

Министерство образования и науки Российской Федерации
Муромский институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

И.Н. Ростокин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

**Учебное пособие к курсовой работе
по дисциплине «Теория физических полей»**

Муром
2013

ВВЕДЕНИЕ

Процесс создания новой техники всегда связан с созданием новых приборов и устройств. Сложные взаимоотношения между заказчиком и разработчиком требуют от молодого специалиста твердых знаний терминологии, логики мышления, понимание ключевых проблем проектирования и применения СВЧ приборов, устройств и систем. Возможно, в процессе работы ему не так часто будет нужно решать уравнения Максвелла в чистом виде, но понимать, как это делает компьютерная программа, понимать, какие алгоритмы и методы измерения положены в основу работу измерительных приборов и современных компьютерных программ проектирования - это требование не лишнее для молодого пополнения научных и инженерных кадров. Сильная сторона молодых кадров - в их способности уловить суть проблемы на интуитивном уровне, в умении обойти недостающее звено при логическом построении алгоритма решения проблемы.

Сначала познакомимся с терминологией, которая помогает расшифровать общее содержание курса «Проектирование СВЧ устройств».

Проектирование – это процесс создания технической документации: рабочих чертежей и пояснительной записки на основании технического задания (ТЗ) главного конструктора.

Важными этапами проектирования являются НИР (научно-исследовательская работа) и ОКР (опытно-конструкторская работа), создание опытного образца и отработка ТУ - технических условий эксплуатации.

Производство - процесс физической реализации устройства с использованием современных технологических процессов. Включает создание опытной серии, серийное производство и модернизацию.

Применение – это включение узла, прибора или устройства в систему, тракт, на основании ТУ. Если данные ТУ неполные, необходимо провести входной контроль - серию лабораторных испытаний изделия.

СВЧ приборы – отдельные неделимые элементы СВЧ тракта: полупроводниковые диоды, транзисторы, диоды Ганна, ЛПД, микросхемы СВЧ, СВЧ лампы, клистроны, ЛБВ-О, ЛОВ-О, ЛБВ, ЛОВ-М магнетроны, фильтры и др.

СВЧ устройства – законченные функциональные СВЧ блоки - диодные головки, фильтры, автогенераторы, транзисторные СВЧ усилители, умножители, смесители (преобразователи частоты).

СВЧ тракт – отдельный функционально законченный и выполняющий автономную задачу блок - радиоприемный тракт, передающий тракт, антенно-фидерный тракт.

СВЧ система – сложное соединение различных блоков и трактов, выполняющее определенную техническую задачу - например передачу информации от абонента к получателю, обнаружение цели, причаливание корабля к причалу и др.

1 Материалы микрополосковых плат СВЧ устройств

В радиоэлектронике СВЧ наиболее широкое применение в качестве подложек микросхем находят высокомолекулярные соединения – органические и неорганические полимеры и силикаты. Процесс получения печатной схемы в значительной мере определяет материалы, используемые для проводящего покрытия и изоляционного основания. Поскольку при единичном производстве наиболее целесообразным способом получения печатных плат является фотохимический метод, применяемый для органических диэлектрических подложек, предварительно металлизированных до номинальной толщины, то произведем окончательный выбор материала подложки среди фольгированных органических диэлектриков.

Материалы подложек должны удовлетворять ряду требований: обладать достаточной механической прочностью, высоким значением относительной диэлектрической проницаемости и малыми потерями.

Относительная диэлектрическая проницаемость определяет длину волны в микрополосковой линии передачи и, следовательно, линейные размеры микросхемы. Для повышения степени интеграции желательно применять подложки с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости. При увеличении диэлектрической проницаемости, кроме того, снижаются потери на излучение микрополосковой линии, поскольку большая часть электромагнитного поля сосредоточена в среде с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости, т.е. в материале подложки [7]. Однако при высоких значениях относительной диэлектрической проницаемости легко возбуждается семейство поверхностных волн, которые вызывают паразитные колебания, влияющие на распространение ТЕМ – волны, являющейся основной для микрополосковой линии.

Граничная частота поверхностной волны низшего типа определяется из соотношения

$$f = 75/h\sqrt{\varepsilon - 1}$$

Очевидно, что при высоком ϵ границу возбуждения паразитных волн можно поднять за счет уменьшения толщины подложки. Но при этом проявляются ограничения на минимальную толщину подложки.

Все выше сказанное вынуждает выбирать материал подложки из компромиссных соображений. Так в случае использования интегральных схем СВЧ в устройствах сантиметрового диапазона волн, к которым относится разрабатываемый радиометр, для обеспечения необходимых технологических допусков требуется некоторое увеличение линейных размеров плоских устройств. Это становится возможным за счет уменьшения величины диэлектрической проницаемости, что также снижает уровень поверхностных волн в данном диапазоне.

Основные марки и характеристики фольгированных диэлектриков, используемых при единичном производстве, представлены в таблице 2.2

Таблица 1.2 – Характеристики фольгированных диэлектриков

Марка	ϵ	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$	Пробивное напряжение, МВ/м	Плотность, г/см ³	Теплостойкость, °С	Кт, Вт/м ² °С	КТЛР * 10 ⁵ * °С ⁻¹	Предел прочности, МПа, при		
								изгибе	сжатии	растяжении
ФАФ-4	2.6	10	25	2.6	250	0.21	5	21.0	-	80
ФЛАН-2.8	2.8	15	15	1.1	190	0.2	3.5	80	104	95
ПКТ-3	3	50	19	1.3	150	0.28	2.5	100	78	50

Материалом, удовлетворяющим предъявляемым требованиям является фторопласт-4 армированный ФАФ-4 ГОСТ 21000-75. Это прессованный материал, представляющий собой многослойную пластину из стеклоткани на основе стекловолокна марки Э (изготовленного из фторопласта-4Д, толщина волокна 0,1 мм). Стеклоткань многократно пропитывается суспензией фторопласта 4Д до содержания связующего вещества не менее 75%. Пластины из ФАФ-4 изготавливают прессованием пачки листов пропитанной стеклоткани,

облицованной медной фольгой (толщиной 30 ... 50 мкм). Прочность сцепления фольги с диэлектриком - не менее 800 Н/м. Диэлектрическая проницаемость: $2,6 \pm 0,2$ в направлении, перпендикулярном слоям пластины, и $3,0 \pm 0,3$ в направлении, параллельном слоям; $\text{tg}\delta$ $1 \cdot 10^{-3}$ и $3,5 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Материал допускает все виды механической обработки, стоек к воздействию химических веществ, используемых в технологии изготовления полосковых схем, устойчив к действию агрессивных сред, обладает высокой механической прочностью, выдерживает пайку при температуре до 260°C в течение 10 с. Рабочий диапазон температур $-60 \dots + 250^\circ\text{C}$. Уход размеров для ФАФ-4 не более 0,2% после изготовления полосковой платы, и 0,09% после воздействия повышенной температуры до 48 часов.

2 Корпуса СВЧ устройств

Корпус микрополоскового СВЧ устройства обеспечивает: жесткое закрепление платы и соединение ее выводов с переходами, предназначенными для связи с внешними цепями; защиту платы и ее элементов от внешних климатических, механических и других воздействий (корпус должен быть при необходимости герметичным); экранировку схемы от внешних электромагнитных излучений (наводок) и подавление излучения во внешнюю среду; теплоотвод от участков схемы, в которых рассеивается электромагнитная энергия. Кроме того, корпус должен быть технологичным, экономически выгодным, обеспечивать возможность сборки схемы, контроль, подстройку и ремонт [12].

Разработаны разнообразные типы корпусов для полосковых схем, которые делятся на два класса: герметизированные и негерметизированные. В таблице 2.1 представлены основные материалы, используемые для корпусов, и указаны технологические процессы их изготовления. В таблице 2.2 содержатся данные о плотности и КТЛР (в диапазоне 20 ... 200° С) материалов корпусов. По типу конструкции корпуса подразделяются на коробчатые, рамочные, пластинчатые и составные.

Таблица 2.1 - Материалы и способы изготовления корпусов

Вид корпуса	Способ изготовления	Материал
Рамочный	Сборка (пайка) Штамповка Прессование Фрезерование	Латунь, медь Латунь, титан, ковар АГ-4В, ДСВ-2Р-2М, ДСВ-4Р-2М, керамика Латунь, титан, алюминий
Коробчатый (чашечный)	Литье Штамповка Фрезерование	Латунь, алюминий Титан, латунь, алюминий Латунь, медь, алюминий, титан

Пластинчатый	Литье	Латунь, алюминий
	Штамповка	Латунь, алюминий
	Прессование	АГ-4В, ДСВ-2Р-2М, ДСВ-4Р-2М
	Фрезерование	Латунь, алюминий

Таблица 2.2 - Свойства материалов корпусов

Материал, ГОСТ	Плотность, г/см ³	КТЛР.10 ⁶ , 1/°С (при 0°С)
Титановый сплав ВТ5-1 ГОСТ 19807-74	4,42	8,3...8,9
Алюминиевый сплав В-95 ГОСТ 4784-74	2,85	24
Алюминиевый сплав Д-16 ГОСТ 4784-74	2,78	22
Алюминиевый сплав Ал-9 ГОСТ 2685-63	2,66	23...24,5
Медь М1	8,94	16,6...17,1
Сплав 29НК (ковар) ГОСТ 10994-74	8,2	4...5,2
Латунь Л-63 ГОСТ 15527-70	8,43	20,6

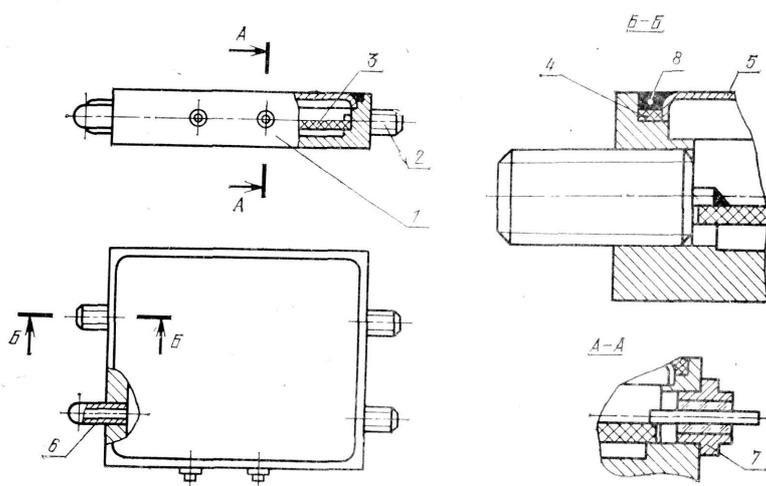
В качестве материалов корпусов ИС СВЧ широко применяются латунь, алюминий, медь и титан. Корпуса из латуни и алюминия могут изготавливаться литьем под давлением с последующим фрезерованием центральной части заготовки. Корпус, как правило, представляет собой замкнутый металлический короб. Его дно, крышка и стенки чаще всего имеют прямоугольную форму, что обусловлено конфигурацией стандартных подложек, удобством присоединения переходов.

Для уменьшения веса и стоимости корпуса из алюминия штампуют и затем покрывают никелем. При этом могут использоваться две алюминиевые крышки, обеспечивающие доступ к схеме с обеих сторон. Однако использование алюминия создает дополнительные трудности для герметизации и присоединения выводов и требует специальной обработки поверхности, применения особых паяльных флюсов.

Представляется целесообразным использование корпусов из латуни Л-63 ГОСТ 15527-70, ТКЛР которых близок к ТКЛР подложек микросхем, что исключает деформации подложек при нагревании в процессе работы. Латунь является сплавом меди и цинка. Ее плотность близка к плотности меди,

а теплопроводность выше, чем у алюминия. Герметичное соединение крышки и корпуса производится сваркой или пайкой. Так для единичного производства вполне пригодной является пайка, что обеспечивает легкость ремонтных работ. При этом герметизация корпуса производится пайкой крышки по контуру с введением стальной луженой проволоки.

Коробчатые (чашечные) корпуса. Общий вид корпуса изображен на рис. 4.53, где 1 — корпус, 2 — переход высокочастотный, 3 — плата, 4 — резиновая прокладка, 5 — крышка, 6 — трубка (для заполнения инертным газом), 7 — низкочастотный вывод, 8 — проволока. Корпус часто используется в экспериментальных устройствах, так как его легко изготовить фрезерованием, а наличие боковых стенок позволяет располагать на них коаксиальные переходы фланцевой и соосной конструкций. При серийном изготовлении можно использовать литье, штамповку, прессование из пластмассы и металлизацию гальванопластическим или химико-гальваническим способом. Плата в корпусе крепится либо механическим прижимом ее ко дну корпуса с помощью винтов или других элементов (например, верхней крышки при сборке конструкции на СПЛ), либо припайкой металлизированной экранированной стороны платы к дну корпуса

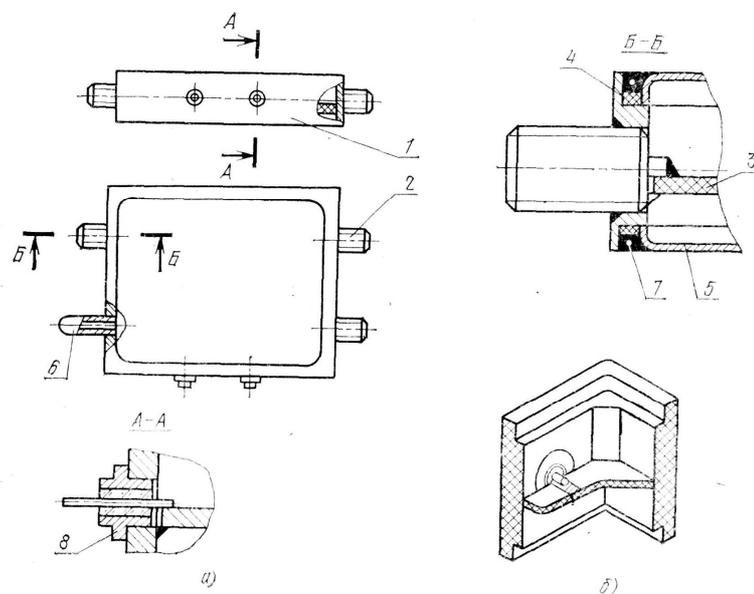


непосредственно или через компенсирующие прокладки из металлической сетки, чтобы снизить напряжения, возникающие из-за разности К.ТЛР).

Герметизация корпуса производится пайкой по контуру крышки и переходов, заливкой щелей компаундами. При использовании пайки (рис. 4.54) предпочтительно выполнять шов с закладкой проволоки (1), что обеспечивает возможность вскрытия корпуса при ремонте, и использовать резиновую прокладку (2), препятствующую попаданию припоя и флюса внутрь корпуса.

Недостатки корпуса: сложность размещения навесных компонентов на экранной стороне платы, сложность припайки платы ко дну корпуса и соответственно смены платы при ремонте.

Рамочные корпуса. Эти корпуса (рис. 4.55) в основном используются в узлах на НПЛ, СПЛ с воздушным заполнением, копланарных и щелевых линиях. Конструкция позволяет осуществить одно- (рис. 4.55, а) и двухъярусное расположение плат. На стенках корпуса удобно располагать фланцевые и вставные коаксиальные переходы, обозначения на рис. 4.55, а: 1 — корпус, 2 — переход высокочастотный, 3 — плата, 4 — резиновая прокладка, 5 — крышка, 6 — трубка, 7 — проволока (для вскрытия блока), 8 — низкочастотный ввод. Корпуса удобны для серийного изготовления, так как при их производстве можно применять высокопроизводительные методы: литье, штамповку, прессовку из пластмассы.

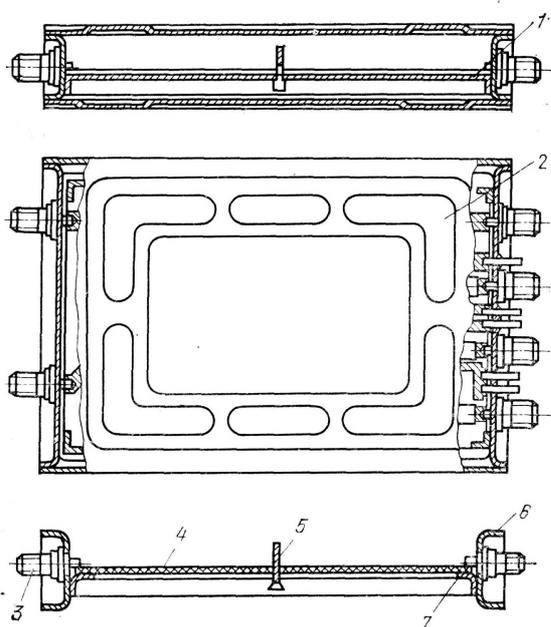


Крепление платы в корпусе проводится установкой ее на уступы вдоль стенок или выступы в углах рамки (рис. 4.55, б) с последующей пайкой по периметру платы. Иногда плата устанавливается на одну из крышек (пьедестал), а затем собирается вся конструкция [4.40]. В этом случае на рамке закрепляют СВЧ соединители. Рамочные корпуса герметизируются аналогично коробчатым, т. е. сваркой или пайкой швов в местах соединения крышек и СВЧ переходов с рамкой. Используются также герметизирующие (уплотнительные) прокладки из мягкого металла, проводящей резины или установка крышек на эпоксидные компаунды

Достоинство корпусов — в их технологичности и дешевизне, простоте сборки, удобстве расположения навесных компонентов с обеих сторон платы относительной легкости смены платы при ремонтных работах. Особенно выделяются простотой установки и смены плат корпуса из металлизированной пластмассы [4.41]. В схемах на НПЛ, можно производить подстройку и проверку до окончательной установки крышек. К недостаткам следует отнести довольно большую (по сравнению с другими типами) протяженность швов, которые необходимо герметизировать.

Пенальные корпуса. Конструкция корпуса изображена на рис 4 56 где 1 — основание корпуса, 2 _ пенал, 3 — переход высокочастотный 4 —

плата 5 — экран, 6 — стенка основания, 7 — поддон. Конструкция позволяет осуществить одно- и двухъярусное расположение плат. Плата предварительно устанавливается на специальное основание, а затем вдвигается в пенал (кожух). Основание крепится к пеналу пайкой, сваркой или механически (на винтах) СВЧ переходы устанавливаются на основание в процессе сборки. Корпуса удобны для серийного производства (табл. 4.15), в качестве пенала могут быть использованы стандартные полноводные трубы (например, сечения 23 X 10, 48 X 24,



3 Твердотельные генераторы шума

Для измерения мощности шумовых сигналов с помощью радиометра полная схема последнего включает в себя стандартный источник напряжения, который может быть подключен вместо антенны и использован для калибровки радиометрического приемника. В качестве таких источников используют генераторы шума, потому что их спектр излучения достаточно полно отображает спектр принимаемого радиотеплового излучения. Поэтому при использовании генераторов шума форма частотной характеристики радиометрического приемника не влияет на результаты измерений [83].

Встроенный генератор шума, предназначенный для калибровки усиления приемного тракта, выполнен на базе полупроводникового широкополосного шумового генератора.

Процедура калибровки радиометра является неотъемлемой частью каждого наблюдения. Процедура калибровки должна удовлетворять двум противоречивым требованиям. С одной стороны, длительность калибровочного сигнала (ступеньки) должна быть достаточно большой для обеспечения достоверной оценки уровня калибровки, т.е. усиления канала. С другой стороны, увеличение длительности калибровки повышает вероятность проявления импульсных помех и тренда.

Калибровка радиометрической системы осуществлялась по внутреннему полупроводниковому генератору шума.

Процедура калибровки радиометрической системы выполнялась для установления однозначного соответствия между измеряемой радиояркой температурой исследуемого объекта и выходным сигналом радиометрического приемника. Обычно калибровку радиометрической системы проводят отдельно для антенны и для радиометрического приемника.

В результате калибровки антенной системы необходимо определить основные параметры антенно-волноводного тракта (коэффициент рассеяния антенны β и КПД антенно-волноводного тракта η). На величину этих пара-

метров оказывает влияние изменение проводимости материала зеркала антенны (особенно на величину η), влияние конструкции опорно-поворотного устройства, несущего радиометрическую систему (на величину β) [75].

Генерируемая шумовая мощность достигает 33 дБ относительно kT_0 , что позволяет включать генератор шума в тракт сигнала через направленный ответвитель с большим переходным затуханием (примерно 20 дБ). Основные технические характеристики внутреннего генератора шума приведены в таблице 3.1.



Рисунок 3.1 – Генераторы шума на ЛПД в волноводном и коаксиальном исполнении

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики полупроводниковых ГШ

Обозначение наз. литера	Рабочий диапазон частот, ГГц	Уровень СПМШ (относительное Ктo), ДБ		Неравномерность уровня СПМШ			Рабочий ток, мА	Напряжение питания, В (при измерении температуры от -60° С до 85° С)	Конструкция вывода энергии	Обозначение габаритного чертежа
		Не менее	Не более	в диапазоне частот каждого литеры, ДБ не более	в полосе частот шириной 1 ГГц, не более	в полосе частот шириной 0,2 ГГц не более				
1	0,484-8,150	30		±2,5	±1,0	±0,5	от 10 до 30	от 15 до 40	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.085 ГЧ
2	8,05-12,42	25		±2,5	±1,0	±0,5	от 20 до 50	от 20 до 60	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.085 ГЧ
3	8,05-12,42	33		±3,0	±1,5	±1,0	от 10 до 30	от 20 до 60	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.085 ГЧ
4	11,71-15,05, 15,00-17,85	33		±2,5	±1,5	±1,0	от 20 до 50	от 20 до 60	Волноводным сечением 16x8	3.329.086 ГЧ
5	2,5-4,5	34		±0,8		±0,5	от 5 до 15	от 15 до 30	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.085 ГЧ
6	7,0-9,0	36	40	±10		±0,5	от 10 до 20	от 15 до 40	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.085 ГЧ
7	3,87-5,64	36	40	±1,5	±1,0	±0,5	от 10 до 20	от 20 до 50	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.025 ГЧ
8	0,01-4,0	30		±2,5	±1,0	±0,5	от 15 до 30	от 20 до 60	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.085 ГЧ
9	12-16,5	33		±2,0	±1,0	±0,5	от 20 до 52	от 20 до 60	волноводным сечением 16x8	3.329.086 ГЧ
10	7,4-8,8	34	40	±1,0		±0,5	от 8 до 16	от 20 до 40	волноводным сечением 12,6x28,5	3.329.109 ГЧ
11	7,4-9,2	34	40	±2,0		±1,0	от 8 до 18	от 30 до 40	волноводным сечением 12,6x28,5	3.329.109 ГЧ
12	0,1-1,5	24					от 10 до 30	от 30 до 40	Коаксиальным сечением 7,00/3,04	3.329.98ГЧ

4 Выбор схемы гетеродина

Проблема создания многофункциональной, высоконадежной, экономичной и малогабаритной аппаратуры решается в настоящее время путем миниатюризации применяемых активных приборов и колебательных систем на основе использования полупроводниковых приборов и интегральных схем. До недавнего времени прогресс в указанном направлении целиком и полностью определялся уровнем развития технологии изготовления транзисторов. В последние годы здесь получены большие достижения: современные биполярные СВЧ транзисторы обладают максимальной частотой генерации порядка 10 ГГц, обеспечивая на частотах 4-5 ГГц выходную мощность в непрерывном режиме порядка 5 и 100 Вт на частотах около 1 ГГц. Полевые транзисторы могут работать на частотах выше 10-17 ГГц с выходной мощностью несколько ватт и коэффициентом усиления около 3 дБ. Однако появившиеся в конце 60-х годов полупроводниковые генераторные диоды СВЧ составили серьезную конкуренцию транзисторам, и в настоящее время, благодаря успехам современной технологии, значительно превосшли их по ряду важнейших показателей.

По сравнению с транзисторами генераторные диоды СВЧ обладают существенными преимуществами по максимальной частоте генерации, выходной мощности на частотах выше 5 ГГц, надежности, технологичности и массогабаритным характеристикам. Новые приборы выделены в отдельный класс электронных приборов - полупроводниковые генераторные диоды СВЧ или диоды с отрицательным сопротивлением. К ним относятся лавинно-пролетные диоды (ЛПД), называемые в иностранной литературе IMPATT диоды; диоды с междолийным переносом электронов (МПД), называемые иногда диодами с переносом электронов, или диодами Ганна; лавинно-ключевые диоды (ЛКД), известные чаще как TRAPATT диоды [5]. Отечественные диоды серийного изготовления работают в диапазоне частот 4-100 ГГц, обеспечивают выходную мощность 0.1- 4 Вт в сантиметровом диапазо-

не. В качестве гетеродинов в сантиметровом диапазоне используют полупроводниковые маломощные генераторы СВЧ [9].

Полупроводниковый гетеродин состоит из СВЧ колебательной системы (резонатора или системы резонаторов в виде микрополоскового устройства) и активного полупроводникового элемента, в качестве которого используют полупроводниковый СВЧ диод. Для работы такого гетеродина к нему достаточно подвести постоянное напряжение, не превосходящее нескольких десятков вольт. Полупроводниковые гетеродины отличаются экономичностью питания, весьма малыми габаритами и массой, большой долговечностью и наиболее удобны для создания СВЧ устройств.

Основные требования, которым должен удовлетворять ЛПД составляют: требуемая частота генерации (в данном случае 9-10ГГц); мощность, не менее 60мВт и конструктивное исполнение (полосковое исполнение). В качестве генераторных диодов выбираем диоды СВЧ 3А707И. Это арсенидогаллиевые диоды с барьером Шоттки, лавинно-пролетные, генераторные, предназначены для применения в генераторах сантиметрового диапазона длин волн. Выпускаются в металлокерамическом корпусе с жесткими выводами.

Таблица 4.1 Диоды СВЧ генераторные

Тип элемента	$f_{p \text{ min}}$, ГГц	$f_{p \text{ max}}$, ГГц	$P_{\text{вых min}}$, мВт ($P_{\text{вых min imp}}$)	$I_{p \text{ max}}$, А ($I_{p \text{ max imp}}$)	$U_{\text{пр min}}$, В	$U_{\text{пр max}}$, В ($U_{\text{пр max imp}}$)	r_{min} , Ом	r_{max} , Ом	$C_{\text{д max}}$, пФ	$L_{\text{п max}}$, нГн	T, °C
2A717A-4	31.0	37.5	90	0.25	20	30		<90	1.0	0.12	-60...+70
2A717B-4	37.5	52	90	0.25	16	25		<90	1.0	0.12	-60...+70
2A717B-4	31.0	37.5	150	0.25	20	30		<90	1.0	0.12	-60...+70
2A717Г-4	37.5	52	150	0.25	16	25		<90	1.0	0.12	-60...+70
2A752A-4	68	72	(3500)	(4.0)	10	25					-60...+85
2A752Б-4	72	76	(3500)	(4.0)	10	25					-60...+85
2A752В-4	76	79	(3500)	(4.0)	10	25					-60...+85
2A752Г-4	68	79	(3500)	(4.0)	10	25					-60...+85
2A756A-4	85	90	60	0.25	9	20					-60...+70
2A756Б-4	90	95	60	0.25	9	20					-60...+70
2A756В-4	95	100	60	0.25	9	20					-60...+70
2A757A-4	69	73	200	0.25	16	26			1.3	0.4	-60...+70
2A757Б-4	73	77	200	0.25	16	26			1.3	0.4	-60...+70

2A757B-4	77	78	200	0.25	16	26			1.3	0.4	-60...+70
2A757Г-4	69	73	150	0.25	16	26			1.3	0.4	-60...+70
2A757Д-4	73	77	150	0.25	16	26			1.3	0.4	-60...+70
2A757E-4	77	78	150	0.25	16	26			1.3	0.4	-60...+70
2A758A-4	54	58	4000	0.2	20	30			1.45	0.5	-60...+70
2A758Б-4	58	62	4000	0.2	20	30			1.45	0.5	-60...+70
2A758B-4	62	66	4000	0.2	20	30			1.45	0.5	-60...+70
2A765A-4	54	58	(5000)	(15)	18	40		<16	14.7 5	0.6	-60...+85
2A765Б-4	58	62	(5000)	(15)	18	40		<16	14.7 5	0.6	-60...+85
2A765B-4	62	68	(5000)	(15)	18	40		<16	14.7 5	0.6	-60...+85
2A765Г-4	54	68	(5000)	(15)	18	40		<16	44.7 5	0.6	-60...+85
2A766A-4	88	92	(2000)	(3.0)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766Б-4	92	96	(2000)	(3.0)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766B-4	96	100	(2000)	(3.0)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766Г-4	88	92	(5000)	(7.5)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766Д-4	92	96	(5000)	(7.5)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766E-4	96	100	(5000)	(7.5)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766Ж-4	88	92	(10000)	(12)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766И-4	92	96	(10000)	(12)	(10)	(30)		<16	3.0	0.5	-60...+70
2A766K-4	96	100	(10000)	(12)	(10)	(30)			3.0	0.5	-60...+70
2A766Л-4	88	92	(10000)	(15)	(10)	(30)			3.0	0.5	-60...+70
2A766M-4	92	96	(10000)	(15)	(10)	(30)			3.0	0.5	-60...+70
2A766H-4	96	100	(10000)	(15)	(10)	(30)			3.0	0.5	-60...+70
3A715A	8.0	9.5	100	1.2	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715Б	8.0	9.5	200	1.3	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715B	9.0	10.5	100	1.2	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715Г	9.0	10.5	200	1.3	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715Π	9.0	9.5	280	1.5	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715Д	9.0	10.5	300	1.5	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715E	10	11.5	100	1.2	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715Ж	10	11.5	200	1.3	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715И	10	11.5	300	1.5	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715K	11	12.5	100	1.2	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715Л	11	12.5	200	1.3	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A715M	11	12.5	300	1.5	9.5	10.5	0.6	2.5	0.5	0.5	-60...+70
3A716A	18	20	150	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716Б	18	20	250	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716B	20	22	150	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716Г	20	22	250	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716Д	22	24	150	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716E	22	24	250	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716Ж	24	26	150	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A716И	24	26	250	2.0		<6.4	0.29	0.9	0.5	0.5	-60...+70
3A719A	17.4	25.95	8000	1.2		<6.4	0.4	5.0			-60...+70
3A720A	25.86	39.6	6500	1.3		<4.2	0.32	3.8			-60...+70
3A721A	3.86	5.96	6500	0.37		<13	3	15			-60...+70
3A721AM	3.86	5.96	6500	0.37		<13	3	15			-60...+70

3A722A	5.6	8.24	6500	0.37		<12	3	15				-60...+70
3A722AM	5.6	8.24	6500	0.37		<12	3	15				-60...+70
3A723A	8.15	12.42	6500	0.4		<10	2.5	11				-60...+70
3A723AM	8.10	12.42	6500	0.4		<10	2.5	11				-60...+70
3A744Б1-6	25.95	37.5	70	1.5	2.5	4.5	0.2	3.0	0.35	0.3		-60...+70
3A744Б-6	25.95	37.5	70	1.5	2.5	4.5	0.2	3.0	0.35	0.3		-60...+70
3A745A	17	21	1000	0.24	32	47			1.2	0.1		-60...+85
3A745Б	17	21	1400	0.30	32	47			1.4	0.1		-60...+85
3A745B	21	24	1000	0.30	27	42			1.4	0.1		-60...+85
3A746A-6	12.0	13.5	200	2.0	5	8	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746Б-6	13.5	15.0	200	2.0	5	8	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746B-6	15.0	16.7	200	2.0	5	8	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746Г-6	12.0	13.5	300	2.0	5	8	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746Д-6	13.5	15.0	300	2.0	5	8	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746E-6	15.0	16.7	300	2.0	5	8	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746Ж-6	16.7	18.0	200	2.0	4	7	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A746И-6	16.7	18.0	300	2.0	4	7	0.3	2.5	0.45	0.4		-60...+70
3A747A	100	110	6.9	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A747Б	110	120	6.3	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A747B	120	130	1.7	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A747Г	130	140	1.3	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A747Д	140	150	1.2	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A747E	100	102	13	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A747Ж	120	122	6.3	2.0	2.2	5.0	0.2	2.0	0.7	0.15		-60...+70
3A748A	11.5	13.5	3000	0.50	20	45			2.0	0.1		-60...+85
3A748Б	11.5	13.5	4000	0.50	20	45			2.0	0.1		-60...+85
3A748B	13.5	15.0	3000	0.50	18	40			2.3	0.1		-60...+85
3A748Г	13.5	15.0	4000	0.50	18	40			2.3	0.1		-60...+85
3A748Д	15	17	2500	0.55	15	38			2.3	0.1		-60...+85
3A748E	15	17	3200	0.60	15	38			2.3	0.1		-60...+85
3A748Ж	17	21	2000	0.60	12	33			2.5	0.1		-60...+85
3A748И	21	24	2000	0.60	12	33			2.5	0.1		-60...+85
3A753A	5.64	5.8	180	0.32	11	15	3	8				-60...+85
3A753Б	5.8	6.0	180	0.32	11	15	3	8				-60...+85
3A753B	6.0	6.2	180	0.32	11	15	3	8				-60...+85
3A753Г	6.2	6.4	180	0.32	11	15	3	8				-60...+85
3A753Д	6.4	6.6	180	0.32	11	15	3	8				-60...+85
3A761A	25.95	29.33	470	1.45	4.5	5.5	0.3	1.6				-60...+70
3A761Б	29.33	33.33	450	1.45	4.0	5.0	0.3	1.6				-60...+70
3A761B	33.33	37.5	400	1.45	3.5	5.0	0.3	1.6				-60...+70
3A762A	8.24	8.5	(40000)	(25)	(60)	(120)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762Б	8.5	8.9	(40000)	(25)	(60)	(120)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762B	8.9	9.3	(40000)	(25)	(60)	(100)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762Г	9.3	9.7	(40000)	(25)	(60)	(120)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762Д	9.7	10.1	(40000)	(25)	(60)	(120)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762E	10.1	10.5	(40000)	(25)	(60)	(100)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762Ж	10.5	10.9	(40000)	(25)	(60)	(100)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762И	10.9	11.3	(40000)	(25)	(60)	(100)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762K	11.3	11.7	(40000)	(25)	(60)	(100)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A762Л	11.7	12.05	(40000)	(25)	(60)	(100)	0.2	0.5	1.2	0.5		-60...+85
3A763A	37	38	300	1.5	3	5	0.2	1.5				-60...+70

3A763Б	38	40	260	1.5	3	5	0.2	1.5				-60...+70
3A763В	40	42	230	1.5	3	4.5	0.2	1.5				-60...+70
3A763Г	42	47	150	1.5	3	4.5	0.2	1.5				-60...+70
3A763Д	47	50	150	1.5	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A763Е	50	52.6	90	1.5	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A763Ж	52.6	56	90	1.5	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A763И	56	60	80	1.3	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A763К	60	70	60	1.3	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A763Л	70	78.3	50	1.3	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A763М	37.5	53.57	50	1.3	3	6	0.2	1.5				-60...+70
3A764А	25.95	37.5	120	1.45	2.5	5.5	0.3	1.6				-60...+70
3A764Б	25.95	37.5	75	1.45	2.5	5.5	0.3	1.6				-60...+70
AA715А	8.0	9.5	100	1.2		<10.5	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70
AA715Б	8.0	9.5	200	1.3		<10.5	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70
AA715В	9.0	10.5	100	1.2		<10.5	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70
AA715Г	9.0	10.5	200	1.3		<10.5	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70
AA715Д	9.0	10.5	300	1.5		<10.5	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70
AA715Е	10	11.5	100	1.2		<10	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70
AA715Ж	10	11.5	200	1.3		<10	0.6	2.5	0.5	0.5		-60...+70

5 Выбор конструкции переключателя

Коммутационные управляемые устройства СВЧ - это многополюсники с дискретно изменяемыми величинами внутренних связей между каналами. Коммутационные управляемые устройства СВЧ на полупроводниковых диодах начали применяться в 60-е годы XX века. Их развитие было обусловлено широким внедрением в СВЧ технику новых полупроводниковых приборов - р-і-п- диодов, обладающих уникальными во многих отношениях свойствами [8].

В настоящее время при малом и среднем уровнях мощности коммутационные полупроводниковые устройства СВЧ вытеснили практически все другие типы управляемых коммутационных устройств. Малые размеры полупроводниковых диодов и удобство их совмещения с микрополосковыми линиями создали чрезвычайно благоприятные условия для разработки полупроводниковых коммутационных устройств в гибридно-интегральном исполнении. Именно в таком виде будет реализована конструкция переключателя. Параметры практически используемых коммутационных полупроводниковых устройств имеют следующие значения: потери пропускания 0,2 - 2 дБ при потерях замирания 20 - 80 дБ соответственно; время переключения от единиц наносекунд в коммутаторах малого уровня мощности до единиц микросекунд в коммутаторах высокого уровня мощности).

В качестве схемы переключателя применим схему с последовательно включенным диодом. Поскольку она нашла широкое применение в микрополосковых переключателях малого уровня мощности. Данная схема обладает приемлемыми потерями пропускания, а использование в ней диодов с малой емкостью позволяет получить хорошее развязывающее действие.

В качестве управляемых элементов выбираем диоды, с наименьшей емкостью, а именно диоды 2A533A-3. К ним относятся кремниевые диоды, планарные, поверхностно - ориентированные, переключательные. Рабочим элементом диода является полупроводниковая структура типа р-і-п. Данные

диоды предназначены для применения в переключающих устройствах, модуляторах и аттенюаторах СВЧ - диапазона в составе гибридных интегральных микросхем, Выпускаются в бескорпусном исполнении, с гибкими балочными выводами

Таблица 5.1 - Диоды СВЧ переключаательные

Тип элемента	Структура	$f_{кр\ min}$, ГГц	$P_{свч\ max}$, МВт ($P_{свч\ max\ нпр}$)	$I_{пр\ max}$, МА ($I_{пр\ max\ нпр}$)	$I_{обр\ max}$, МА ($I_{обр\ max\ нпр}$)	$U_{пр\ max}$, В	$U_{обр\ max}$, В ($U_{обр\ max}$)	$U_{проб\ min}$, В	$Q_{нк\ max}$, НКЛ	r_n , Ом	C_d , пФ	$T, ^\circ C$
2A507A	PIN	200	5.0	200			200	500	200	1.5	1.2	-60...+100
2A507Б	PIN	200	5.0	200			200	300	200	1.5	1.2	-60...+100
2A509A	PIN	150	2.0	100			150	200	25	1.5	1.2	-60...+100
2A509Б	PIN	150	2.0	100			150	200	25	1.5	1.0	-60...+100
2A515A	PIN	100	0.5	100			75	100	15	2.5	0.7	-60...+125
2A516A1-5	PIN	70	1.0	100			200			5.5	0.18	-60...+125
2A518A-4	PIN	130	(2000)	500			200	400	200	1.0	0.8	-60...+125
2A518Б-4	PIN	90	(2000)	500			200	400	200	2.0	0.8	-60...+125
2A520A	PIN	200	4.0	200			300	800	300	2.0	1.0	-60...+125
2A522A-5	PIN	30	0.3	100			5	7	10	12	0.6	-60...+125
2A523A-4	PIN	200	20	1000	4.0	1.2	500	700	220	0.5	1.5	-60...+125
2A523Б-4	PIN	200	20	1000	4.0	1.2	600	800	220	0.5	2.0	-60...+125
2A524A-4	PIN	200	(3000)	1000	10	1.18	400	600	400	0.5	1.2	-60...+125
2A524Б-4	PIN	200	(3000)	1000	10	1.18	300	500	400	0.5	0.8	-60...+125
2A526A-5	PIN	35	0.1	100			40	45	30	2.5	0.1	-60...+125
2A528A-4	PIN	200	50	500	2.0	1.05	250	1000	900	0.5	2.4	-60...+125
2A528Б-4	PIN	200	50	500	2.0	1.05	250	1000	900	0.5	3.0	-60...+125
2A532A-5	PIN	300	7.0	200		1.1	150	300	250	1.0	0.9	-60...+125
2A533A-3	PIN	100	0.1	100			50	70	15	6.0	0.05	-60...+100
2A536A-5	PIN	300	1.0	150			150	300	150	1.5	8.16	-60...+85
2A536A-6	PIN	300	1.0	150			150	300	150	1.5	0.16	-60...+85
2A536Б-5	PIN	300	1.0	150			150	300	150	1.5	0.20	-60...+85
2A536Б-6	PIN	300	1.0	150			150	300	150	1.5	0.20	-60...+85
2A537A	PIN	200	20	500			300	600	1000	0.5	3.0	-60...+125

2A541A-6	PIN	400	0.5	150			150	300	150	1.3	0.22	-60...+125
2A541B-6	PIN	400	0.5	150			150	300	150	1.3	0.25	-60...+125
2A542A1	PIN	250	4.0	200		1.8	400	1100	400	1.7	1.0	-60...+125
2A543A-5	PIN	300	0.5	30	25	0.9	50	100	3.0	1.5	0.19	-60...+125
2A543A-6	PIN	300	0.5	30	25	0.9	50	100	3.0	1.5	0.19	-60...+125
2A543B-6	PIN	300	0.5	30	25	0.9	50	100	3.0	1.5	0.22	-60...+125
2A546A-5	PIN	300	2.5	150	10	1.18	150	300	200	1.5	0.2	-60...+125
2A546A-6	PIN	300	2.5	150	10	1.18	150	300	200	1.5	0.2	-60...+125
2A547A-3	PIN	300	0.2	20	9	0.9	30	50	0.2	3.0	0.12	-60...+125
2A547B-3	PIN	300	0.2	20	9	0.9	30	50	0.2	3.0	0.20	-60...+125
2A547B-3	PIN	300	0.2	20	9	0.9	30	50	0.3	3.0	0.12	-60...+125
2A547Г-3	PIN	300	0.2	20	9	0.9	30	50	0.3	3.0	0.20	-60...+125
2A547Д-3	PIN	300	0.2	20	9	0.9	30	50	0.4	3.0	0.25	-60...+125
2A547E-3	PIN	300	0.2	20	9	0.9	30	50	0.4	3.0	0.12	-60...+125
2A550A-5	PIN	300	5.0	500	(0.5)	1.1	40	100	1.0	4.7	0.6	-60...+125
2A551A-3	PIN	300	0.5	50	5.0	0.9	30	50	0.2	3.0	0.12	-60...+125
2A551B-3	PIN	300	0.5	50	5.0	0.9	30	50	0.2	3.0	0.20	-60...+125
2A551B-3	PIN	300	0.5	50	5.0	0.9	30	50	0.3	3.0	0.12	-60...+125
2A551Г-3	PIN	300	0.5	50	5.0	0.9	30	50	0.3	3.0	0.20	-60...+125
2A554A-5	PIN	250	2.5	40		1.0	50	150		2.0	0.05	-60...+125
2A554A-6	PIN	250	1.5	40		1.0	50	150		2.0	0.08	-60...+125
2A555A	PIN	4.5	17	500			400	700	1500	0.5	3.0	-60...+125
2A555A1	PIN	4.5	17	500			400	700	1500	0.5	3.0	-60...+125
2A555A2	PIN	4.5	12.5	500			400	700		0.3	3.0	-60...+125
2A555A3	PIN	4.5	12.5	500			400	700		0.3	3.0	-60...+125
2A555B	PIN	4.5	17	500			800	1200	1500	0.5	3.0	-60...+125
2A555B1	PIN	4.5	17	500			800	1200	1500	0.5	3.0	-60...+125
2A556A1-5	PIN	350	0.5	150	10	1.05	100	200	0.02	2.5	0.06	-60...+125
2A556A-5	PIN	350	0.5	150	10	1.05	100	200	0.02	2.5	0.14	-60...+125
2A558A1-3	PIN	40	0.5	50	10	0.95	25	55	0.2	3.0	0.14	-60...+125
2A558A-3	PIN	40	0.5	50	10	0.95	25	55	0.2	3.0	0.20	-60...+125
2A558B1-3	PIN	40	0.5	50	10	0.95	25	55	0.2	2.3	0.20	-60...+125
2A558B-3	PIN	40	0.5	50	10	0.95	25	55	0.2	2.3	0.2	-60...+125
2A560A-3	PIN	3.0	3.75	300		1.0	25	55		1.5	0.15	-60...+125

2A561A-3	PIN	4.0	0.17	50	5.0	0.9	10	24		3.0	0.75	-60...+125
3A530A	БШ			10	5.0	1.0	30				0.75	-60...+85
3A530Б	БШ			10	5.0	1.2	30				0.75	-60...+85
3A531A-6	БШ	150	0,05	30			10	12	3.0	30	0.2	-60...+125
3A538A	БШ	25		2.0	0.75	1.0	9.0			60	0.17	-60...+85
3A538A1	БШ	25		2.0	0.75	1.0	9.0			60	0.17	-60...+85
3A538AP	БШ	25		2.0	0.75	1.0	9.0			60	0.17	-60...+85
3A539A	БШ			10	2.0	1.0	30				0.6	-60...+85
AA529A	БШ		(0.005)	(5.0)	1.0	0.9	(7.0)				0.40	-60...+85
AA529Б	БШ		(0.005)	(5.0)	1.0	0.9	(7.0)				0.25	-60...+85
AA530A	БШ			10	5.0	1.0	30				1.0	-60...+85
AA530Б	БШ			10	5.0	1.2	30				0.75	-60...+85
AA538A	БШ	25		2.0	0.75	1.0	9.0				0.17	-60...+85
KA507A	PIN	200	5.0	200			200	500	200	1.5	1.2	-60...+100
KA507Б	PIN	200	5.0	200			200	300	200	1.5	1.2	-60...+100
KA507B	PIN	150	5.0	200			200	300	200	2.5	1.2	-60...+100
KA509A	PIN	150	2.0	100			150	200	25	1.5	1.2	-60...+100
KA509Б	PIN	150	2.0	100			150	200	25	1.5	1.0	-60...+100
KA509B	PIN	100	2.0	100			150	200	35	2.5	1.2	-60...+100
KA515A	PIN	100	0.5	100			75	100	15	2.5	0.7	-60...+125
KA517A-2	PIN	75	0.5	100			150	300	25	5.0	0.3	-60...+125
KA517Б-2	PIN	75	0.5	100			150	300	25	5.0	0.4	-60...+125
KA520A	PIN	200	4.0	200			300	800	300	2.0	1.0	-60...+125
KA520Б	PIN	200	4.0	200			300	800	300	2.0	1.0	-60...+125
KA536A-5	PIN	300	1.0	150			150	300	150	1.5	0.16	-60...+85
KA536B-5	PIN	300	1.0	150			50	100	150	1.5	0.25	-60...+85
KA536B-6	PIN	300	1.0	150			50	100	150	1.5	0.25	-60...+85
KA537A	PIN	200	20	500			300	600	1000	0.5	3.0	-60...+125
KA537Б	PIN	100	20	500			150	300	1500	1.0	3.0	-60...+125
KA541A-6	PIN	400	0.5	150			150	300	150	1.3	0.22	-60...+125
KA543A-5	PIN	300	0.5	30	25	0.9	50	100	3.0	1.5	0.19	-60...+125
KA543A-6	PIN	300	0.5	30	25	0.9	50	100	3.0	1.5	0.19	-60...+125
KA546A-5	PIN	300	2.5	150	10	1.18	150	300	200	1.5	0.2	-60...+125
KA546A-6	PIN	300	2.5	150	10	1.18	150	300	200	1.5	0.2	-60...+125

6 Выбор конструкции смесителя

Смеситель (преобразователь частоты) является одним из важнейших узлов радиометрического приемника. Специфичным требованием, предъявляемым к смесителям многоканальных приемных устройств, является обеспечение высокой идентичности их параметров (коэффициента передачи и фазочастотных характеристик), что практически определяет вариант гибридно-интегрального исполнения [10].

В смесителе принимаемый СВЧ сигнал преобразуется в сигнал промежуточной частоты, при этом диод используется в качестве нелинейного активного сопротивления. Диод помещается в специальную смесительную секцию, к которой подводят мощности сигнала и гетеродина, и соединяют его с входной цепью УПЧ, служащей нагрузкой диода на промежуточной частоте.

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к электрическим параметрам смесителей СВЧ, являются: минимальный коэффициент шума и достаточная полоса частот.

Лучшими характеристиками обладают балансные смесители (БС), имеющие на входе балансное соединение. В таких смесителях развязка гетеродин-сигнал, гетеродин - ПЧ обеспечивается за счет баланса моста, подбора идентичных диодов и их согласования. В схемах БС используются подобранные пары разнополярных диодов с малым разбросом параметров в паре. Это необходимо для получения коэффициента подавления шумов гетеродина больше 20 дВ.

Для данной схемы БС выбираем смесительные диоды 3А117БР-6 арсенидогаллиевые, планарно-эпитаксиальные, с барьером Шоттки. Предназначены для применения в преобразователях частоты сантиметрового диапазона длин волн в составе гибридных интегральных микросхем и микросборок. Выпускаются в бескорпусном исполнении с жесткими выводами на кристаллодержателе.

Таблица 6.1 - Диоды СВЧ смесительные

Тип элемента	$f_{p \text{ min}}$, ГГц	$f_{p \text{ max}}$, ГГц	$P_{\text{свч max}}$, мВт ($P_{\text{свч max imp}}$)	$I_{\text{вы max}}$, мА	$U_{\text{пр max}}$, мА	$\Gamma_{\text{вых min}}$, Ом	$\Gamma_{\text{вых max}}$, Ом	$L_{\text{ПРБ max}}$, Дб	$F_{\text{норм max}}$, Дб	$K_{\text{ст}} U_{\text{max}}$	T, C°
2A116A-1	0,3	30	150	1,6	0,45	250	450	5,5	7,0		-60...+125
2A116AG-1	0,3	30	150	1,6	0,45	250	450	5,5	7,0		-60...+125
2A116AP-1	0,3	30	150	1,6	0,45	250	450	5,5	7,0		-60...+125
2A118A-6	1,0	18	50	2,0	0,5	200	440	6,0	7,5	2,0	-60...+125
2A118AP-6	1,0	18	50	2,0	0,5	200	440	6,0	7,5	2,0	-60...+125
2A120A	0,3	18	50	2,5	0,4	200	500	5,5	7,0	1,8	-60...+125
2A120AG	0,3	18	50	2,5	0,4	200	500	5,5	7,0	1,8	-60...+125
2A120AP	0,3	18	50	2,5	0,4	200	500	5,5	7,0	1,8	-60...+125
2A125A-3	0,3	18	20	1,9	0,5	220	380	6,3	7,5	2,5	-60...+125
3A110A	0,15		50	2,5		200	500	6,5	8,0	2,0	-60...+125
3A110AP	0,15		50	2,5		200	500	6,5	8,0	2,0	-60...+125
3A110Б	0,15		50	2,5		210	490	6,0	7,5	1,6	-60...+125
3A110БР	0,15		50	2,5		210	490	6,0	7,5	1,6	-60...+125
3A111A	0,1		50	2,5		300	560	6,0	7,5	1,5	-60...+125
3A111AP	0,1		50	2,5		300	560	6,0	7,5	1,5	-60...+125
3A111Б	0,1		50	2,5		300	560	5,5	7,0	1,5	-60...+125
3A111БР	0,1		50	2,5		300	560	5,5	7,5	1,5	-60...+125
3A117A-6	0,75	1,0	25	2,2		220	480	5,0	6,0	2,0	-60...+125
3A117AP-6	0,75	1,0	25	2,2		220	480	5,0	6,0	2,0	-60...+125
3A117Б6	0,75	1,0	30	2,2		200	500	5,5	7,0	2,0	-60...+125
3A117БР-6	0,75	1,0	30	2,2		220	500	5,5	7,0	2,0	-60...+125
3A119A-6		<15	25	2,0	0,8	200	500	6,0	7,5	2,0	-60...+125
3A119AG-6		<15	25	2,0	0,8	200	500	6,0	7,5	2,0	-60...+125
3A119AP-6		<15	25	2,0	0,8	200	500	6,0	7,5	2,0	-60...+125
3A129A	80	120	7	2,4	1,25	180	700	6,5	8,5	3,0	-60...+85
3A129Б	80	120	7	2,4	1,25	180	700	7,5	9,5	3,0	-60...+85
3A130AC-3		<30	40	2,3	0,8			5,8	7,0	2,0	-60...+125
3A130BC-3		<30	40	2,3	0,8			6,0	8,0	2,0	-60...+125
3A131A-3		<18	100	1,9	0,5	220	380	6,3	7,5	2,0	-60...+125
3A134A-6	2	4	100	2,1	0,8	180	220	4,5	7,0		-60...+125
3A134AG-6	2	4	100	2,1	0,8	180	220	4,5	7,0		-60...+125
3A134AP-6	2	4	100	2,1	0,8	220	300	4,5	7,0		-60...+125
3A135A-3	0,3	30	300		0,95	180	300	5,5	7,5		-60...+125
3Ф135Б3	0,3	30	300		0,95	180	300	5,5	8,5		-60...+125
3A136A		150	100	1,7	1,25	200	600	5,5	7,5	2,5	-60...+125
3A136Б		150	100	1,7	1,25	200	600	5,0	6,5	2,5	-60...+125
3A138A-3	0,3	30	20	1,15		250	700	5,5	7,0	2,5	-60...+125
3A138Б-3	0,3	30	15	0,8		150	600	8,0	10	3,0	-60...+125
3A139AC-4		<3.0	150		0,43	220	400	6,5	6,0	2,5	-60...+125
3A139BC-4		<3.0	150		0,45	220	400	6,5	6,0	2,5	-60...+125
3A140A-3		<3.0	50	10	0,8			5,5	6,5	3,0	-60...+125

3A140Б-3		<3.0	50	10	0,8			6,5	7,5	3,0	-60...+125
3A141A	30	178	50	3,2	0,95	100	500	7,5	9,5	2,5	-60...+125
3A143AC-3		<300	30	2,0	0,8	180	400	6,0	6,5		-60...+125
3A143BC-3		<300	20	2,0	0,85	220	500	6,0	7,0		-60...+125
3A143BC-3		<300	15	2,5	0,9	220	500	6,0	7,0		-60...+125
3AC127A-4	0,3	12	150		0,75	40	120	4,5	6,5	3,5	-60...+125
3AC127Б-4	0,3	12	150		0,75	40	120	4,5	6,5	3,5	-60...+125
AA112A	0,1		20	2,5		440	640	6,0	8,5	1,3	-60...+100
AA112Б	0,1		20	2,5		440	640	6,0	8,5	1,8	-60...+100
AA121A		40	15	1,4	1,2	200	600	8,0	9,0	3,0	-60...+85
AA123A		80	10	2,0	1,3	180	600	5,5	7,0	3,0	-60...+85
AA123Б		80	10	2,0	1,3	180	600	6,0	7,5	3,0	-60...+85
AA129A	80	120	7	2,4	1,25	180	700	6,5	8,5	3,0	-60...+85
AA129Б	80	120	7	2,4	1,25	180	700	7,5	9,5	3,0	-60...+85
KA132A	0,3	12	100	1,5	0,5	550	700	5,5	10	1,6	-60...+125
KA132A-Б			100	1,5	0,5			5,5	14	1,6	-60...+125
KA132Б	0,3	12	100	1,5	0,5	550	700	5,0	14	1,6	-60...+125
KA132Б-5			100	1,5	0,5			5,0	14	1,6	-60...+125

7 Усилители промежуточной частоты

Основное назначение усилителей промежуточной частоты (УПЧ) – это усиление сигналов в заданной полосе частот и ослабление помех за пределами указанной полосы, т. е. осуществление частотной избирательности по соседнему каналу. На вход УПЧ поступают сигналы промежуточной частоты с выхода преобразователя. Промежуточная частота, как правило, постоянна и УПЧ не перестраиваются, что позволяет использовать в них сложные резонансные системы и получать резонансные характеристики необходимой формы.

Так как промежуточная частота в большинстве случаев значительно меньше частоты принимаемых сигналов, то в УПЧ легче, чем в УВЧ получить большое усиление и высокую избирательность по соседнему каналу. Поэтому в радиометрических приемниках основное усиление и основная избирательность по соседнему каналу осуществляются в УПЧ [11].

К схеме усилителя промежуточной частоты предъявляются следующие основные требования:

- минимальный коэффициент шума;
- необходимая полоса пропускания;
- высокий коэффициент усиления.

Поскольку практическая реализация УПЧ достаточно затруднительна, что объясняется повышенными требованиями к его параметрам (коэффициенту усиления и коэффициенту шума), то УПЧ возможно реализовать на основе покупных микросхем МШУ СВЧ в наибольшей степени удовлетворяющих параметрам технического задания.

Таблица 7.1 - Малошумящие транзисторные усилители для диапазона частот 0.8-12.0 ГГц

Параметры	Серия						
	СКУТ1102	СКУТ2104	СКУТ2107*	СКУТ1103	СКУТ2106	СКУТ2105	СКУТ1102
Диапазон рабочих частот, ГГц	0.8-2.2	2.0-8.0	8.0-12.0	0.1-4.0	4.0-12.0	8-12	8-12
Полоса рабочих частот, макс., %	15	15	15	10	15	10	15
Коэффициент усиления, дБ	10-30	10-30	15-30	20-30	15-30	20-40	15-30
Неравномерность коэффициента усиления, дБ	1.0	1.5	1.5	2.5	2.5	2.0	2.5
Коэффициент шума (при 25° С) ,дБ							
КСВН, вх./вых.	0.8-1.2	1.2-1.8	1.3-1.8	3.0-3.5	4.0-4.5	3.5-4.0	4.5-5.0
Верхняя граница линейности амплитудной	1.5/1.5				2.5/3.0		
Характеристики по выходу, мВт	3.0-10				3.0-10		
Напряжение питания	+12				+12		
Потребляемая мощность, Вт	0.8-1.5				1.0-2.0		
Диапазон рабочих температур, °С	-60...+85				-60...+85		
Рисунок	3.1	3.1	3.1	3.2	3.13	3.13;3.14	3.13;3.14

Корпуса герметичные

Вход и выход СВЧ сигнала коаксиальные (розетка) , 3.5/1.52 мм

Устойчивы к механическим и климатическим воздействиям

*Возможен вариант с микрополосковым входом и выходом СВЧ сигнала:

- корпус негерметичен
- диапазон рабочих температур от 0 до 85 ° С
- устойчив к механическим воздействиям
- в составе герметизированной аппаратуры диапазон рабочих температур от -60° С до +85° С

Таблица 7.2 - Малошумящие транзисторные усилители для диапазона частот 0.1-12.0 ГГц

Параметры	Серия									
	М42136	М42118	М42143*	М42143-1*	М42164-1	М42164-2*	М42174-1	М4274-2	М421139-1	М421139-2**
Диапазон рабочих частот, ГГц	0.1-1.0	0.1-2.0	1-2	1-2	1-4	1-4	4-8	4-8	4-12	4-12
Коэффициент усиления, дБ	25	25	25	30	15	30	20	32	20-30	9-15
Неравномерность коэффициента усиления, макс., дБ	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5	4,0	3,0
Коэффициент шума (при 25° С), дБ	2,0	3,5	2,5	3,0	4,5	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу, мВт	1,0									
КСВН, вх./вых.	2,5	1,0	0,1	10	1,0	1,0	1,0	1,0	3,0	3,0
Напряжение питания, В	-12	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5
Потребляемая мощность, Вт	0,6	+12	-12	-12	+15	+15	+15	+15	+12	+12
Масса, г	40	1,0	0,6	1,4	1,3	1,4	2,0	2,0	2,0	1,3
		60	60	65	85	115	100	130	150	40
Диапазон рабочих температур, °С	-60...+70				-60...+85					0...+85
Рисунок	3.11								3.12	

Корпуса герметичные

Вход и выход СВЧ сигнала коаксиальные (розетка) , 3.5/1.52 мм

Устойчивы к механическим и климатическим воздействиям.

*Модели М42143 и М42143-1 предусматривают использование усилителя в виде микрополосковой платы для встраивания в высокочастотные блоки, выполняемые по гибридно-интегральной технологии

**Модель М421139-2 : - вход и выход СВЧ сигнала микрополосковая линия (50 Ом)

- корпус негерметичный

- в составе герметизированной аппаратуры диапазон рабочих температур от -60 до 85 °С

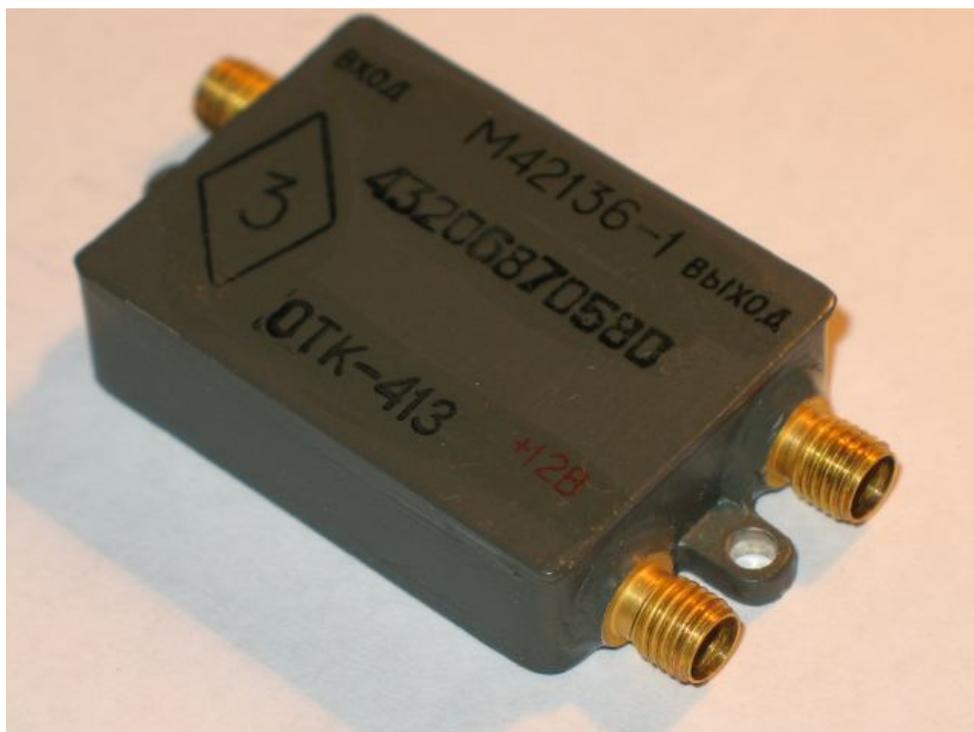
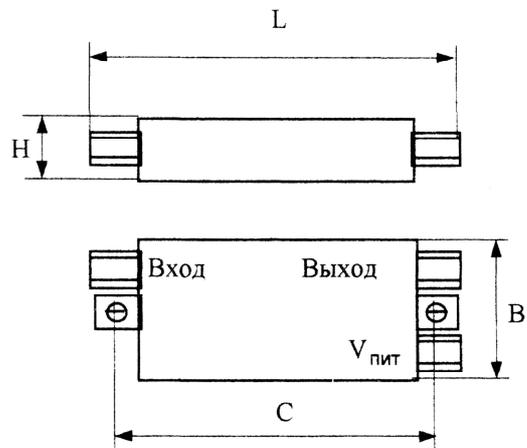


Рисунок 7.1– Общий вид маломощного транзисторного усилителя



Серия	L	H	B	C
СКУТ1102	46	15.5	35	38
СКУТ2104	109	16	37	102
СКУТ2107	97	18	35	88

Размеры в мм.

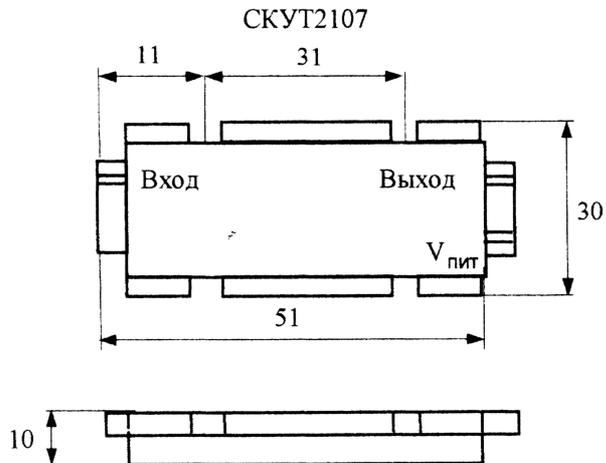
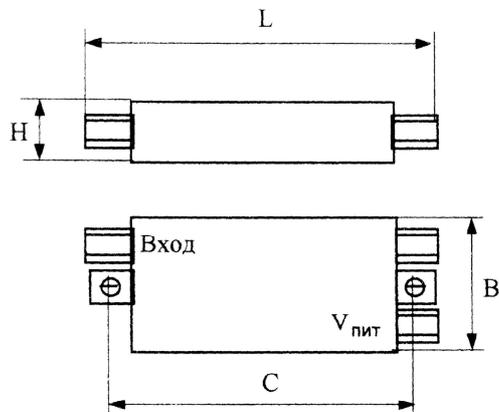


Рисунок 7.2



Модель	L	H	B	C
M42136	57	12.5	30	49
M42118	59	18	34	50
M42143	46	15.5	35	38
M42143-1	58	15.5	35	50
M42164-1	80	19.5	39.5	73
M42164-2	113	19.5	39.5	106
M42174-1	87	16	37	81
M42174-2	109	16	37	102
M421139-1	97	18	35	88

Размеры в мм

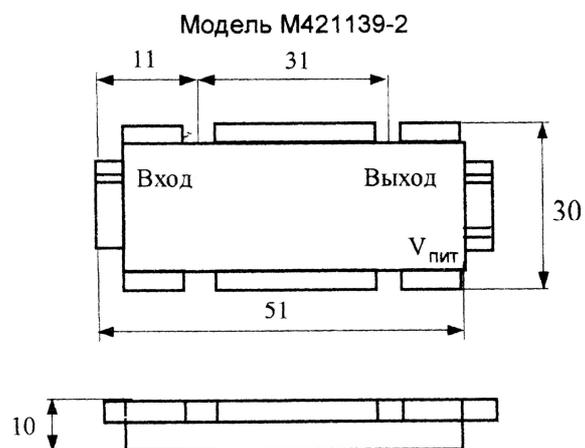


Рисунок 7.3

8 Обоснование допусков и технологии изготовления

8.1 Допуск на ширину полосковой линии и толщину подложки

Необходимо найти производственные и относительные допуски на ширину микрополоска и высоту подложки, если $\Delta g_{\text{доп}}$ не должно превышать $\pm 1 \text{ Ом}$, при особом производственном условии, чтобы производственные допуски $\delta_{\text{пр}}(W)$ и $\delta_{\text{пр}}(h)$ были бы равны по своим абсолютным значениям, то есть $|\delta_{\text{пр}}(W)| = |\delta_{\text{пр}}(h)|$.

Производим следующие расчеты:

$$\delta_{\text{пр}}(W) = \delta_{\text{пр}}(h) \leq \frac{\Delta \rho_{\text{дон}} W h}{K_{1,2}(W - h)}, \quad \Delta W = \Delta h;$$

$$|\delta_{\text{пр}}(W)| = |\delta_{\text{пр}}(h)| \leq -\frac{\Delta \rho_{\text{дон}} W h}{K_{1,2}(W + h)}, \quad \Delta W = \Delta h.$$

Для значений $\Delta \rho \leq 1$; $\Delta \rho \leq -1$; $\delta_{\text{пр}}(W) = \delta_{\text{пр}}(h)$ и $\delta_{\text{пр}}(W) = -\delta_{\text{пр}}(h)$, полоски во всех случаях

$$K_{1,2} = \frac{92,31}{\sqrt{\varepsilon_{\text{д}} + 1}} = \frac{92,31}{\sqrt{9,8 + 1}} = 28,09.$$

$$\delta_{\text{пр}}(W) = \delta_{\text{пр}}(h) \leq \frac{\Delta \rho_{\text{дон}} W}{K_{1,2}(W - h)}$$

$$\delta_{\text{пр}}(W) = \delta_{\text{пр}}(h) \leq \frac{\pm 1 \cdot 1 \cdot 0,1}{28,09(0,1 - 1)} = \pm 0,00395 \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{пр}}(W) = \delta_{\text{пр}}(h) \leq \frac{\pm 1 \cdot 1 \cdot 0,1}{28,09 \cdot (0,1 + 1)} = \pm 0,0034 \text{ мм}.$$

Учитывая равномерную возможность получения в ТП отклонений в размерах конструктивных параметров W и h с одинаковыми и разными знаками, следует точностный режим производства установить в соответствии со вторым вариантом расчета.

Тогда при поддержании

$$W_{\text{ф}} = W \pm \delta_{\text{пр}}(W) = 0,1 \pm 0,0034 \text{ мм};$$

$$h_{\text{ф}} = h \pm \delta_{\text{пр}}(h) = 0,1 \pm 0,0034 \text{ мм}.$$

имеет 100% гарантию, что изготовления МПЛ будет иметь девиацию волнового сопротивления, не превышающую 2% от теоретической, расчетной величины. Используя следующую формулу найдем относительные допуски на W и h

$$\delta_{отн}(W) = \delta_{отн}(h) = \frac{\delta_{np}(W, h)}{\lambda_0} = \frac{0,0034}{32} = 0,0001_{мм}.$$

Как видно, найденные значения абсолютных и относительных допусков могут быть обеспечены только в прецизионном производстве. Это еще раз иллюстрирует современные проблемы технологии микроминиатюрных устройств СВЧ

8.2 Допуск на шероховатость токонесущих (металлических) поверхностей СВЧ – конструкций

Задача по определению производственного допуска в данном случае может быть сформулирована так: каков должен быть класс обработки металлической поверхности, чтобы относительное увеличение активных потерь за счет поверхностных токов и относительная мощность рассеяния поля на неровностях не превышали наперед заданных значений.

Конструкторско-технологический критерий на чистоту обработки токонесущей поверхности СВЧ – конструкции определяется следующим выражением

$$N_M \geq \ln^2 \left(\frac{35}{Z_e} \right),$$

где Z_e – расчетная глубина проникновения СВЧ - тока в металлическую поверхность конструкции.

Для меди: $Z_e = 0,39\sqrt{\lambda_0} = 0,39 \cdot \sqrt{3,2} = 0,698$, λ_0 – в [см], Z_e – [мкм].

$$N_M \geq \ln^2 \left(\frac{35}{0,698} \right) = 15,33$$

Класс чистоты обработки токонесущей (металлической) поверхности N_M связан со среднеквадратической величиной высот микронеровностей σ_R следующей эмпирической формулой:

$$\sigma_R \approx 40 \exp \left[-\sqrt{N_M} \right] \approx 40 \cdot \exp \left[-\sqrt{15,33} \right] \approx 40 \cdot 0,028 \approx 1,12$$

8 Применение систем САПР для проектирования и расчета параметров микрополосковой линии в пакете MICROWAVE OFFICE 2002

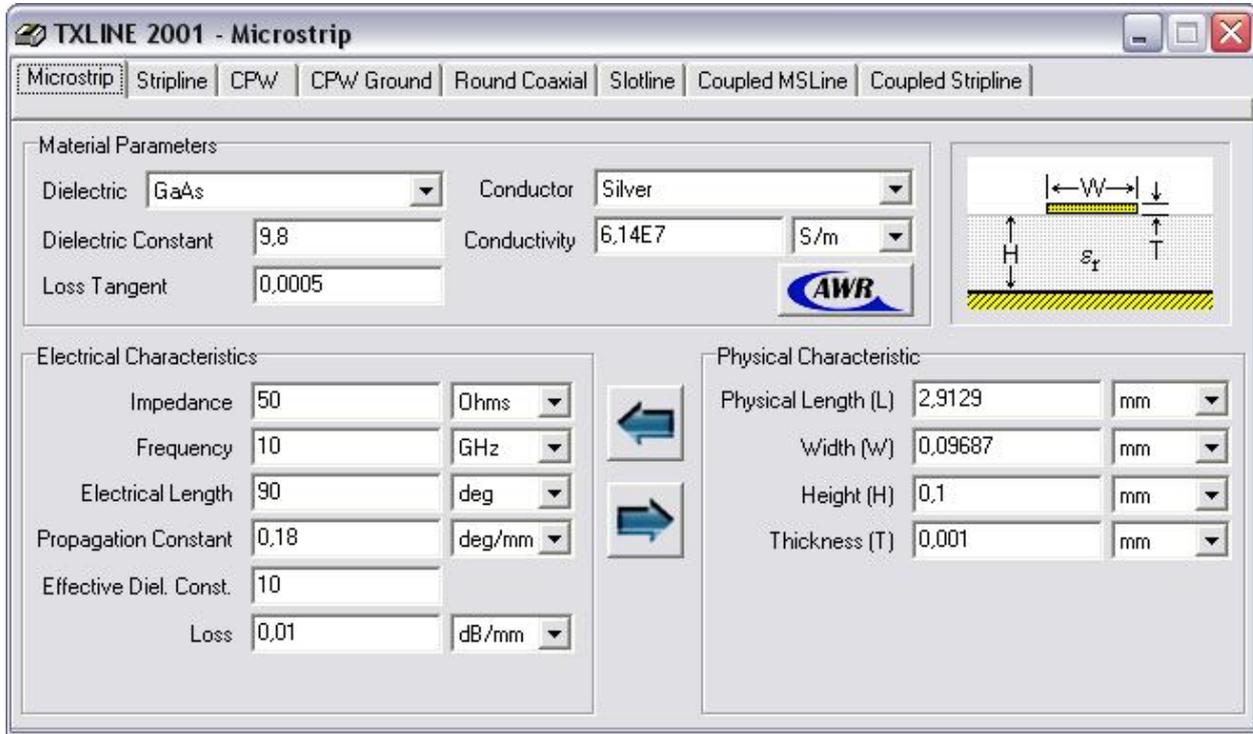


Рисунок 8.1 – Рабочее окно подпрограммы TXLINE 2001
MICROWAVE 2002

$\frac{z}{h}$	$\epsilon_r = 3,78$						$\epsilon_r = 9,6$					
	$t/h = 0$		$t/h = 0,01$		$t/h = 0,1$		$t/h = 0$		$t/h = 0,01$		$t/h = 0,1$	
	Z_B	$\epsilon_{\text{эф}}$	Z_B	$\epsilon_{\text{эф}}$	Z_B	$\epsilon_{\text{эф}}$	Z_B	$\epsilon_{\text{эф}}$	Z_B	$\epsilon_{\text{эф}}$	Z_B	$\epsilon_{\text{эф}}$
0,100	164,10	2,57	160,06	2,52	144,02	2,36	109,03	5,82	106,80	5,67	97,88	5,11
0,125	155,43	2,58	152,10	2,54	138,05	2,39	103,21	5,85	101,37	5,72	93,57	5,19
0,150	148,36	2,59	145,52	2,55	133,01	2,41	98,46	5,88	96,90	5,76	89,96	5,26
0,175	142,37	2,60	139,92	2,56	128,63	2,43	94,44	5,90	93,09	5,79	86,83	5,33
0,200	137,2	2,61	135,03	2,58	124,74	2,44	90,96	5,93	89,77	5,83	84,08	5,38
0,225	132,63	2,61	130,7	2,59	121,25	2,46	87,90	5,95	86,83	5,86	81,6	5,43
0,25	128,56	2,62	126,82	2,59	118,06	2,47	85,16	5,97	84,2	5,88	79,36	5,47
0,275	124,87	2,63	123,29	2,6	115,14	2,49	82,68	5,99	81,81	5,91	77,31	5,51
0,3	121,51	2,63	120,06	2,61	112,44	2,51	80,42	6,01	79,63	5,94	75,42	5,55
0,325	118,42	2,64	117,09	2,62	109,93	2,51	78,35	6,03	77,62	5,96	73,67	5,59
0,375	112,9	2,65	111,77	2,63	105,39	2,53	74,64	6,07	74,02	6,0	70,5	5,65
0,425	108,09	2,66	107,11	2,65	101,36	2,55	71,41	6,11	70,87	6,05	67,71	5,71
0,475	103,82	2,68	102,97	2,66	97,74	2,57	68,55	6,14	68,08	6,09	65,2	5,77
0,5	101,86	2,68	101,07	2,67	96,06	2,57	67,23	6,16	66,79	6,1	64,04	5,79
0,55	98,23	2,69	97,52	2,68	92,92	2,59	64,79	6,19	64,4	6,14	61,87	5,84
0,6	94,92	2,7	94,3	2,69	90,04	2,6	62,57	6,22	62,22	6,18	59,89	5,89
0,65	91,89	2,71	91,34	2,7	87,38	2,62	60,53	6,25	60,23	6,21	58,06	5,93
0,7	89,1	2,72	88,6	2,71	84,91	2,63	58,66	6,28	58,39	6,24	56,36	5,97
0,75	86,51	2,73	86,06	2,72	82,61	2,64	56,92	6,31	56,68	6,28	54,79	6,01
0,8	84,1	2,74	83,7	2,73	80,46	2,66	55,31	6,34	55,09	6,31	53,31	6,05
0,85	81,85	2,75	81,49	2,74	78,44	2,67	53,8	6,37	53,6	6,34	51,93	6,09
0,9	79,74	2,76	79,41	2,75	76,53	2,68	52,38	6,4	52,2	6,37	50,63	6,13
0,95	77,75	2,77	77,45	2,76	74,73	2,69	51,05	6,42	50,88	6,4	49,4	6,16
1,0	75,67	2,78	75,61	2,77	73,03	2,7	49,79	6,45	49,64	6,42	48,23	6,19
1,125	67,86	2,82	67,69	2,81	65,68	2,75	44,43	6,58	44,34	6,56	43,24	6,35
1,5	61,53	2,86	61,42	2,85	59,8	2,8	40,19	6,69	40,13	6,68	39,25	6,49
1,75	56,35	2,89	56,29	2,89	54,95	2,84	36,74	6,8	36,71	6,79	35,98	6,62
2,0	52,04	2,92	51,99	2,92	50,88	2,87	33,87	6,9	33,84	6,89	30,24	6,73
2,5	45,2	2,98	45,18	2,98	44,39	2,94	29,33	7,08	29,32	7,07	28,89	6,94
3,0	40,02	3,03	40,0	3,03	39,42	2,99	25,9	7,23	25,89	7,23	25,57	7,11
3,5	35,93	3,07	35,91	3,07	35,48	3,04	23,2	7,37	23,19	7,37	22,95	7,26
4,0	32,62	3,11	32,6	3,11	32,27	3,08	21,02	7,49	21,01	7,48	20,83	7,4
4,5	29,88	3,14	29,85	3,14	29,61	3,12	19,22	7,60	19,21	7,59	19,08	7,51
5,0	27,57	3,17	27,54	3,17	27,36	3,15	17,71	7,69	17,7	7,68	17,6	7,62
5,5	25,6	3,2	25,56	3,2	25,43	3,18	16,43	7,78	16,4	7,77	16,33	7,72
6,0	23,9	3,23	23,85	3,22	23,76	3,21	15,31	7,86	15,29	7,84	15,24	7,8
6,5	22,41	3,25	22,35	3,25	22,29	3,24	14,34	7,93	14,31	7,91	14,28	7,88
7,0	21,09	3,27	21,03	3,27	21,0	3,26	13,49	8,0	13,45	7,98	13,44	7,96
7,5	19,92	3,29	19,85	3,28	19,84	3,28	12,73	8,06	12,69	8,03	12,69	8,03
8,0	18,88	3,31	18,8	3,3	18,81	3,3	12,05	8,12	12,01	8,09	12,01	8,09
8,5	17,93	3,33	17,85	3,32	17,88	3,32	11,44	8,18	11,4	8,14	11,41	8,15
9,0	17,08	3,34	16,99	3,33	17,04	3,34	10,89	8,23	10,84	8,18	10,86	8,2
9,5	16,31	3,36	16,21	3,34	16,27	3,35	10,39	8,28	10,34	8,23	10,37	8,25
10,0	15,6	3,37	15,5	3,36	15,56	3,37	9,93	8,32	9,88	8,27	9,91	8,3

3 Выбор и расчет полосковой конструкции гетеродина

Проблема создания многофункциональной, высоконадежной, экономичной и малогабаритной аппаратуры решается в настоящее время путем миниатюризации применяемых активных приборов и колебательных систем на основе использования полупроводниковых приборов и интегральных схем. До недавнего времени прогресс в указанном направлении целиком и полностью определялся уровнем развития технологии изготовления транзисторов. В последние годы здесь получены большие достижения: современные биполярные СВЧ транзисторы обладают максимальной частотой генерации порядка 10 ГГц, обеспечивая на частотах 4-5 ГГц выходную мощность в непрерывном режиме порядка 5 и 100 Вт на частотах около 1 ГГц. Полевые транзисторы могут работать на частотах выше 10-17 ГГц с выходной мощностью несколько ватт и коэффициентом усиления около 3 дБ. Однако появившиеся в конце 60-х годов полупроводниковые генераторные диоды СВЧ составили серьезную конкуренцию транзисторам, и в настоящее время, благодаря успехам современной технологии, значительно превзошли их по ряду важнейших показателей.

По сравнению с транзисторами генераторные диоды СВЧ обладают существенными преимуществами по максимальной частоте генерации, выходной мощности на частотах выше 5 ГГц, надежности, технологичности и массогабаритным характеристикам. Новые приборы выделены в отдельный класс электронных приборов - полупроводниковые генераторные диоды СВЧ или диоды с отрицательным сопротивлением. К ним относятся лавинно-пролетные диоды (ЛПД), называемые в иностранной литературе IMPATT диоды; диоды с междолининым переносом электронов (МПД), называемые иногда диодами с переносом электронов, или диодами Ганна; лавинно-ключевые диоды (ЛКД), известные чаще как TRAPATT диоды [5]. Отечественные диоды серийного изготовления работают в диапазоне частот 4-100 ГГц, обеспечивают выходную мощность 0.1- 4 Вт в сантиметровом диапазоне. В качестве гетеродинов в сантиметровом диапазоне используют полупроводниковые маломощные генераторы СВЧ [9].

Полупроводниковый гетеродин состоит из СВЧ колебательной системы (резонатора или системы резонаторов в виде микрополоскового устройства) и активного полу-

проводникового элемента, в качестве которого используют полупроводниковый СВЧ диод. Для работы такого гетеродина к нему достаточно подвести постоянное напряжение, не превосходящее нескольких десятков вольт. Полупроводниковые гетеродины отличаются экономичностью питания, весьма малыми габаритами и массой, большой долговечностью и наиболее удобны для создания СВЧ устройств.

Основные требования, которым должен удовлетворять ЛПД составляют: требуемая частота генерации (в данном случае 9-10ГГц); мощность, не менее 60 мВт и конструктивное исполнение (полосковое исполнение). В качестве генераторных диодов выбираем диоды СВЧ 3А707И. Это арсенидогаллиевые диоды с барьером Шоттки, лавинно-пролетные, генераторные, предназначены для применения в генераторах сантиметрового диапазона длин волн. Выпускаются в металлокерамическом корпусе с жесткими выводами.

(таблицы генераторных диодов)

(пример схемы и топологии)

Находим собственную резонансную частоту диода по формуле

$$f_1 = 5,04 \left[\frac{L_K \times C_K \times C_{дг}}{C_K + C_{дг}} \right]^{-1/2} ;$$

где L_K – индуктивность диода,

C_K – емкость корпуса диода,

$C_{дг}$ – общая емкость диода.

Находим резонансное сопротивление собственного контура диода на зажимах отрицательной проводимости [17]

$$R^* = \left[(W_1 \times C_{дг})^2 \times r_K \right]^{-1} .$$

Находим характеристическое сопротивление контура по формуле

$$\rho_{Э1} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_K (C_K + C_{дг})}{C_K + C_{дг}}} .$$

Находим коэффициент связи контура на собственной резонансной частоте [17]

$$K_1^{-1} = (W_1 \times C_K \times \rho_{Э1})^{-1}.$$

Находим нормированную относительную расстройку на $f = 9,24$ ГГц по формуле

$$X_1 = \left[\left(\frac{f}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \times K_1^{-1}.$$

Из отношения $X_1 \times X_2 = 1$ определим нормированную относительную расстройку второго контура

$$X_2 = \frac{1}{X_1}.$$

Находим эквивалентное характеристическое сопротивление второго контура при работе на первом оберitone по формуле

$$\rho_{01} = n \times \frac{\pi}{2} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \times Z_0.$$

где n – номер обертона,

$$\rho_{01} = 1 \times \frac{3,14}{2} \times 50 = 78,5 \text{ Ом}.$$

Находим коэффициент связи второго контура по формуле

$$K_2^{-1} = (W_1 \times C_K \times \rho_{01}).$$

Определим резонансную частоту второго контура по формуле

$$f_2 = \sqrt{\frac{X_2}{K_2^{-1}} + 1} \times f_1.$$

Находим оптимальное значение сопротивления нагрузки. $R_{\text{опт}} = (15 \div 20) R_0$; $R_{\text{н\text{опт}}} = 225 \div 300 \text{ Ом}$. Исходя из условия самовозбуждения выбираем $R_{\text{н\text{опт}}} = 300 \text{ Ом}$.

Находим полное сопротивление потерь резонатора с учетом потерь, вносимых полезной нагрузкой по формуле

$$\widehat{R}_N = \left(\frac{f_1}{f} \right)^2 \times R^* \left[1 + X_1 \frac{r_2}{r_K} \right]^{-1}.$$

отсюда

$$r_2 = \left[\left(\frac{f_1}{f} \right)^2 \times \frac{R^*}{R_{\text{опт}}} - 1 \right] \times X_1^{-2} \times r_K.$$

Примем собственную добротность внешнего резонатора $Q_{02} = 100$. Найдем сопротивление собственных потерь данного контура по формуле

$$r_{02} = \frac{\rho_{01}}{Q_{02}}.$$

Находим КПД контура по формуле

$$\eta_2 = 1 - \frac{r_{02}}{r_2}.$$

Определим КПД с учетом сопротивления потерь по формуле

$$\eta_k = \left[1 + \frac{r_k}{(r_2 \times X_1^2)} \right]^{-1} \times \eta_2.$$

Найдем длину резонатора по формуле

$$l_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\epsilon_{эф}}} \cdot \arctg \frac{1 - \omega^2 L_K C_K}{\omega \times Z_0 [(C_K + C_{\delta\Gamma}) - \omega^2 L_K C_K C_{\delta\Gamma}]} + n \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{эф}}}.$$

(описание, топологию, типы ферритов)

4 Расчет Y-циркулятора №1

Ферритовый диск Y-циркулятора будем изготавливать из феррита марки 1СЧ2, имеющего следующие характеристики:

- диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_{\phi}' = 12,5$;
- намагниченность насыщения, $M_S = 231 \text{ кА/м}$;
- средняя длина волны, $\lambda = 32 \text{ мм} = 3,2 \text{ см}$;
- волновое сопротивление полосковой линии, $Z_0 = 50 \text{ Ом}$;
- магнитная проницаемость, $\mu_H = 20$.

Для проведения расчета задаемся следующими величинами:

$h_{\phi} = h = 1 \text{ мм}$ – высота феррита;

$m = 1$ – для несимметричной линии;

W - ширина подводящей линии, $W = 0,934 \text{ мм}$.

Расчет ферритного циркулятора ведем в области полей до ферромагнитного резонанса.

Рассчитаем a_z

$$a_z = \frac{1}{1 + 1,735 \epsilon_0'^{-0,0724} \cdot \left(\frac{W}{h}\right)^{-0,836}},$$
$$a_z = \frac{1}{1 + 1,735 \cdot 9,8^{-0,0724} \cdot \left(\frac{0,934 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,836}} = 0,39.$$

Вычислим

$$A = 653 \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{a_z}{m} \cdot \frac{1}{Z_0} = 653 \cdot \frac{0,001}{0,032} \cdot \frac{0,39}{1} \cdot \frac{1}{50} = \frac{0,255}{1,6} = 0,159$$

Задаемся значением относительной намагниченности p в пределах $0,5 \div 0,6$. Выбираем $p = 0,6$.

Определяем намагниченность ферритового образца

$$M = \frac{P}{\gamma} \cdot f,$$

где $\gamma = 35,17 \frac{МГТ}{кА \cdot м^{-1}}$ - гидромагнитное отношение электрона, определяемое отношением его магнитного момента к механическому.

$$M = \frac{0,6}{35,17} \cdot 9375 = 159,94 .$$

Определяем эффективную магнитную проницаемость:

$$\mu'_1 = 0,9 - p^2 = 0,9 - 0,6^2 = 0,9 - 0,36 = 0,54 .$$

Радиус феррита вычисляется следующим образом:

$$R_\phi = \frac{0,29\lambda}{\sqrt{\varepsilon'_\phi \cdot \mu'_1}} = \frac{0,29 \cdot 0,032}{\sqrt{12,5 \cdot 0,54}} = \frac{0,00928}{2,6} = 0,00357 м = 3657 мкм .$$

Задаемся величиной относительного внутреннего поля подмагничивания, которое в дорезонансной области $1,6 \div 4 кА/м$, выбираем $H=2$.

Определяем величину подмагничивающего поля, при котором наступает насыщение феррита:

$$\sigma = \frac{\gamma H^i}{f} = \frac{35,17 \cdot 2}{9375} = 0,0075 .$$

Вычисляем напряженность внешнего постоянного магнитного поля:

$$H^e = H^i + N_z \cdot M ,$$

где N_z - подмагничивающий фактор.

Определяем волновое сопротивление входной полосковой линии:

$$\frac{Z_{oe}}{a_z} = 653 \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{k' \mu'_1}{\mu'_1} ,$$

Выразим Z_{oe} :

$$Z_{oe} = 653 \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{k' \mu'_1}{\mu'_1} \cdot a_z ,$$

где компоненты тензора $\overset{=}{\mu}$ определяются по формулам:

$$\mu'_1 \cong 1 + \frac{p\sigma}{\sigma^2 - 1} = 1 + \frac{0,6 \cdot 0,0075}{0,0075^2 - 1} = 0,995 ,$$

$$k' \cong -\frac{p}{\sigma^2 - 1} = \frac{-0,6}{0,0075^2 - 1} = 0,6 ,$$

$$Z_{oe} = 653 \cdot \frac{0,001}{0,032} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{0,6 \cdot 0,995}{0,54} \cdot 0,39 = 8,8 .$$

Определяем волновое сопротивление трансформирующей линии:

$$Z_{TP} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{oe}} = \sqrt{50 \cdot 8,8} = 20,97,$$

Вычисляем ширину полоски трансформирующей линии:

$$W = 2 \cdot \left[\frac{9,02 - 1}{3,14} - \frac{\ln(2 \cdot 9,02 - 1)}{3,14} + \frac{9,8 - 1}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,8} \left(\ln(9,02 - 1) + 0,293 - \frac{0,517}{9,8} \right) \right] = 3,83 \text{ мм}$$

Расчет Y-циркулятора №2 по ОСТ4.070.000

Текущее значение относительной намагниченности феррита определяется по формуле

$$P_{нен} \cong \left| \frac{\kappa}{\mu} \right| = \frac{1}{2A} \left[\sqrt{1 + 3,6A^2} - 1 \right],$$

где $A = 6,53 \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{\alpha_{pm}}{m}$.

Диаметр ферритового диска находится по формуле

$$D_{\phi} = 0,58\lambda \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\phi} (0,9 - P_{нен}^2)}}.$$

Значение текущей намагниченности насыщения определяется следующим образом

$$M = \frac{P_{нен} \cdot 2\pi f}{\mu_0 \cdot \gamma}.$$

Затем вычисляем внутреннее подмагничивающее поле H_i пользуясь экспериментальной зависимостью $B=f(H_i)$, приведенной на черт.63 в []. Получаем зависимость $4\pi M = f(H_i)$ путем вычета из значения индукции B значение H_i в каждой точке, а затем по известному значению определяем соответствующее значение подмагничивающего поля.

Вычисление внешнего подмагничивающего поля находится следующим образом

$$H_e = H_i + N_z M,$$

где N_z - размагничивающий фактор ферритового диска в направлении оси z . для тонких дисков $N_z=1$.

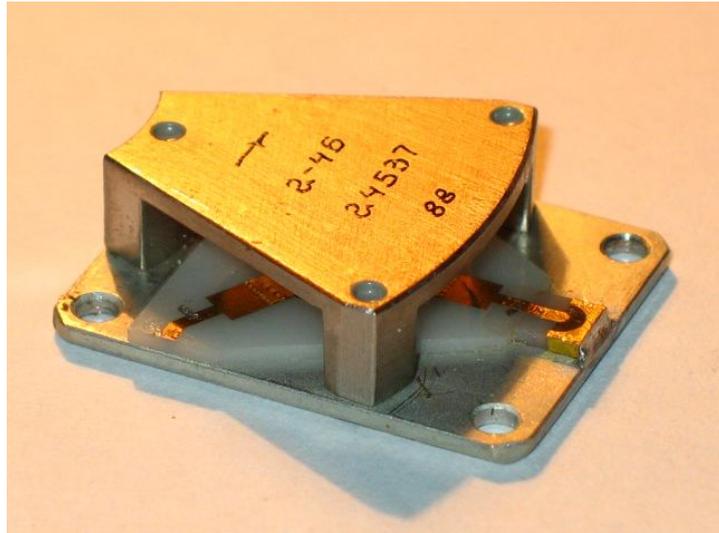


Рисунок – Общий вид ферритового вентиля в микрополосковом исполнении