_0 = IR_s + V_T \ln(I) - V_T \ln(I_s).$$
(3)

(2)

Помимо ВАХ, с помощью измерителя *LCR*-параметров на постоянном токе может быть измерено дифференциальное сопротивление диода

$$R = dU_{0}/dI = R_{s} + V_{T}/(I + I_{s}).$$
(4)

При $I >> I_s$ выражение (4) преобразуется к виду

$$RI = R_s I + V_T. ag{5}$$

ВАХ диода при малых токах может быть измерена непосредственно, при этом получаются M значений напряжения U_{0j} и тока I_{j} , связанных соотношением (3); j = 1, ..., M.

При сравнительно больших токах измеряют N значений сопротивления R_j и тока I_j , связанных соотношением (5); i = 1, ..., N.

Введем обозначения: $x = R_s$, $y = V_T$, $z = V_T \ln(I_s)$. Таким образом, для определения этих неизвестных необходимо решить систему M + N уравнений:

$$xI_{j} + y \ln(I_{j}) - z - U_{0j} = 0, \quad j - 1, ..., m,$$

$$xI_{i} + y - R_{i}I_{i} = 0, \quad j - 1, ..., n.$$
(6)

Для решения системы уравнений воспользуемся методом наименьших квадратов [4]. Для этого запишем сумму квадратов

$$S = \sum_{i=1}^{M} \left(xI_{j} + y \ln \left(I_{j} \right) - z - U_{0j} \right)^{2} + \sum_{i=1}^{N} \left(xI_{i} + y - R_{i}I_{i} \right)^{2}.$$
(7)

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(489), 2007

81

Здесь токи I_j и I_i разделены, чтобы иметь возможность отдельно получать решения по измеренным ВАХ и сопротивлениям.

Минимум суммы находится путем приравнивания к нулю частных производных *S* по *x*, *y* и *z*. После преобразований получаем систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$x \Big[(I^{2})_{CM} + (I^{2})_{CN} \Big] + y \Big[(I)_{CN} + (I \ln I)_{CM} \Big] - z (I)_{CM} = (RI^{2})_{CN} + (U_{0}I)_{CM} ,$$

$$x \Big[(I)_{CN} + (I \ln I)_{CM} \Big] + y \Big[N + (\ln^{2} I)_{CM} \Big] - z (\ln I)_{CM} = (RI)_{CN} + (U_{0} \ln I)_{CM} ,$$

$$x (I)_{CM} + y (\ln I)_{CM} - zM = (U_{0})_{CM} ,$$

$$(I)_{CM} = \sum_{j=1}^{M} I_{j}; \quad (I)_{CN} = \sum_{i=1}^{N} I_{i}; \quad (I^{2})_{CM} = \sum_{j=1}^{M} I_{j}^{2} \quad \text{M T. Д.}$$

$$(8)$$

Решение системы (8) находится методами линейной алгебры.

Если используется только ВАХ – зависимость напряжения от тока, то в системе (8) отбрасываются все члены, содержащие суммирование по i; если используются только зависимости сопротивления от тока, то отбрасываются члены, содержащие суммирование по j. Отметим, что в последнем случае не определяется ток насыщения I_{s} , поскольку он не входит в уравнение (4).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА

Применим предложенную методику к расчету параметров ограничительного кремниевого диода с толщиной базы d = 0,7 мкм и диаметром мезаструктуры D = 20 мкм.

Измеренные зависимости напряжения от тока для этого диода приведены в табл. 1, а сопротивления от тока – в табл. 2.

Таблица 1

<i>I</i> _{<i>j</i>} , A	0,00001	0,0001	0,001	0,01
U_{0j},B	0,668	0,755	0,834	0,940

Зависимость напряжения от тока (M = 4)

Таблица 2

Зависимость сопротивления от тока (N = 9)

<i>I</i> _{<i>j</i>} , A	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,02	0,04	0,08	0,1
<i>R</i> _{<i>j</i>} , Ом	33,72	17,68	10,27	6,64	4,72	4,28	3,15	2,31	2,07

где

При использовании только зависимостей сопротивления от тока (табл. 2) в результате расчета по предложенной методике были получены значения параметров: $R_s = 1,775$ Ом; $V_T = 0,04$ В.

В случае использования только зависимостей напряжения от тока (табл. 1) в результате расчета были получены значения параметров: $R_s = 2,45$ Ом; $V_T = 0,0356$ B; $I_s = 0,67 \cdot 10^{-13}$ A.

При использовании обеих зависимостей (табл. 1 и 2) были получены значения параметров: $R_s = 1,82 \text{ Ом}; V_T = 0,037 \text{ B}; I_s = 1,53 \cdot 10^{-13} \text{ A}.$

На основе предложенной методики при использовании обеих зависимостей были рассчитаны параметры модели для других ограничительных диодов того же типа (табл. 3).

Таблица 3

Номер диода	<i>d</i> , мкм	<i>D</i> , мкм	<i>R_S</i> , Ом	V_T , B	I_S , A
1	0,7	20	1,82	0,037	1,53.10-13
1	1,0	25	0,74	0,0475	5,4.10-11
2	1,0	25	0,57	0,0474	5,0.10-11
1	1,5	25	0,3	0,043	6,5·10 ⁻¹²
2	1,5	25	0,5	0,042	$4,0.10^{-12}$
1	1,7	25	0,5	0,038	0,6.10 ⁻¹²
1	2,9	95	0,4	0,06	1,9.10-9
2	2,9	85	0,26	0,058	1,46·10 ⁻⁹
3	2,9	75	0,34	0,059	1,59·10 ⁻⁹
4	2,9	65	0,8	0,059	1,52·10 ⁻⁹
1	4,9	95	0,4	0,066	4,27·10 ⁻⁹
2	4,9	85	0,35	0,067	4,72·10 ⁻⁹
3	4,9	75	0,5	0,067	4,50·10 ⁻⁹
4	4,9	65	0,7	0,067	5,10·10 ⁻⁹

Параметры моделей ограничительных диодов

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика позволяет рассчитывать параметры нелинейной модели диода, при этом сопротивление R_s определяется с наибольшей погрешностью.

2. Величины напряжения V_T и тока I_S практически не зависят от диаметра мезаструктуры диода.

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

При работе защитных устройств на диодах СВЧ достаточно большая мощность рассеивается на диодах. Это рассеяние приводит к нагреванию, которое должно быть ограничено тепловым пробоем. В этой связи важно осуществить оптимальный отвод тепла от ограничительных диодов посредством металлического теплоотвода. Существенно, что электрический и тепловой расчеты должны проводиться самосогласованно, поскольку повышение температуры приводит к изменению ВАХ диодов, тепловых потерь в диодах и изменению температуры.

Температурную зависимость тока насыщения (теплового тока) I_s можно записать в виде:

$$I_s = I_{s0} \exp\left(V_3/V_T\right),\tag{9}$$

где I_{s0} не зависит от $T; V_3$ – ширина запрещенной зоны.

Ширина запрещенной зоны зависит от температуры:

$$V_3 = V_{30} - \alpha_3 T \,, \tag{10}$$

где V_{30} – ширина запрещенной зоны при нулевой абсолютной температуре; α - температурная чувствительность, $\alpha_3 \approx 10^{-4}$ В/К. Для кремния при комнатной температуре $V_3 = 1,1$ В. Часто температурной зависимостью (10) можно пренебречь и считать $V_3 \approx V_{30}$.

Подставляя соотношения (2) и (9) в формулу (1) и учитывая отношение $V_3/V_T >> 1$ и идеализированное выражение для температурного потенциала, получаем:

$$I = I_{s0} \exp\left[e(U_0 - IR_s + V_3)/kT\right].$$
 (11)

При протекании тока *I* на диоде выделяется (рассеивается) мощность

$$P = IU_0. \tag{12}$$

Если диод размещен на теплоотводе, то температура диода из-за рассеиваемой мощности связана с температурой теплоприемника T_{A} линейным выражением:

$$T = T_A + PR_T, (13)$$

где R_{T} – тепловое сопротивление теплоотвода.

Таким образом, после несложных преобразований формулы (11) приходим к уравнению

$$(1+IU_0R_T/T_A)(\ln I - \ln I_{S0}) = (U_0 - IR_S + V_3)/V_{TA},$$
(14)

где $V_{TA} = kT_A/e$.

Если измерить ВАХ диода в нескольких точках $I_K(U_{0k}), k = 1, ..., N$, то получим систему уравнений с неизвестными R_T, R_S и $x = \ln I_{S0}$.

$$(1+I_k U_{0k} R_T / T_A) (\ln I_k - x) = (U_{0k} - I_k R_S + V_3) / V_{TA},$$

$$k = 1, \dots, N.$$
(15)

Введем обозначения:

$$a_{k} = -T_{A}/(I_{k}U_{0k}),$$

$$b_{k} = \ln I_{k},$$

$$c_{k} = T_{A}/(U_{0k}V_{TA}),$$

$$d_{k} = (V_{TA} \ln I_{k} - V_{3} - U_{0k})T_{A}/(I_{k} U_{0k} V_{TA})$$
(16)

и приведем систему уравнений (15) к виду

$$xR_{T} = xa_{k} + R_{T}b_{k} + R_{S}c_{k} + d_{k},$$

$$k = 1, ..., N.$$
(17)

Поскольку система имеет три неизвестные величины (x, R_T, R_S) , то для ее решения достаточно иметь три уравнения – три точки на ВАХ диода:

$$xR_{T} = xa_{1} + \theta b_{1} + R_{s}c_{1} + d_{1},$$

$$xR_{T} = xa_{2} + \theta b_{2} + R_{s}c_{2} + d_{2},$$

$$xR_{T} = xa_{3} + \theta b_{3} + R_{s}c_{3} + d_{3}.$$
(18)

Исключая из системы произведения xR_{T} , найдем два выражения для R_{S} :

$$R_{S} = -(x a_{31} + R_{T} b_{31} + d_{31})/c_{31}.$$
(19)

Приравнивая правые части, получаем соотношение

$$R_T = k_1 x + r_1, (20)$$

где

$$k_1 = -\frac{c_{31}a_{21} - c_{21}a_{31}}{c_{31}b_{21} - c_{21}b_{31}} \quad ,$$

$$r_1 = -\frac{c_{31}d_{21} - c_{21}d_{31}}{c_{31}b_{21} - c_{21}b_{31}} ,$$

$$a_{ij} = a_i - a_j$$
; $b_{ij} = b_i - b_j$; $c_{ij} = c_i - c_j$; $d_{ij} = d_i - d_j$.

Подставляя формулу (15) в (14), приходим к соотношению

$$R_s = k_2 x + r_2, \tag{21}$$

где $k_2 = -\frac{k_1 b_{21} - a_{21}}{c_{21}}$, $r_2 = -\frac{r_1 b_{21} + d_{21}}{c_{21}}$.

Наконец, заменяя R_T и R_S их зависимостями от x (20) и (21) во втором уравнении (18), получаем квадратное уравнение

$$k_1 x^2 + m_1 x + n_1 = 0, (22)$$

где $m_1 = r_1 - a_2 - b_2 k_1 - c_2 k_2;$ $n_1 = -b_2 r_1 - c_2 r_2 - d_2.$

Решая (22), находим x, а затем и значения R_T и R_S из соответствующих выражений.

Поскольку $x = \ln I_{s0}$, а значения I_{s0} могли изменяться от 10⁻¹² до 10⁻⁵ A, то x – величина отрицательная, заключенная в пределах -30 < x < -10.

Отметим, что для увеличения точности расчета параметров с помощью предложенного метода значения токов и напряжений необходимо выбирать на крутой ветви ВАХ.

Преимущество предложенного метода состоит в том, что с его помощью можно определить не только ток I_{s0} и сопротивление R_{s} , но и тепловое сопротивление R_{T} теплоотвода.

5. ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета параметров нелинейной модели диодов СВЧ по измеренным ВАХ и дифференциальному сопротивлению.

2. Проведен расчет параметров модели для ряда ограничительных диодов. Показано, что предложенная методика позволяет рассчитывать параметры нелинейной модели диода, при этом сопротивление R_s определяется с наибольшей погрешностью, а величины напряжения V_T и тока I_s практически не зависят от диаметра мезаструктуры диода.

3. Предложена методика определения теплового сопротивления R_T теплоотвода. Показано, что для расчета R_T требуется измерять ВАХ при больших токах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лебедев И.В.* Интегрализация твердотельных управляющих и защитных устройств СВЧ// Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1982. – № 10. – С. 32-42.

2. Гусятинер М.С., Горбачев А.И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. – М.: Радио и связь, 1983.

3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1980.

4. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962.

Статья поступила 11 июля 2006 г., после переработки – 21 ноября 2006 г.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385

ЦЕЗИЕВАЯ АТОМНО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА С ОПТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ АТОМНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ВХОДЕ В СВЧ-РЕЗОНАТОР

С. А. Плешанов, И. И. Самарцев, Ю. А. Турутин

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Проведено исследование цезиевой атомно-лучевой трубки, в которой роль первого магнита играет когерентный лазерный луч накачки, селектирующий состояния атомов перед СВЧ-резонатором. Отмечено, что использование оптической накачки позволяет приблизительно на порядок улучшить метрологические характеристики промышленных атомно-лучевых трубок.

The investigation of a cesium atomic-beam tube was made in which the first magnet part was given to coherent laser pump beam selecting the atom states before microwave resonator. It was noted that the use of the optical pump allowed to improve the metrological characteristics of industrial atomic-beam tubes by approximately an order.

Для решения многих важнейших задач в различных областях науки и техники необходимы источники сверхстабильных частот [1], обладающие долговременной относительной нестабильностью δ_{cvr} на уровне $10^{-13}...10^{-14}$.

Наиболее высокую долговременную стабильность при высокой точности номинального значения частоты генерируемых колебаний обеспечивают квантовые стандарты частоты на атомно-лучевых трубках (АЛТ), которые выполняют в схеме стандартов роль высокодобротных частотных дискриминаторов.

Квантовый стандарт частоты (КСЧ) состоит из двух частей: квантовой и радиотехнической. К квантовой части относится частотный дискриминатор, представляющий собой устройство для фиксации спектральной линии, в данном случае – атомно-лучевую трубку. К радиотехнической – совокупность радиотехнических блоков, осуществляющих автоматическую подстройку частоты кварцевого генератора по частоте спектральной линии. Выпускаемые промышленные АЛТ «Утро-1АМ» и «Успех-3» имеют суточную стабильность частоты соответственно $\delta_{cyt} \leq 5 \cdot 10^{-13}$ и $5 \cdot 10^{-14}$, параметр качества [2] $F_O \geq 5 \text{ c}^{-1/2}$ и $\geq 20 \text{ c}^{-1/2}$.

В состав цезиевой АЛТ с двухполюсными системами магнитного отклонения входят следующие основные узлы: источник атомов цезия; первый и второй сортирующие магниты; СВЧрезонатор; магнитные экраны; система поля *C*; электроразрядный насос; индикаторное устройство, включающее ионизатор, масс-спектрометр и вторично-электронный умножитель (ВЭУ).

Принцип действия АЛТ заключается в следующем. Источник атомного пучка формирует ленточный поток атомов цезия, которые летят через СВЧ-резонатор, помещенный в слабое маг-

нитное поле. В исходном состоянии атомы равновероятно распределены по всем магнитным состояниям (*m*-состояниям) нижнего энергетического уровня $6^2S_{1/2}$ (рис. 1), а остальные уровни фактически пусты. Атомы цезия, вылетающие из источника, селектируются по магнитным квантовым состояниям первым магнитом и пролетают через СВЧ-резонатор. Взаимодействие с СВЧ-полем изменяет их состояние. Второй магнит служит для селекции атомов, совершивших переходы. Индикаторное устройство позволяет регистрировать ток, создаваемый ионами цезия. Система автоматической подстройки частоты, управляемая выходным током АЛТ, обеспечивает чрезвычайно высокую стабильность частоты КСЧ. Количественной характеристикой стабильности частоты стандарта является ее среднеквадратическое относительное отклонение от среднего значения – нестабильность $\sigma(\tau_u)$, зависящая от времени измерения τ_u .

7² **Р**_{3/2}
$$\frac{21946,66 \text{ см}^{-1}}{(456 \text{ нм})}$$

7² **Р**_{1/2}
$$\frac{21765,65 \text{ см}^{-1}}{(459 \text{ нм})}$$

 $7^2 S_{1/2} \frac{18535,51 \text{ cm}^{-1}}{(534,5 \text{ HM})}$



Рис. 1. Схема энергетических уровней атома цезия

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(489), 2007

АЛТ с магнитной селекцией атомов имеют ряд принципиальных и трудноустранимых недостатков. Перечислим из них лишь главные:

– в традиционной цезиевой АЛТ используется 1/16 часть от общего числа атомов, испускаемых источником;

– в полезный сигнал вносит вклад поток атомов с узким диапазоном скоростей, имеющий небольшую расходимость, в результате чего интенсивность резонансной линии еще больше снижается и составляет около 10⁻²% интенсивности исходного пучка;

– майорановские переходы [3], как правило, сильно снижают сигнал резонанса на выходе АЛТ и дают существенный вклад в невоспроизводимость её характеристик.

Перечисленные недостатки могут быть устранены в квантовом дискриминаторе частоты на пучке атомов цезия, в котором селекция и управление атомными состояниями осуществляются оптическими методами [4-6]. В литературе такие методы получили достаточно общее название «оптическая накачка». Использование оптических методов управления атомными состояниями в квантовых дискриминаторах частоты стало возможным лишь в последние годы, после того как были разработаны полупроводниковые лазерные излучатели, обладающие уникальными параметрами: узкой линией излучения, стабильностью генерируемой мощности во времени, возможностью плавной перестройки частоты, долговечностью до 10⁶ ч.

В цезиевой АЛТ с оптической накачкой отсутствуют сортирующие магниты, ионизатор, масс-спектрометр, вторично-электронный умножитель. Вместо них введены полупроводниковые лазерные диоды и фотоприемники. Число лазерных диодов изменяется от одного (для простых) до трех (для более сложных и эффективных квантовых дискриминаторов). АЛТ с тремя лазерными диодами позволяет увеличить коэффициент использования пучка на дватри порядка по сравнению с АЛТ с магнитной селекцией. Осуществить полное использование атомного пучка не позволяет его расходимость, обусловленная молекулярной эффузией атомов из коллиматора.

В настоящей работе исследована однолазерная схема селекции (оптической накачки) атомных состояний на входе в CBЧ-резонатор АЛТ (рис. 2). В качестве базовой использовалась АЛТ «Утро-1АМ», в которой первый (по ходу атомного пучка) сортирующий магнит был заменен оптической камерой. Для минимизации майорановских переходов оптическая камера была встроена непосредственно между первым торцевым экраном магнитной защиты АЛТ и CBЧрезонатором. Таким образом, область взаимодействия цезиевого атомного пучка с лазерным излучением располагалась в слабом поле C, используемом для снятия вырождения магнитных подуровней. В оптической камере располагались крестообразно четыре окна, одно из направлений размещения окон совпадало с направлением поля C, второе было выбрано перпендикулярно ему. В качестве окон служили отполированные сапфировые диски. Геометрия расположения окон позволяла реализовать накачку излучением как π -, так и σ -поляризаций.

Поток атомов цезия направлялся в CBЧ-резонатор. Перед резонатором атомы облучаются узкополосным излучением лазерного диода. В результате происходят многократные переходы, например, между основным $6^2S_{1/2}$ и первым возбужденным $6^2P_{3/2}$ состояниями цезия. Упомянутые переходы, происходящие при выполнении определенных квантовых правил отбора, позволяют накопить атомы на одном из заданных подуровней основного состояния $6^2S_{1/2}$: F = 3 или F = 4. В данном случае подходящим излучением накачки оказывается излучение с длиной волны 852 нм (рис. 1). Для схемы накачки $6^2S_{1/2} \leftrightarrow 6^2P_{1/2}$ подходит длина волны 895 нм. Опреде-



Рис. 2. Схема атомно-лучевой трубки с оптической накачкой

ленный интерес представляют длины волн 456 и 459 нм, позволяющие осуществить схемы накачки с использованием соответственно $6^2S_{1/2} \leftrightarrow 7^2P_{3/2}$ и $6^2S_{1/2} \leftrightarrow 7^2P_{1/2}$ переходов. Некоторый рост мощности накачки, обусловленный меньшими силами осцилляторов [7] и характерный для двух последних из перечисленных схем, может компенсироваться легкостью пространственного разделения и совмещения лучей, а также дополнительными возможностями управления поляризацией излучения.

В АЛТ с оптической накачкой механизм взаимодействия атомов цезия с полем в СВЧ-резонаторе полностью совпадает с механизмом, используемым в традиционных АЛТ.

В качестве источника излучения использовался одномодовый одночастотный лазер ECDL-850, изготовленный в ФИАН РФ. Лазер при непрерывном режиме работы на длине волны 852 нм генерировал излучение мощностью 5...8 мВт, ширина линии составляла 5 МГц. Спектрально-селективным элементом лазера служила дифракционная решетка, установленная по схеме Литтроу, выходное излучение выводилось через нулевой порядок. Размеры лазерного пучка (1х4 мм) были выбраны исходя из двух соображений. Во-первых, для более эффективного использования селективных свойств дифракционной решетки в широких пучках – с целью уменьшения ширины линии генерации, а во-вторых, в связи с необходимостью увеличения времени взаимодействия излучения накачки с цезиевым атомным пучком. Широкая часть лазерного пучка ориентировалась вдоль направления пролета атомов цезия. При тепловой скорости атомов 200 м/с время взаимодействия атомов с излучением накачки составляет 20 мкс. Изменение тока через активный элемент лазера позволяло осуществить настройку на резонансные линии; сканирование частоты генерации можно было вести изменением угла поворота дифракционной решетки, установлением излучением на качкие.

В результате накачки по схеме $F = 4 \rightarrow F' = 3\pi$ на вход СВЧ-резонатора поступают атомы в состоянии F = 3. Под действием резонансного сигнала СВЧ, настраиваемого на частоту перехода $|F = 3, m = 0 > \rightarrow |F = 4, m = 0 >$, на выходе резонатора появляются атомы в состоянии F = 4. Последующий анализ состояний атомов на выходе СВЧ-резонатора осуществлялся оставшимся сортирующим магнитом, а регистрация сигнала резонанса проводилась обычным индикаторным устройством АЛТ, включавшим ВЭУ.

При выборе оптимальной СВЧ-мощности и при оптимальной оптической накачке излучением 852 нм величина отношения сигнала резонанса к постоянной составляющей на выходе АЛТ составляла 50...100. В этом случае постоянной составляющей на выходе прибора можно пренебречь.

Для оценки параметра качества измерялось отношение сигнала к шуму на выходе ВЭУ. Использовался селективный усилитель с полосой пропускания 1 Гц. Частота модуляции СВЧ-сигнала выбиралась равной 30 Гц. Ширина резонансной линии Рамзея составляла 430 Гц. Полученные данные позволяют оценить параметр качества F_o . Зависимость F₀ от температуры источника цезиевого атомного пучка приведена на рис. 3. Параметр качества цезиевой атомно-лучевой трубки с оптической накачкой, разработанной на базе АЛТ «Утро-1АМ», при температуре источника пучка 130 °С достигал 50,5 с^{-1/2} (отношение сигнала к шуму в полосе 1 Гц – более 8900). На этом же рисунке приведена зависимость потока атомов цезия от температуры. Видно, что с повышением температуры рост параметра качества отстает от роста потока атомов, что обусловлено, по-видимому, ухудшением диаграммы направленности испускания атомов из источника.

Известно, что кратковременная стабильность пассивного цезиевого стандарта частоты описывается выражением [2]:



$$\sigma(\tau_{\mu}) \approx \frac{1}{F v_0 \tau^{1/2}},$$

где $v_0 = 9192,6$ МГц – частота эталонного перехода в атоме цезия.

Можно ожидать, что кратковременная стабильность частоты будет описываться зависимостью $\sigma(\tau_{\mu}) \sim 2 \cdot 10^{-12} / \tau_{\mu}^{-1/2}$, а долговременная стабильность достигать $1 \cdot 10^{-14}$, что более чем на порядок превосходит аналогичные показатели для приборов типа «Утро-1AM».

Таким образом, использование методов оптической селекции атомных состояний позволяет значительно улучшить метрологические характеристики промышленных цезиевых АЛТ.

Авторы выражают признательность сотрудникам ФИАН РФ А.Л. Величанскому и В.В. Васильеву за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS: Пер. с англ. / Под ред. Татаренкова. – М.: Техносфера, 2002.

2. Lacey R.F., Helgesson A.L., Holloway J.H. Short-therm stability of passive atomic frequency standards // Proc.IEEE. – 1966. – Vol. 54, No 2. – P. 170-176.

3. *Mots L., Rose M.E.* On space quantization in time varying magnetic fields // Phys. Rev. – 1936. – Vol. 50. – P. 348-355.

4. *Picque J.L.* Hyperfine optical pumping of a cesium atomic beam, and applications // Metrologia. – 1977. – Vol. 13. – P. 115-119.

5. Arditi M. and Picque J.L. A cesium beam atomic clock using laser optical pumping preliminary tests // J. Physique Lett. – 1980. – Vol. 41. – P. 379-381.

6. Vanier J., Adoin C. The quantum physics of atomic frequency standards. - Bristol, IOP, 1989.

7. *Андерсон М., Зилитис В.А.* Полуэмпирический расчет сил осцилляторов для атомов лития, рубидия, цезия // Оптика и спектроскопия. – 1964. – Т. 16, вып. 3. – С. 382-389.

Статья поступила 8 ноября 2006 г.

УДК 621.385.6

ГРУППА НОВЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ Для генерации рентгеновского излучения и их применение

Г. П. Щелкунов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Рассмотрен новый класс СВЧ-приборов для генерации рентгеновского излучения на примерах действующего высокоэнергетического (до 500 кэВ) рентгеновского излучателя «Бриг» (назначение – контроль объемных и толстостенных устройств) и предложенного острофокусного рентгеновского излучателя «мини-Бриг», 90...180 кэВ (для медицины и технической томографии).

A new class of microwave devices was considered for X-ray generation on the basis of the current high energy (up to 500 keV) X-ray radiator "Brig" (application – control of high-volume and thick-wall devices) and the suggested sharp focus X-ray radiator "mini-Brig", 90...180keV (for medicine and technical tomography).

1. В В Е Д Е Н И Е

Объемные и толстостенные устройства имеются в авиастроении (корпуса авиадвигателей из тугоплавких сплавов), ядерной энергетике, судостроении, мостостроении, нефтегазовом комплексе, машиностроении различного назначения и электронике. Рентгеновское просвечивание таких устройств позволяет, в отличие от других методов диагностики, устанавливать не только факт наличия того или иного возможного дефекта, но и видеть его и судить о его причине. Отбраковка узлов устройств с выявленными дефектами гарантирует качество оставшихся. Объемные большегрузные автомобили и морские контейнеры при таможенном досмотре также необходимо подвергать рентгеновскому просвечиванию для определения однородности груза, нахождения в нем криминальных вложений (оружие, наркотики). Ускорители как источники необходимого для этих целей излучения и стационарные рентгеновские аппараты в большинстве случаев неприемлемы из-за своей громоздкости. Отсутствие контроля влечет за собой как крупные аварии, так и катастрофы.

2. НОВЫЙ СВЧ-ПРИБОР

Положено началу новому классу высокоэнергетических (до 1000 кэВ) и наиболее распространенных среднеэнергетических (100...300 кэВ) рентгеновских излучателей. Рентгеновский излучатель «Бриг» [1] обеспечивает жесткое рентгеновское излучение с энергией до 500 кэВ и является портативным (10 кг).

В конструкции излучателя соединены достижения как СВЧ-, так и рентгенотехники. «Бриг» (изготовитель ФГУП «НПП «Исток») входит в состав рентгеновского аппарата «Д-501» (изготовитель ООО «Политехформ»). На настоящий момент выпущен ряд излучателей «Бриг» (и ряд аппаратов «Д-501»).

Основу излучателя составляют два связанных вакуумированных СВЧ-резонатора [2]. В первый из них (анодный) встроен тетрод для возбуждения колебаний. Во втором резонаторе (с добротностью свыше 4000) происходят ускорение электронов, эмитируемых «рентгеновским» катодом, и бомбардировка ими вольфрамовой мишени. На мишени электроны тормозятся и генерируют рентгеновское излучение. Резонаторы расположены соосно, один над другим. Анод генераторной части излучателя (анодный резонатор с тетродом) и мишень его излучательной части (высокодобротный резонатор с «рентгеновским» катодом и мишенью) имеют единую систему жидкостного охлаждения. При расположении мишени перпендикулярно оси резонаторов в ней генерируется панорамное рентгеновское излучение. Если мишень находится под определенным углом к оси, в ней генерируется направленное ортогональное (к оси резонаторов) рентгеновское излучение. В высокодобротном излучательном резонаторе электроны ускоряются до энергии 500 кэВ при напряжении на аноде СВЧ-тетрода 15 кВ. Для внешней электрической изоляции на 15 кВ излучателю не требуются протяженные изоляторы или такие внешние среды, как трансформаторное масло или элегаз (что имеет место в традиционных рентгеновских излучателях с традиционными рентгеновскими трубками). Вследствие этого излучатель имеет меньшую массу, существенно упрощаются его обслуживание и эксплуатация, возрастает толщина просвечивания (таблица). Изготовлены также образцы «Бриг-Т» с направленным излучением.

Высокоэнергетические рентгеновские аппараты (фирма, страна)	Энергия ускоренных электронов, кэВ	Напряжение питания рентгеновской трубки, кВ	Ток пучка, мА	Толщина просвечива- ния, мм (сталь)	Фокус, мм	Масса, кг	Стоимость, тыс. долл.
«Д-501» («Политехформ, Россия)	500	15	1,0	70	2x0,7	80	38
G-301 (Philips, Германия)	300	300	5,0	55	5x0,5	111	55
Eresco-300/5L (Seifert, Германия)	300	300	5,0	55	3,5x1,5	106	52
Baltospot GFD-306 (Balteau, Бельгия)	300	300	4,0	50	3,5x1,5	98	50

Основные технологические процессы изготовления излучателя «Бриг» аналогичны используемым при изготовлении сверхмощных клистронов. Специфичными являются покрытие медью внутренней поверхности СВЧ-резонаторов из нержавеющей стали и обработка электронной бомбардировкой мишени в отпаянном образце.

3. ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ СОЗДАНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ «БРИГ»

М.И. Лопин проявил смелость и взял на себя ответственность за появление на ФГУП «НПП «Исток» рассматриваемого в статье направления развития СВЧ-приборов.

Активное участие в работе приняли Бацев А.В., Саватьева Н.М., Грицук Р.В., Артамонов Е.В., Корепин Г.Ф. (технологические процессы), Труняков В.Ф. (холодные измерения), Рыжов В.А., Вилков А.Н. (тренировки и испытания), Кондрашенков Ю.А. и другие работники отдела 180 (покрытия резонатора и др.).

4. ПРИМЕНЕНИЯ. СОВРЕМЕННЫЕ И ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ

На заводе «Пермские моторы» ведется регулярное рентгеновское просвечивание швов соединяемых сваркой секций толстостенных корпусов авиадвигателей, выполненных из тугоплавких сплавов. Время контроля благодаря переходу от секторного облучения (зарубежные аппараты) к круговому («Д-501») снижено с нескольких часов до 10 мин.

Один из образцов излучателя «Бриг» в составе аппарата проработал на контроле корпусов авиадвигателя три года в две смены, наработав более 1000 ч, и вышел из строя преждевременно из-за аварийного прекращения подачи охлаждающей жидкости.

На основе «Д-501» возможно создание мобильного рентгеноскопического комплекса (рис.1) для таможенного досмотра большегрузных автомобилей. Создание такого комплекса крайне



Рис. 1. Проект передвижного досмотрового комплекса (конструктор Ю.В. Куликов): *I* – рентгеновский аппарат с излучателем «Бриг»; *2* – источник питания и управления излучателем; *3* – аппаратный отсек; *4* – излучательный отсек; *5* – силовой отсек; *6*, *7* - приемная линейка в походном и развернутом состояниях; *8* – механизмы поворота приемной линейки; *9* – блок управления механизмами; *10* – поле γ-излучения; *H*, *B* – высота и ширина плоскости просвечивания; *C* – уровень плоскости просвечивания относительно земли

актуально как экономически, так и в интересах безопасности государств, поскольку на таможнях мира сейчас инструментально проверяется лишь 5% грузов, из них только 30% соответствуют заявленным декларациям. По заказу ГТК РФ уже успешно выполнен первый этап этой работы [3].

Подвижной таможенный комплекс на основе «Д-501» может стоить в пределах 0,5...1 млн. долл., стационарный – в пределах 0,3...0,5 млн. долл. В то же время стационарный комплекс на зарубежных излучателях стоит до 20 млн. долл. (около 5 млн. долл. – аппаратура, остальная сумма – стационарный бункер и прочее).

Аппарат «Д-501» с излучателем «Бриг» поставлен в Финляндию (в один из НИИ). Приобретен, видимо, с прицелом на возможное участие в прокладке северо-западного газопровода по дну Балтийского моря от Карельского перешейка до Германии.

5. НОВЫЙ ОСТРОФОКУСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Для получения острофокусного [4] рентгеновского излучения с энергией 90...180 кэВ предложен [5] более надежный и долговечный рентгеновский излучатель «мини-Бриг», свободный от недостатков обычных рентгеновских трубок (малый срок службы, расстеклование стеклянных изоляторов и др.). Излучатель (рис. 2) состоит из четвертьволнового коаксиального СВЧ-резонатора и внешнего СВЧ-источника с низковольтным питанием.



Рис. 2. Рентгеновский излучатель «мини-Бриг»: l – резонатор; 2, 3 – внешний и внутренний проводники резонатора; 4 – крышка резонатора у основания пролетной трубы; 5 – крышка резонатора у основания внутреннего проводника; 6 – электронная пушка; 7 – пролетная труба; 8 – анод-мишень; 9 – часть пролетной трубы, примыкающая к аноду-мишени («окно» для вывода рентгеновского излучения); 10 – СВЧ-генератор; 11 – отверстие в крышке резонатора у основания внутреннего проводника (для ввода в резонатор СВЧ-мощности); 12 – устройство поддержания высокого вакуума в резонаторе; 13 – диэлектрическое вакуумное окно для ввода в резонатор СВЧ-мощности; 14 – петля связи СВЧ-генератора с резонатор ром; 15 – магнитная система

ЛИТЕРАТУРА

1. *Г.П. Щелкунов, М. Симановский*. Передвижные таможенные комплексы. Новые средства рентгеноскопии // Электроника НТБ. – 1999. – № 6. – С. 32-34.

2. Г.П. Щелкунов. Проблемы безопасности и новые средства рентгеноскопии и рентгенографии // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2 (476). – С. 72-74.

3. Оценка возможности построения мобильного таможенного комплекса для контроля большегрузных автомобилей / Г.П. Щелкунов, В.Д. Данилов, М.Ф. Симановский, Б.А. Шныков, М.В. Мишнев, В.С. Королев, Ю.Н. Бурмистенко, С.Н. Клемин // Тез. докл. 15 Российской научн.-техн. конф.: Неразрушающий контроль и диагностика. 28 июня – 2 июля 1999. – 1999. – Т. 2. – С. 194.

4. Денискин Ю.Д., Чижунова Ю.А. Медицинские рентгеновские трубки и излучатели. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

5. Патент 2214018 РФ. Рентгеновский излучатель / Г.П. Щелкунов. Приоритет 22.06.01.

Статья поступила 17 июля 2006 г.

🔲 НОВЫЕ КНИГИ 🚞

Наноматериалы. Нанотехнология. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год: сб. ст. /Под ред. П.П. Мальцева. - М.: Техносфера, 2006. - 152 с.

Приведены мировые новости за 2005 год, сгруппированные по разделам и охватывающие наноматериалы, наноэлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В книге с цветными иллюстрациями приведены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологии, наноматериалов, наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 577

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ ОБЛУЧЕНИИ ЖИДКИХ СРЕД В БИОХИМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов

ФИРЭ РАН, г. Фрязино

Предложен метод перемешивания исследуемых объектов в условиях биохимического эксперимента.

A method of mixing up the objects to be studied in the conditions of biochemical experiment has been proposed.

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях биохимического эксперимента, связанного, например, с флуоресцентным спектральным анализом молекулярного раствора, исследователям часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда доступ к объекту, находящемуся в стандартной кювете, затруднен из-за облучения и регистрации светового потока с двух, а то и трех сторон. К этому следует добавить и условия проведения эксперимента в «темноте», т.е. в тесной, наглухо закрытой камере, обеспечивающей световую герметизацию объекта.

В подобных условиях осуществить термостатирование объекта, а тем более его перемешивание с помощью традиционной магнитной или механической мешалки очень трудно, а иногда практически невозможно. И даже в тех случаях, когда это технически возможно, при продолжительных экспериментах, связанных с проведением многочисленных биохимических проб, присутствие в кювете механической или же магнитной мешалки, которую необходимо промывать перед каждой пробой, создает определенные условия, приводящие как к внесению дополнительной погрешности в результат измерений, так и к увеличению времени проведения эксперимента.

Результаты выполненных [1] экспериментальных исследований гидродинамической неустойчивости в водных средах при поглощении микроволнового излучения позволяют использовать данный вид излучений в биохимическом эксперименте для осуществления необходимых условий опыта.

Оценка величины локального нагрева водной среды с учетом теплопроводности показала, что даже при «нетепловом» уровне интенсивности микроволнового облучения (плотность падающей мощности – до 10 мВт/см²) градиенты температуры в области поглощения могут быть значительными. Решение уравнения теплопроводности для этого случая дает величину максимального градиента температуры – около 0,15 °С/см [2]. Даже самые простые методы наблюдения позволили обнаружить перемещение слоев воды вблизи поверхности, на которую падает микроволновое излучение. В частности, хорошо видно под микроскопом движение взвешенных в воде частиц, например эритроцитов в физиологическом растворе в тонкой кварцевой кювете, облучаемой мм-волнами. Наблюдали также конвекцию, вызванную КВЧ-излучением, вблизи плоской вертикальной стенки кварцевой кюветы, предварительно «пометив» воду следами от капель туши (тушевыми нитями). В другом эксперименте через тонкую иглу на дно кюветы, заполненной водой, вводился небольшой объем концентрированного раствора сахарозы и после установления четко видимой верхней границы тонкого слоя сахарозы включалось облучение. При этом можно было наблюдать, как мм-волны ускоряли подъем и размытие границы между сахарозой и водой.

Поскольку в вышеприведенных экспериментах, посвященных изучению конвекции в воде, предполагалось наличие градиентов температуры в области поглощения излучения, то следовало бы подробнее остановиться на результатах исследований распределения температуры в объеме воды при микроволновом облучении.

Известно много типов датчиков для точного измерения температуры: термопары, термисторы, стекловолоконные датчики, миниатюрные бескорпусные транзисторные пары. Они обладают высокой чувствительностью и работают в широком диапазоне температур. Однако эти устройства вносят возмущения в изучаемые системы, влияя на локальную температуру и характеристики теплообмена в данном месте.

Оптические методы уступают по точности измерений перечисленным выше методам (так как зависимость показателя преломления от температуры для воды невелика), но являются самыми удобными для изучения распределения температуры и гидродинамической неустойчивости, поскольку позволяют зарегистрировать изменения во всей интересующей области объема, не внося возмущений (если пренебречь поглощением зондирующих лучей) в установившиеся течения и тепловые потоки.

Исследование профиля температуры, образующегося при облучении воды, методом голографической интерферометрии показало, что распределение температуры при поглощении КВЧизлучения указывает на движение жидкости.

На рис. 1 отчетливо виден развитый конвективный «факел» в середине кюветы при плотности падающей мощности 20 мВт/см². Механизм конвективного движения в этом случае, очевидно, термогравитационный, т.е. связан со всплыванием нагретых (с меньшей плотностью) элементов жидкости.

Рис. 1. Восстановленное с голограммы изображение термогравитационной конвекции воды в кювете. Облучение производилось через дно кюветы при интенсивности 20 мВт/см² и длине волны 8,5 мм. Чередование темных и светлых полос в центральной части кюветы, вытянутых перпендикулярно облучаемой поверхности (конвективный «факел»), показывает направление движения разогретых слоев воды, характерное для термогравитационной конвекции



Более точные количественные данные о влиянии перемешивания под действием КВЧ-облучения были получены в опытах с использованием полярографического метода. Известно, что скорость многих электрохимических процессов лимитирована стадией диффузии реагентов и продуктов реакции в водной фазе. Конвективная диффузия должна ускорять такие реакции, т.е. увеличивать предельные полярографические токи [3].

Было установлено, что платиновый электрод, когда к нему приложен потенциал ионизации кислорода, чувствителен к КВЧ-облучению раствора [4]. Если расположить электрод в растворе на расстоянии примерно 1 мм от вертикальной стенки кюветы, на которую подается КВЧ-излучение, то даже при интенсивности облучения 1 мВт/см² удается отчетливо зарегистрировать увеличение полярографического тока (рис.2,*a*). При увеличении интенсивности КВЧ-излучения эффект возрастал (рис. 2, δ). Наблюдаемое увеличение полярографического тока под









Рис. 2. Увеличение скорости переноса O₂ в воде под действием мм-излучения, регистрируемое полярографическим методом:

а - схема облучения и способ измерения концентрации кислорода в воде по величине изменения тока полярографической ячейки (момент включения излучения с длиной волны 6,5 мм и мощностью 4 мВт/см² указан стрелкой); *б* – дозовая зависимость эффекта от плотности потока мощности мм-излучения

действием КВЧ-излучения хорошо объясняется конвекцией, приводящей к обогащению кислородом приэлектродного слоя водного раствора.

Рассмотренный конвективный эффект микроволнового излучения мог бы оказаться очень важным для протекания химических реакций в водных средах, учитывая возможность ускорения доставки реагентов к месту реакции или же их отвода от места реакции. Причем удобным способом проверки механизма действия микроволн на водные среды является механическое перемешивание.

В современных медико-биологических дисциплинах в аналитических и диагностических целях чрезвычайно широко используются пероксидазные реакции. Этот биохимический механизм лежит в основе многочисленных иммунных диагностических китов, детекции белков с использованием электрофореза, обнаружения активных форм кислорода в живых клетках, аналитического измерения органических и неорганических перекисей, оценки активности широкого круга ферментов и др. [5-9].

Пероксидазная реакция – это реакция, в ходе которой перекиси восстанавливаются до алкоголей (а перекись водорода – до воды) за счёт окисления каких-либо субстратов. Эффективное протекание этих реакций предполагает ферментативный катализ, который осуществляется семейством белков пероксидаз (например, пероксидозой хрена, миелопероксидазой и т.п.) или их синтетическими аналогами (микропероксидазами) [10]. В качестве субстратов пероксидаз наиболее часто используются специфические флуорофоры, квантовый выход флуоресценции которых существенно возрастает после окисления. В нашем примере практически нефлуоресцентная молекула Амплекса Красного – одна из наиболее чувствительных и стабильных проб для пероксидазных реакций – при окислении превращается в ярко флуоресцирующий резоруфин (рис. 3) [11].



Рис. 3. Механизм каталитического окисления Амплекса Красного в резоруфин

Условия проведения реакций с участием флуоресцентных молекул требуют постоянного перемешивания, в особенности при кинетических измерениях, в связи с побочными фотохимическими реакциями. В данной работе показано, что в качестве миксера в измерительной кювете может быть использовано излучение микроволнового диапазона, что позволяет избежать артефактов при аналитических измерениях.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы: хлорид натрия, дигидрофосфат натрия и гидрофосфат натрия, пероксидаза хрена (ПХ), перекись водорода (Sigma, США), Амплекс Красный (Molecular Probes, США).

Детекция флуоресценции проводилась с помощью спектрофлуориметра F-2500 (Hitachi, Япония) в кварцевой микрокювете (3х3х20 мм) при объёме раствора 80 мкл. Условия измерений: длина волны возбуждения – 560 нм; диапазон детекции флуоресценции – 580...700 нм; размеры возбуждающей и эмиссионной щелей – 2,5 и 10 нм соответственно. Обработка спектров и кинетических кривых осуществлялась с помощью программ FL Solutios (Hitachi) и Excel (Microsoft).

В качестве источника микроволнового излучения использовался генератор на основе диода Ганна с частотой 32 ГГц и мощностью излучения от 3 до 30 мВт. Установка микроволнового облучения обеспечивала подведение излучения к исследуемому объекту с помощью открытого конца волновода сечением 7,2х3,4 мм² с согласующими элементами. Осуществлялся контроль режима бегущей волны, мощности микроволнового излучения и длины волны излучения.

Пространственное измерение температуры в кювете проводилось с помощью микротермодатчика МТ-4МО (ФИРЭ РАН).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры флуоресценции резоруфина, образовавшегося в результате окисления Амплекса Красного в присутствии ПХ и перекиси водорода показаны на рис. 4. Видно, что интенсивность флуоресценции строго зависит от количества добавленной перекиси. Реакция протекает



Рис. 4. Спектры флуоресценции реагента Амплекс Красный при окислении пероксидазой хрена и перекисью водорода. Условия: Амплекс Красный – 1 мкм; ПХ – 2,2 мкм/мл; концентрация H₂O₂ изображена на рисунке. Спектры сняты по окончании реакции (1 мин)

очень быстро в присутствии сравнительно высоких концентраций ПХ. В отсутствие H₂O₂ флуоресценция близка к базовой линии.

Однако окисление Амплекса Красного может происходить не только благодаря пероксидазному катализу, а и в результате фотохимического окисления. На рис. 5,6 представлены скорости образования резоруфина в отсутствие пероксидазы при различных концентрациях Амплекса Красного. Этот, побочный в данном случае, процесс идёт только в области непосредственного облучения и может дать большой вклад в общий результат в отсутствие перемешивания. Особенно пагубный эффект фотохимические реакции оказывают при длительных измерениях (например, при измерении образования перекисей в живых системах или при исследовании медленной кинетики реакции).



Рис. 5. Пероксидазное и фотохимическое окисление реагента Амплекс Красный: *а* – окисление реагента Амплекс Красный в присутствии ПХ и перекиси водорода (условия: Амплекс Красный – 1 мкм; концентрация ПХ изображена на рисунке); *б* – окисление реагента Амплекс Красный в отсутствие ПХ и перекиси водорода

На рис. 6 продемонстрирован эффект влияния микроволнового излучения на результат измерений окисления Амплекса Красного. В отсутствие излучения и перемешивания наблюдается увеличение флуоресценции даже без пероксидазы и перекиси (А); при включении излучения флуоресценция снижается почти до исходного уровня (Б). Аналогичный результат наблюдается при включении механической мешалки (Г). Так как резоруфин является продуктом необратимой реакции, можно предположить, что его концентрация локально повышается в зоне облучения благодаря фотохимическому окислению Амплекса Красного. При включении микроволнового излучения происходит небольшой нагрев растворителя, усиливаются конвективные процессы и концентрация резоруфина выравнивается по объёму кюветы.



Рис. 6. Эффект влияния микроволнового облучения на фотохимическое окисление реагента Амплекс Красный (Амплекс Красный – 50 мкм). Моменты включения и выключения микроволнового облучения мощностью 20 мВт, а также однократного механического перемешивания изображены стрелками

И действительно, измерения температуры в кювете показывают, что она быстро возрастает на несколько градусов при включении микроволнового излучения (рис. 7). Причём возникает градиент температур по объёму кюветы с максимумом напротив микроволнового облучателя, у ближней к нему стенки кюветы (рис. 8). Очевидно, такой локальный нагрев создаёт условия для возникновения интенсивных конвективных потоков. Известно также, что повышение температуры на несколько градусов не оказывает существенного влияния на окисление резоруфина.



Рис. 7. Эффект влияния микроволнового облучения на изменение температуры в центре измерительной кюветы. Объём водного раствора в кювете – 80 мкл; температура воздуха в помещении – около 26 °C



Рис. 8. Пространственное распределение температуры в измерительной кювете при микроволновом облучении. Объём водного раствора в кювете – 80 мкл; мощность излучения – 20 мВт; время облучения – 6 мин; температура водуха в помещении – около 26 °С

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано, что источники микроволнового излучения могут быть использованы в качестве мешалки в аналитических флуоресцентных методах. Преимущество такой мешалки перед механической или же магнитной заключается в отсутствии необходимости вставлять и вынимать магнитную или механическую мешалку из кюветы (что повышает производительность и позволяет проводить более быстрые кинетические измерения), а также мыть мешалку после проведения каждой пробы (снижается вероятность контаминации образцов). Учитывая, что флуоресцентные методы занимают лидирующее положение среди измерительных методов в медико-биологической области, причём перемешивание образца часто является обязательным условием проведения эксперимента (из-за фоточувствительности флуорофоров), можно надеяться, что предложенный подход найдет широкое практическое применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Казаринов К.Д*. Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности // Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. – 1990. – Т. 27. – 102 с.

2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматиздат, 1959. – С. 378-388.

3. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высшая школа, 1969. – 499 с.

4. *Kazarinov K.D., Putvinsky A.V., Malinin V.S.* Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation // Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: Plenum Publishing Corporation. – N.Y., 1998. – P. 569 - 572.

5. Subnanoliter enzymatic assays on microarrays / P. Angenendt, H. Lehrach, J. Kreutzberger, J. Glokler // Proteomics. – 2005. – Vol. 5. – P. 420-425.

6. A novel approach for screening the proteome for changes in protein conformation / Pierce A., deWaal E., Van Remmen H., Richardson A., Chaudhuri A. // Biochemistry. – 2006. – Vol. 45. – P. 3077-3085.

7. Borutaite V., Brown G.C. S-nitrosothiol inhibition of mitochondrial complex causes a reversible increase in mitochondrial hydrogen peroxide production // Biochim Biophys Acta. – 2006. – Vol. 1757. – P. 562-566.

8. Cytochrome acts as a cardiolipin oxygenase required for release of proapoptotic factors / V.E. Kagan, V.A. Tyurin, J. Jiang, Y.Y. Tyurina, V.B. Ritov, A.A. Amoscato, A.N. Osipov, N.A. Belikova, A.A. Kapralov, V. Kini, I.I. Vlasova, Q. Zhao, M. Zou, P. Di, D.A. Svistunenko, I.V. Kurnikov and G.G. Borisenko // Nature Chemical Biology. – 2005. – Vol. 1. – P. 223-232.

9. Enzyme-coupled assay for beta-xylosidase hydrolysis of natural substrates / K. Wagschal, D. Franqui-Espiet, C.C. Lee, G.H. Robertson, D.W. Wong // Appl Environ Microbiol. – 2005. – Vol. 71. – P. 5318-5323.

10. Glutathione propagates oxidative stress triggered by myeloperoxidase in HL-60 cells. Evidence for glutathionyl radicals induced peroxidation of phospholipids and cytotoxicity / G.G. Borisenko, I. Martin, Q. Zhao, A.A. Amoscato, Y.Y. Tyurina, and V.E. Kagan // J. of Biological Chemistry. – 2004. – Vol. 279. – P. 23453–23462.

11. Development of novel fluorescence probes that can reliably detect reactive oxygen species and distinguish specific species / *K. Setsukinai, Y. Urano, K. Kakinuma, H.J. Majima, T. Nagano* // J. of Biological Chemistry. – 2003. – Vol . 278. – P. 3170-3175.

Статья поступила 24 ноября 2006 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 625.331.121

ОЧИСТКА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ЭНЕРГИИ

А. Н. Королев, Н. В. Абакумова, Е. В. Мицук, В. А. Мальцев, В. С. Морозов, И. В. Самсонова, Е. О. Сафонова

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Проведено описание способа очистки текстильных материалов и изделий из них с помощью СВЧ-энергии. Преимуществом данного способа является существенное снижение количества используемых очищающих средств и энергозатрат на очистку.

A method of cleaning of textile materials and things made thereof by microwave energy has been described. The advantage of this method is a significant reduction of detergents and power consumption for cleaning.

В последнее время возрос интерес к применению СВЧ-энергии для ускорения и повышения качества очистки текстильных материалов.

В работе [1] описан аппарат для промывки волокнистого материала, содержащий устройство с форсунками для подачи моющего агента и модуль СВЧ-генератора с волноводом. Текстильные материалы и изделия из них, предварительно разрыхленные на трепальном оборудовании до волокнистого состояния и насыщенные моющим раствором, поступают в зону действия энергии СВЧ-поля, где под влиянием тепла и сопутствующих электрических факторов происходит очистка.

К недостаткам этого аппарата можно отнести значительные энергозатраты на нагрев из-за большой длительности процесса очистки (10...25 мин).

В работе [2] предложен способ очистки и дегазации текстильных материалов армейского обмундирования, загрязненных капельно-жидким загущённым фосфорорганическим физиологически активным веществом, с использованием энергии СВЧ-поля. Загрязненные образцы помещают в рабочую камеру барабанной СВЧ-установки, наполняют камеру рабочим раствором, проводят стирку, отжим и диэлектрический нагрев образцов для их высушивания.

При этом для очистки не требуется предварительного разрыхления волокнистого материала на трепальном оборудовании.

Основные недостатки этого способа: большая продолжительность очистки (30...40 мин), большие энергозатраты, связанные с этой продолжительностью, и большая мощность CBЧполя, необходимые для очистки и дегазации ткани от загущённых фосфорорганических физиологически активных веществ, а также невозможность применения этого способа для очистки разноцветных текстильных изделий, в том числе и повседневной одежды, поскольку длительное воздействие энергии CBЧ-поля может привести к изменению цвета ткани (обесцвечиванию) и частичному разрушению структуры волокна.
Кроме того, следует отметить ограниченное применение этого способа: для загрязнений определенного типа специального армейского обмундирования.

Техническим результатом предлагаемого способа [3] является существенное снижение энергозатрат на очистку текстильных материалов, снижение времени и повышение качества очистки.

Эффект достигается за счет того, что очистка текстильных материалов и изделий из них производится путем воздействия на содержимое объема энергией СВЧ-поля с мощностью 500...1000 Вт в течение 1...5 мин. Воздействие на содержимое объема энергией СВЧ-поля осуществляют в СВЧ-печи либо через открытый конец волновода. В качестве очищающих средств используют жидкие либо летучие моющие средства.

В качестве примера была проведена очистка загрязненных текстильных материалов в виде ткани. Стеклянный объем емкостью 0,5 л наполняли на 1/2 части водой, туда же закладывали 0,5 г хозяйственного мыла (концентрация – 2 г/л). Кусок белой ткани площадью 50 см² с пятном от растительного масла погружали в содержимое объема и смачивали. Объем закрывали, помещали в СВЧ-печь типа «Электроника», имеющую мощность 500 Вт, и подключали печь к источнику питания – к сети. Через 3 мин печь отключали от источника питания, объем вынимали из печи, содержимое выливали, а изделие из ткани прополаскивали. Наблюдалось полное исчезновение пятна. Аналогичные опыты были проделаны с пятнами на ткани от ягоды и травы.

Отметим, что при СВЧ-нагреве наблюдалось бурное пенообразование.

Существенным преимуществом предлагаемого способа очистки текстильных материалов и изделий из них по сравнению с известными является значительное (на порядок) снижение, а в ряде случаев и полное исключение применения очищающих средств; снижение энергозатрат на очистку и времени очистки; повышение качества очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2194556 РФ.

2. Патент 2133788 РФ.

3. Патент 2221095 РФ. Способ очистки текстильных материалов и изделий из них / А.К. Балыко, А.Н. Королев, В.А. Мальцев, В.С. Морозов и др.; приоритет 14.01.02.

Статья поступила 16 октября 2006 г.

СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РТУТИ ИЗ РТУТНЫХ ЛАМП

А. Н. Королев, Н. В. Абакумова, О. С. Зуева, В. А. Мальцев, В. С. Морозов, И. В. Самсонова, Е. О. Сафонова

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Предлагается новый способ извлечения ртути из приборов, отслуживших свой срок. Суть способа заключается в том, что лампу охлаждают в жидком азоте до кристаллизации паров ртути, затем ее разгерметизируют и собирают кристаллы ртути в специальную емкость.

A new way of mercury extraction from outworn devices is proposed. The idea is as follows: a tube is cooled in liquid nitrogen till mercury vapour crystallization, then it is desealed and mercury crystals are collected int50 a special reservoir.

Ртутная лампа представляет собой герметически закрытую с двух сторон стеклянную трубку, заполненную ртутью или ее парами при пониженном или повышенном давлении внутри трубки. Подобную конструкцию имеют и другие изделия, содержащие ртуть [1].

Ртуть – высокотоксичное вещество. Поскольку ртуть и ее пары вредны для здоровья человека и окружающей среды, то поиск совершенных способов извлечения ее из приборов, отслуживших свой срок, представляется весьма актуальной и жизненно важной задачей.

В советское время ртутьсодержащие отходы (РСО), образующиеся на территории СССР, централизованно перерабатывались на Никитовском ртутном комбинате (Украина). Существовала отработанная система сбора, учета, транспортировки и переработки этих отходов. Ежегодно перерабатывалось до 205 тыс. т РСО двенадцати наименований и из этого сырья производилось до 400 т товарной ртути. После распада СССР эта система не работает, и, как следствие, с каждым годом все более обостряется проблема сверхлимитных накоплений РСО на предприятиях, использующих и использовавших в прошлом ртуть. По состоянию на 1999 г., на территории России накопилось около 650 тыс. т РСО с содержанием ртути от 0,02 до 75% и ежегодно производится и складируется до 11 тыс. т таких отходов [2].

Не менее опасными являются накопления ртути и ртутьсодержащих приборов в различных учебных заведениях, научных учреждениях, опытных заводах и у населения крупных городов. В 1997 году в рамках выполнения муниципальной программы по инвентаризации источников ртути в г. Санкт-Петербурге было определено, что количество ртути в термометрах и тонометрах, находящихся у граждан, составляет не менее 3 т. На промышленных предприятиях, в НИИ, медицинских, школьных и дошкольных учреждениях города хранится 10...12 т ртути. Эти источники определяют аварийные ситуации, связанные с разливом ртути и загрязнением ею территорий. Подобная ситуация сложилась и в Москве.

На практике широко используются несколько способов извлечения ртути из ртутных ламп и изделий. Один из самых распространенных включает в себя разгерметизацию лампы (либо изделия) и сбор ртути в специальном резервуаре. Такой способ достаточно прост и не требует больших затрат. Недостатком его является значительное загрязнение окружающей среды непосредственно парами ртути во время разгерметизации лампы (изделия), а также за счет остающихся на стенках стеклянной трубки капель ртути. Другой известный способ включает в себя следующие основные операции: подключение лампы (изделия) к специальному резервуару; разгерметизация лампы (изделия); вытеснение из лампы (изделия) паров ртути путем закачивания в неё воздуха; осаждение паров ртути в специальном резервуаре при нормальном давлении.

Преимущество этого способа в том, что специальный резервуар подключают до разгерметизации, что частично снижает степень загрязнения окружающей среды. Недостатками его являются наличие остатков ртути в виде капель на стенках стеклянной трубки, осевших в процессе разгерметизации лампы и не поддающихся извлечению, а также сложность и опасность процесса извлечения.

Для снижения степени загрязнения окружающей среды парами ртути, упрощения процесса извлечения ртути из ртутных ламп и изделий, содержащих ртуть или ее пары, и сокращения времени осуществления этого процесса в настоящей работе предлагается новый способ извлечения ртути из приборов [3]. Суть способа заключается в том, что перед разгерметизацией лампу (изделие) охлаждают в жидком азоте в течение 1...3 мин, а процесс сбора ртути производят в течение не более 0,5 мин после разгерметизации.

Известно, что при нормальном давлении ($p_0 = 1$ атм) и комнатной температуре (20 °C) ртуть представляет собой жидкость с окружающим ее слабоинтенсивным облаком пара. Температура парообразования ртути при $p_0 = 1$ атм составляет 375 °C. Если понижать температуру, то пары ртути будут конденсироваться. При снижении температуры окружающей среды ниже температуры кристаллизации ртути (-39 °C) ртуть превращается в твердое тело и легко собирается в специальный резервуар. Такая низкая температура может быть достигнута, например, при погружении лампы в жидкий азот, температура которого составляет -190 °C, и охлаждении в течение 1...3 мин. За это время ртуть из парообразного состояния переходит в отвердевшее кристаллическое. Отвердение ртути существенно ослабляет связь ее со стеклянными стенками трубки лампы, что позволяет более полно собрать ее в специальный резервуар и тем самым снизить степень загрязнения окружающей среды парами ртути. После разгерметизации лампы кристаллы ртути извлекаются простым высыпанием в специальный, плотно закрываемый резервуар, что позволяет исключить операцию вытеснения паров ртути из лампы, а значит, упростить процесс извлечения ртути и сократить время осуществления этого процесса.

Таким образом, предлагается следующая последовательность действий. Ртутную лампу погружают в сосуд с жидким азотом, через 2 мин ее вынимают, стеклянную трубку лампы с одного конца разрушают и производят сбор ртути в виде кристаллов в течение не более 0,5 мин после разгерметизации. Кристаллы ртути помещают в специальный, плотно закрываемый резервуар.

Преимуществом предлагаемого способа является, во-первых, снижение степени загрязнения окружающей среды парами ртути в результате значительного (на порядок) уменьшения, а в ряде случаев и полного исключения остатков паров и капель ртути на стенках трубки; во-вторых, упрощение процесса извлечения ртути из ртутных ламп (изделий) и сокращение его продолжительности в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ртутные лампы высокого давления / Перевод под ред. Г.Н. Рохлина. – М.: Энергия, 1971.

2. Анализ состояния ртутного загрязнения окружающей среды в РФ: Научно-техн. отчет. – НИЦ ПУРО при Минэкономики РФ и Минэкологии РФ, 1999.

3. Патент 2231856 РФ. Способ извлечения ртути из ртутных ламп и изделий, содержащих ртуть или пары ртути / А.К. Балыко, А.Н. Королев, В.А. Мальцев и др.; приоритет 05.09.02.

Статья поступила 11 июля 2006 г.

КАТАЛОГ информационных изданий на 2007 г.

Проводится подписка на следующие виды изданий:

- «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника» (4 вып. в год). Стоимость подписки – 1180 руб., включая НДС (18 %).
- «Новости СВЧ-техники» информационный сборник (12 вып. в год). Стоимость подписки – 1180 руб., включая НДС (18 %).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам:

ФГУП «НПП «Исток», ИНН 5052002576, р/с 40502810640480100019, «Сбербанк России» г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225, ОКПО 07622667, ОКОНХ 95120, КПП 509950001, ОСБ 2575 г. Щелково и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, ФГУП «НПП «Исток», НИО-100; тел./факс: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

3 A K A 3			
Прошу принять подписку на «	» на 2007 г. и направлять по адресу:		
Куда			
(почтовый инд	декс, адрес)		
Кому			
(название орг	анизации)		
Заказ оплачен платежным поручением №	дата		

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	Усл. п. л. 13,75	Формат 60×88 ^{1/8}
23.03.2007 г.	Учизд. л. 14,25	Тираж 200
Заказ № 145	Индекс 36292	17 статей

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12 E-mail: istok-info@flexuser.ru