Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.Н.ТУПОЛЕВА - КАИ

Н.Р. Гайнуллина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Учебное пособие
по курсовому проектированию по дисциплине "МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"
специальности 11.03.04 "Электроника и наноэлектроника"

Казань – 2017

УДК 621.382

Гайнуллина Н.Р. Проектирование гибридных интегральных микросхем: Учеб. пособие. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. -145 с.

Рассмотрены основные принципы и этапы проектирования гибридных интегральных микросхем, расчет конструкции элементов, выбор материалов, обоснование и выбор технологии изготовления пленочных элементов и разработка топологии. Учебное пособие предназначено для курсового проектирования студентам специальности 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Табл. 4. Ил. 24. Библиогр.: 14 назв.

Рецензенты: **Галяметдинов Ю.Г.,** д.х.н., профессор, зав. кафедрой Физической и коллоидной химии ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»;

Рахимов Р.Х., к.т.н., главный инженер ООО «Эйр кондиционер сервис»

ISBN

© Н.Р. Гайнуллина, 2017

© Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕРМИНОВ И ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ 5
ВВЕДЕНИЕ 6
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ИМС 11
1.1. Конструктивно-технологические особенности 11
1.2. Определение функциональной сложности 12
1.3. Методы оптимизации ГИС по критерию функциональной точности 14
1.4. Расчет допустимых среднеквадратических отклонений параметров пленочных элементов 19
Контрольные вопросы 21
Глава 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ 22
2.1. Технология изготовления тонкопленочных ИМС 23
2.2. Осаждение пленок термическим испарением материала в вакууме 24
2.3. Осаждение пленок распылением материалов ионной бомбардировкой 26
2.4. Формирование конфигурации пленочных элементов ГИМС 29
2.5. Варианты изготовления платы ГИМС или Мсб 30
Контрольные вопросы 32
Глава 3. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ 33
3.1. Расчет геометрических размеров пленочных резисторов 33
3.2. Выбор и обоснование материала резистивной пленки 37
3.3. Расчет геометрических размеров пленочных резисторов 38
Контрольные вопросы 41
3.4. Расчет сопротивления контактного перехода между резистивной и проводниковой пленками 41
Контрольные вопросы 45
3.5. Расчет и проектирование прецизионных резисторов 45
Контрольные вопросы 49
Глава 4. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ 50
4.1. Конструктивно-технологические особенности и основные параметры пленочных конденсаторов 50
4.2. Расчет геометрических размеров конденсаторов 51
4.3. Потери в пленочных конденсаторах 54
4.4. Проектирование прецизионных конденсаторов 56
4.5. Последовательность расчета геометрических размеров пленочных конденсаторов 58
Контрольные вопросы 60
ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИС 61
5.1. Зависимости погрешности выходного параметра от физических и геометрических параметров элементов 61
5.2. Исходные данные для проектирования топологии 64
5.3. Конструктивные методы защиты ИМС от воздействия дестабилизирующих факторов 75
5.4. Бескорпусная герметизация ГИС 78
Контрольные вопросы 79
Глава 6. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ ГИС 80

6.1. Принципы практического проектирования и компоновки топологической структуры ГИС 80
6.2. Разработка коммутационной схемы соединений 88
Контрольные вопросы 97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 99
ПРИЛОЖЕНИЯ 101

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕРМИНОВ И ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

№ п.п.	Наименование сокращения	Пояснение
1.	РЭА	Радиоэлектронная аппаратура
2.	ЭРЭ	Электрорадиоэлементы
3.	МОП-транзистор	Транзистор, выполненный по технологии металл-окисел-полупроводник
4.	ИМС	Интегральные микросхемы
5.	ГИС	Гибридные интегральные схемы
6.	ГИМС	Гибридные интегральные микросхемы
7.	ФС	Функциональная схема
8.	ТВИ	Термическое вакуумное испарение
9.	И-ПР	Ионно − плазменное распыление
10.	ФЛ	Фотолитография
11.	МСБ	Микросборка
12.	БИС	Большие интегральные схемы
13.	ЕСКД	Единая система конструкторской документации
14.	ЕСТД	Единая система технологической документации
15.	ТКС	Температурный коэффициент сопротивления
16.	ТП	Технологический процесс
17.	ФЛ	Фотолитография

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы совершенствования РЭА неразрывно связаны с ее миниатюризацией, повышением надежности и увеличением функциональных возможностей, а также возможностями автоматизации и механизации производства.

Однако прежде, чем приступить к детальному изучению объекта, весьма полезно и необходимо обозреть его в целом, в общих чертах, что позволяет почувствовать и понять взаимосвязь его отдельных частей, динамику развития и возможности прогнозирования на будущее.

Строгой терминологии в определении степени миниатюризации РЭА не существует. Однако условимся для определенности применять следующие определения конструкций РЭА:

1. «Нормальная конструкция» базируется на ламповой технике, дискретных компонентах, технологии объемного монтажа с ручной сборкой. Основные недостатки: большое энергопотребление, малый срок службы ламп, громоздкие несущие конструкции, а также невозможность автоматизации процессов сборки и монтажа.
2. «Миниатюрная конструкция» базируется на применении миниатюрных элементов и печатного монтажа. Применение техники печатных схем позволило увеличить плотность монтажа и автоматизировать процессы сборки и монтажа РЭА.
3. «Микроминиатюрная конструкция» базируется на модульном принципе монтажа РЭА. Этот метод включает в качестве основного элемента конструкции некоторую ячейку (модуль), стандартную по размеру, способам сборки и монтажа. Из всех разработанных модулей наиболее широкое распространение получили два вида - плоские и объемные. Плоские модули выполняются на печатных платах унифицированных размеров, имеют проволочные или ленточные выводы. Среди объемных модулей наибольший интерес представляют те, в которых дискретные элементы схемы размещаются вертикально и соединяется в плоскости расположения осевых выводов. После сборки модуль зали-

вается компаундом, что придает ему механическую прочность.

4. «Микромодульная конструкция», основным элементом которой является микро плата стандартного размера с нанесенными на нее одним или несколькими микроэлементами, соединенными между собой проволочными выводами. Основные преимущества микромодульных конструкций: стандартная геометрия и возможность автоматизации процессов сборки.
5. «Микроэлектронная интегральная схема» - это конструктивно законченное изделие электронной техники, содержащее совокупность электрически связанных между собой ЭРЭ, изготовленных в едином технологическом цикле на поверхности или в объеме полупроводникового материала. Наибольшее распространение получили четыре вида интегральных схем: пленочные, гибридные, полупроводниковые и совмещенные.

Пленочные схемы, в свою очередь, делятся на тонкопленочные (толщина пленок - доли и единицы микрометра) и толстопленочные (с толщиной пленок более десяти микрометров). Изготовление этих схем основано на нанесении металлических, диэлектрических и полупроводниковых пленок на изоляционную подложку.

Гибридные схемы - это тонкопленочные схемы, состоящие из пассивных элементов, межсоединений и присоединенных к ним навесных активных элементов любого назначения в бескорпусном исполнении. Преимущества гибридных схем состоят в том, что они дают возможность сочетать достоинства пленочной технологии изготовления пассивных элементов с высокими электрическими характеристиками дискретных полупроводниковых структур.

Полупроводниковые схемы. Отличительной особенностью этих схем является то, что все элементы изготавливаются в одном объеме монокристалла полупроводника. Соединения осуществляются как внутри объема полупроводникового кристалла, так и на его поверхности. К недостаткам следует отнести наличие внутри объема большого числа паразитных связей между элементами, которые снижают электрические характеристики этих схем.

Совмещенные схемы. В этих схемах пассивные элементы наносятся на поверхность изоляционного слоя, покрывающего монолитную полупроводни-

ковую структуру с активными элементами. Этот метод позволяет изготавливать схемы с более широким диапазоном электрических параметров и выдерживать более строгие допуски на них.

Как видно из изложенного, для всех типов микросхем имеет место интеграция как по конструктивным признакам - формирование всех элементов либо в объеме полупроводника, либо на изоляционной поверхности и их неделимость, так и по технологическим признакам - использование групповых методов обработки.

Хронология наиболее важных изобретений, определяющих различные этапы создания интегральных микросхем, позволяет судить об интенсивности проводимых в этом направлении работ:

1947 год - *создание точечного сплавного транзистора;*

1950 год - *получение монокристалла германия;*

1951 год - *создание биполярного и МОП - транзисторов*;

1952 год - *получение монокристаллического кремния*;

1956 год - *изобретение диффузионного транзистора*;

1958 год - *изобретение планарного транзистора*;

1959 год - *реализация полупроводниковой схемы;*

1960 год - *создание эпитаксиальных транзисторов*;

1962 год - *создание интегральных схем по КМОП технологии*;

1969 год - *создание большой интегральной схемы (БИС);*

1971 год - *разработка микропроцессора*;

1975 год - *разработка сверхбольшой интегральной схемы (СБИС).*

Если попытаться объективно оценить возможности ИС, то необходимо отметить два важных фактора:

1. С применением ИС становится возможной разработка многих схем, реализация которых ранее не рассматривалась в большей степени по экономическим причинам.

2. Стало очевидным, что, используя для построения аэрокосмических систем повышенной сложности обычные схемы на дискретных компонентах, нельзя достичь требуемых характеристик надежности, стоимости, и уменьше-

ния массогабаритных показателей.

Несмотря на стремительные темпы развития электроники, гибридные интегральные микросхемы (ГИС) и на сегодняшний день остаются востребованными для изготовления микросхем частного (ограниченного) применения.

Микросхемы существенно отличаются друг от друга по конструкции, по размерам и технологии изготовления. Показателем качества ГИС являются электрические параметры, зависящие от конструкционных параметров, которые в свою очередь определяются технологией их изготовления. Применение микросхем повышает надежность радиоэлектронной аппаратуры.

В связи с этим, изучение дисциплины «Микроэлектроника» и выполнение курсовой работы по проектированию гибридных интегральных микросхем сохраняют свою актуальность, поскольку формируют конкретные навыки и умения в проектировании и разработке конструкций ГИС, а также выборе оптимальной технологии изготовления.

Курсовая работа выполняется с целью закрепления полученных теоретических знаний и приобретения студентами практических навыков проектирования гибридных интегральных схем различной степени интеграция.

Курсовая работа предусматривает расчет и разработку топологии и конструкции функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры в виде гибридных интегральных схем, обоснование и выбор материалов и технологии изготовления пассивных пленочных элементов.

В качестве разрабатываемого объекта студенту предлагается функциональный узел, несложный блок или часть блока со всеми необходимыми для проектирования данными. Тему и вариант курсовой работы выдает руководитель.

Содержание курсовой работы

Курсовая работа состоит из двух частей: пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка должна включать:

– задание на проектирование;

– анализ объекта проектирования;

– выбор и технико-экономическое обоснование укрупненного технологического процесса;

– выбор и обоснование материалов элементов микросхемы;

– конструктивные расчеты;

– выбор корпуса и обоснование топологии микросхемы;

– обоснование выбранного варианта конструкции функционального узла;

– описок используемой литературы;

– оглавление.

Графическая часть должна содержать:

– принципиальную электрическую схему функционального узла;

– сборочный чертеж микросхемы;

– чертеж топологии функционального узла.

Чертежи графической части могут выполняться в карандаше на листах ватмана соответствующего стандартного формата либо в среде проектирования «Компас». Оформление чертежей и других конструкторских и технологических документов должно быть выполнено в соответствии с требованиями ЕСКД и ЕСТД.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ИМС

1.1. Конструктивно-технологические особенности

В основу разработки гибридных ИМС положены функционально узловой метод конструирования и групповые методы изготовления.

Основные особенности, которые необходимо учитывать при разработке ГИС, обусловлены их конструктивно-технологическим исполнением.

В конструктивном отношении ГИС представляет собой заключенную в корпус плату, на поверхности которой сформированы пленочные элементы и смонтированы компоненты.

Тип конструкции определяется материалом и размером платы, способом формирования пленочных элементов, типами компонентов и способами их монтажа на плату, типом корпуса и способом монтажа платы в корпусе. По способу формирования пленочных элементов ГИС, как уже отмечалось, подразделяются на тонкопленочные и толстопленочные. Вид технологии определяет материал и размер платы, который в свою очередь определяет типоразмер корпуса.

В качестве компонентов в ГИС используют кристаллы полупроводниковых приборов и ИМС.

В зависимости от способа монтажа ГИС подразделяются на микросхемы с жесткими и гибкими выводами компонентов. В последнем случае сначала производят крепление компонентов на плату, а затем производят присоединение проволочных выводов.

Компоненты с жесткими выводами монтируются с помощью шариковых, столбиковых, балочных или ленточных выводов. При этом, как правило, не требуется предварительного крепления компонентов на плате, так как необходимая жесткость и механическая прочность обеспечивается с помощью этих выводов.

Монтаж платы в корпус включает в себя закрепление платы на основании корпуса и последующее присоединение периферийных контактных площадок с выводами корпуса.

В общем случае выбор типа конструкции ГИС и технологии ее изготовления обусловлен как техническими параметрами схемы и условиями ее эксплуатации, так и экономическими факторами.

Техническое задание на проектирование содержит сведения о характеристиках разрабатываемой ИМС и является исходной информацией для проектирования. Типовое техническое задание содержит следующие сведения:

* *принципиальную электрическую схему с перечнем элементов;*
* *характеристики рабочего сигнала;*
* *электрические характеристики ИМС;*
* *напряжение питания;*
* *условия эксплуатации.*

Проектирование ГИС включает в себя выбор типов компонентов, расчет и конструирование пленочных элементов, а также разработку топологической структуры и конструкции всей микросхемы. При решении вопроса о количестве схем на одной подложке важно определить удобный для производства размер подложки, возможность сборки ГИС, а также свести к минимуму число межэлементных соединений, учитывая при этом необходимость решения проблемы теплоотвода.

Поэтому важным моментом при проектировании ГИС является определение функциональной сложности схемы с учетом перечисленных факторов.

1.2. Определение функциональной сложности

Интегрально-групповая технология изготовления пассивной части ГИС позволяет реализовать на одной плате либо несколько однотипных схем, либо одну схему повышенной функциональной сложности.

Поэтому определение функциональной сложности сводится к определению оптимального числа элементов, реализуемых в составе одной ГИС с учетом как функционально-узлового метода проектирования, так и процента выхода годных схем и экономических затрат на их производство.

Пусть на плате размещено N однотипных элементов, характеризующихся одинаковой вероятностью изготовления одного годного элемента P, которая не

зависит от числа элементов на плате, а определяется только случайными дефектами и отклонениями параметров. Тогда вероятность изготовления одной годной платы с N элементами:

$$P_n = P^n P_0; \tag{1.1}$$

где P_0 – вероятность выхода годных плат, обусловленная общими для всех подложек факторами и не зависящая от числа элементов.

При этом, если схема содержит m элементов, то с учетом брака общее число плат:

$$n = \frac{m}{NP^N P_0}; \tag{1.2}$$

Поскольку число элементов m в схеме задано, то и минимальное число плат с учетом брака будет при наибольшем значении знаменателя в (1.2). Для определения оптимального значения числа однотипных элементов $N_{опт}$ произведение $NP^N P_0$ представим в виде функции:

$$y = xP^x P_0; \tag{1.3}$$

и найдем ее максимальное значение.

Приравняв первую производную функцию (1.3) к нулю и произведя соответствующие преобразования, получим:

$$y' = (xp^x \ln p + p^x)P_0 = 0; \tag{1.4}$$

или

$$x = -\frac{1}{\ln P}; \tag{1.5}$$

Следовательно, при известной вероятности изготовления годного элемента P, оптимальное число элементов на плате:

$$N_{опт} = -\frac{1}{\ln P}; \tag{1.6}$$

Так как $P \leq 1$, то $N_{опт}$ всегда положительное число.

Однако разрабатываемые ГИС содержат не только однотипные элементы, которые по воспроизводимости свойств сильно различаются в зависимости от размеров и конфигурации, но также и разнотипные элементы (резисторы, конденсаторы, навесные компоненты), характеризующиеся различной вероятностью брака. В этом случае для определения оптимальной сложности ГИС все

однотипные элементы с примерно одинаковой вероятностью брака разбивают на группы и принимают условие, что вероятность брака одного элемента в группе не зависит от числа элементов в группе, а определяется только технологией и конструкцией элемента. Тогда по аналогии с (1.2) общее число плат:

$$n = \frac{m}{N_{\Sigma} P_1^{N_1} P_2^{N_2} \ldots P_k^{N_k} P_0}; \qquad (1.7)$$

где N_1, N_2, ... N_k – число элементов в каждой из K групп;

P_1, P_2, ... P_k – средние вероятности изготовления годного элемента в каждой из этих групп;

$N_{\Sigma}=N_1+N_2...+N_k$ – общее число элементов в ГИС.

В этом случае оптимальное число элементов на плате:

$$N_{\text{опт}} = -\frac{1}{\ln\left(P_1^{N_1} P_2^{N_2} \ldots P_k^{N_k}\right)}; \qquad (1.8)$$

В результате определения функциональной сложности оформляется электрическая схема на узел, которая подлежит реализации в гибридном исполнении.

1.3. Методы оптимизации ГИС по критерию функциональной точности

Оптимальность топологической структуры ГИС заданной функциональной сложности достигается определением оптимальной конфигурации пленочных элементов и оптимальным размещением элементов и компонентов на плате заданного размера.

В свою очередь оптимальная конфигурация каждого из пленочных элементов и всей пассивной части ГИС определяется совокупностью факторов, основными из которых являются требуемые выходные параметры ГИС, номинальные значения элементов и допуски на них, требуемая плотность размещения, свойства материалов пленочных элементов, электрические режимы и так далее.

Одним из эффективных методов оптимизации является метод, основанный на выборе наиболее важного выходного параметра ГИС и оптимизация его при заданных пределах изменения остальных параметров. При этом задача сво-

дится к установлению зависимости между выбранным выходным параметром и параметрами элементов ГИС с последующей оптимизацией значений параметров по критерию минимальной погрешности, то есть по критерию функциональной точности.

В общем случае выходной параметр «y» ГИС является функцией параметра составных элементов:

$$y = y\,(x_1, x_2, \ldots x_i, \ldots x_n); \tag{1.9}$$

где x_i – параметр i–го элемента, n – число элементов.

Спецификой производства ГИС является изготовление пассивной части в течение одного технологического цикла, что исключает межоперационную отбраковку пленочных элементов.

Однако, в реальных условиях параметры элементов отличаются от номинальных значений вследствие неизбежного технологического разброса, что в свою очередь приводит к отклонению выходного параметра от расчетного значения.

Абсолютную погрешность выходного параметра Δy определяют дифференцированием выражения (1.9) и после перехода к конечным приращениям имеет место выражение:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i\,; \tag{1.10}$$

где Δx_i и Δy – абсолютные погрешности i-го элемента и выходного параметра, соответственно (размерные величины).

На практике при проектировании ГИС удобнее оперировать относительными погрешностями, что позволяет суммировать погрешности различных физических величин (сопротивлений, емкостей и так далее). Относительный разброс выходного параметра:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \right) \frac{\Delta x_i}{x_i}\,; \tag{1.11}$$

или

$$\Delta \overline{y} = \sum_{i=1}^{n} A_{x_i}^{y} \Delta \overline{x}_i\,; \tag{1.12}$$

где $A_{x_i}^{y} = \frac{\partial y}{\partial x_i}\frac{x_i}{y}$ – коэффициент влияния i-го элемента на выходной параметр ГИС;

$\Delta\bar{y}$ и $\Delta\bar{x}_i$ – относительные погрешности выходного и x_i-го параметров, соответственно.

Учитывая, что распределения параметров элементов ГИС характеризуются большими дисперсиями, которые приводят к значительным дисперсиям выходных параметров, для расчета погрешности выходного параметра ГИС можно использовать уравнение:

$$\bar{\sigma}_y^2 = \sum_{i=1}^{n} A_{x_i}^2 \bar{\sigma}_{x_i}^2 + 2\sum_{i<j} A_{x_i} A_{x_j} \bar{\sigma}_{x_i} \bar{\sigma}_{x_j} r_{x_i x_j}; \qquad (1.13)$$

здесь $\bar{\sigma}_y = \frac{\sigma_y}{y}, \bar{\sigma}_{x_i} = \frac{\sigma_{x_i}}{x_i}$ – относительные среднеквадратические отклонения выходного и x_i-го параметров ГИС;

$r_{x_i x_j}$ – коэффициент корреляции отклонений параметров i-го и j-го элементов;

A_{x_i}, A_{x_j} – коэффициенты влияния i-го и j-го элементов.

Одной из главных задач при проектировании ГИС является минимизация погрешности выходного параметра, так как чем меньше величина $\Delta\bar{y}$ и $\bar{\sigma}_y$, тем выше вероятность выхода годных ГИС.

При этом необходимо учитывать особенности интегрально-групповой технологии изготовления пассивной части ГИС, заключающиеся в том, что:

1. Имеет место тесная корреляционная связь между параметрами однотипных элементов, в частности, связь между разбросом рядом расположенных однотипных элементов близка к функциональной, то есть $r_{x_i x_j} \approx 1$;
2. Имеет место нормальный закон распределения погрешностей параметров пленочных элементов при стабильном технологическом процессе и отсутствии отбраковки между отдельными операциями;
3. И, наконец, имеет место независимость погрешностей параметров пленочных элементов, изготовленных на разных технологических операциях.

   Прежде всего, это означает, что дисперсию выходного параметра ГИС

можно представить как сумму дисперсий выходного параметра от комплексов элементов, изготовляемых на взаимно независимых операциях (комплексы резисторов, конденсаторов и так далее).

Следовательно:

$$\overline{\sigma}_y^2 = \sum_{i=1}^{m} \overline{\sigma}_{y_i}^2 \; ; \qquad (1.14)$$

где m – число комплексов пленочных элементов, полученных на взаимно независимых операциях;

$\overline{\sigma}_{y_i}$ – относительное среднеквадратическое отклонение выходного параметра от i-го комплекса пленочных элементов.

Тогда каждое значение $\overline{\sigma}_{y_i}$ может быть минимизировано независимо от других комплексов элементов.

Кроме того, при анализе отклонения выходного параметра можно перейти от погрешностей комплексов пленочных элементов к погрешностям геометрических и физических параметров элементов, являющихся следствием взаимно независимых технологических операций (ширина и длина резисторов, удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки и так далее). При этом выражение (1.13) значительно упрощается, так как абсолютные отклонения геометрических и физических параметров элементов будут одинаковыми в пределах каждого комплекса. Следовательно, за $\overline{\sigma}_{y_i}$ можно принять среднеквадратическое отклонение выходного параметра ГИС от погрешности каждого из взаимно независимых комплексов геометрических и физических параметров пленочных элементов.

Кроме того необходимо отметить, что в производственных условиях изготовления ГИС факторы, определяющие разброс параметров элементов в пределах одной подложки, не зависят от факторов, вызывающих дисперсию средних значений параметров в партии.

Поэтому дисперсию $\overline{\sigma}_{ij}$ геометрического или физического параметра j-го элемента в i-м комплексе можно представить суммой дисперсии этого параметра в пределах одной подложки $\overline{\sigma}_{ij\text{п}}$ относительно его среднего значения на каж-

дой отдельной подложке и дисперсии средних значений этого параметра на подложках всей партии $\overline{\sigma}_{ij\text{ср}}$:

$$\overline{\sigma}^2_{y_{ij}} = \overline{\sigma}^2_{ij\text{п}} + \overline{\sigma}^2_{ij\text{ср}}. \qquad (1.15)$$

Тогда дисперсия выходного параметра ГИС от *j*-го комплекса:

$$\overline{\sigma}^2_{y_{ij}} = A^2_{ij}\overline{\sigma}^2_{ij\text{п}} + A^2_{ij}\overline{\sigma}^2_{ij\text{ср}}. \qquad (1.16)$$

Полагая, что дисперсия геометрических или физических параметров элементов не зависит от расположения элементов на подложке, коэффициенты корреляции $r_{x_i x_j}$ между параметрами всех элементов в пределах одной подложки можно принять равными нулю. Однако, вследствие того, что среднее значение этих параметров для всех элементов отдельной подложки одно и то же, коэффициент корреляции для средних значений равен единице.

Таким образом, дисперсия выходного параметра от всех n_i элементов *i*-го комплекса, то есть для *i*-го технологического фактора, может быть представлена выражением:

$$\overline{\sigma}^2_{y_i} = \overline{\sigma}^2_{ij\text{п}} \sum_{j=1}^{n_i} A^2_{ij} + \overline{\sigma}^2_{ij\text{ср}} \left(\sum_{j=1}^{n_i} A_{ij} \right)^2. \qquad (1.17)$$

Для выявления возможностей минимизации погрешности выходного параметра рассмотрим более подробно составляющие погрешности выходного параметра. Можно утверждать, что эта погрешность складывается из погрешностей всех пассивных элементов ГИС и всех активных компонентов, то есть:

$$\overline{\sigma}^2_{y} = \overline{\sigma}^2_{y\text{а}} + \overline{\sigma}^2_{y\text{п}} \qquad (1.18)$$

Очевидно, что при этом данные составляющие независимы, так как процессы изготовления пассивной и активной частей ГИС разделены как во времени, так и в пространстве. Таким образом, проблема минимизации погрешности выходного параметра ГИС сводится к решению задачи минимизации погрешности выходного параметра за счет пассивной части ГИС, которая в свою очередь складывается из взаимонезависимых погрешностей комплексов резисторов, конденсаторов и так далее. Тогда:

$$\overline{\sigma}^2_{y_n} = \overline{\sigma}^2_{y_r} + \overline{\sigma}^2_{y_c} + \text{K}. \qquad (1.19)$$

Далее для минимизации погрешности выходного параметра за счет пас-

сивной части ГИС необходимо минимизировать каждую составляющую (1.19), для чего необходимо рассмотреть вопросы проектирования резисторов, конденсаторов и иных элементов.

1.4. Расчет допустимых среднеквадратических отклонений параметров пленочных элементов

При изготовлении ГИС параметры элементов схемы имеют отклонения от своих номинальных значений. Это приводит к отклонению значений выходных параметров схемы. Если значение выходного параметра микросхемы выходит за пределы допуска, который задается техническими требованиями на схему, то микросхема считается бракованной.

На процент выхода годных микросхем влияет также качество паяных или сварных соединений выводов навесных элементов или навесных проводников с контактными площадками, которое определяется технологией создания соединения и способом нанесения самих контактных площадок.

Таким образом, вероятность выхода годных схем можно записать в следующем виде:

$$P = \prod_{j=1}^{m} P_j \cdot \prod_{i=1}^{n} P_i \cdot \prod_{k=1}^{l} P_k \qquad (1.20)$$

где P_i – вероятность выхода годных пассивных элементов с точки зрения точности;

P_k – вероятность выхода годных активных элементов после установки их в ГИС;

P_j – вероятность выхода годного паяного или сварного соединения (эта величина, как правило, для ГИС лежит в пределах 0,98 – 0,99).

Величина P_i зависит от допуска на номинал данного пассивного элемента δ_i и его относительного среднеквадратического отклонения σ_i следующим образом:

$$P_i = P_i(Z_i), \qquad (1.21)$$

$$Z_i = \frac{\overline{\delta_i}}{\sqrt{2}\overline{\sigma_i}}, \qquad (1.22)$$

где Z_i – аргумент интеграла вероятности (зная значение Z_i, по таблицам интеграла вероятности можно определить величину P_i);

$\overline{\delta_i}$ – допуск на номинал элемента схемы в относительных единицах (он оговаривается в технических требованиях на схему).

При разработке топологии необходимо учитывать требования интегральной технологии:

1. Независимость разброса параметров комплексов элементов, получаемых на разных операциях. Например, дисперсия сопротивления квадрата резистивной пленки не зависит от дисперсии удельной емкости диэлектрика. Обе они, в свою очередь, не зависят от дисперсии размеров контуров элементов и т.д.

2. Достаточная обоснованность закона нормального распределения параметров элементов при стабильном технологическом процессе и отсутствии отбраковки между операциями, что подтверждается как теоретическими, так и практическими исследованиями.

3. Полное разделение производства и контроля активной части схемы (навесные транзисторы, диоды, бескорпусные ИС) от пассивной части (пленочные элементы), что позволяет отдельно решать задачи влияния дисперсии этих частей на выходные параметры схемы. При необходимости для комплексов активной части можно использовать отбор, при этом в (1) все $P_к$ можно приравнять к единице.

Для расчета выхода годных пассивных элементов из (I) получим

$$P_{icp}\ ;\ \sqrt[n]{\frac{P}{\prod_{j=1}^{m} P_j \cdot \prod_{k=1}^{l} P_k}}\ , \qquad (1.23)$$

где P_{icp} – средний выход годного пассивного элемента. В дальнейшем P_i каждого элемента может корректироваться. Для элементов с малыми $\overline{\delta_i}$ следует брать $P_i < P_{icp}$, для элементов с большими $\overline{\delta_i}$ выбирают $P_i > P_{icp}$. Изменения P_i берут с таким расчетом, чтобы обеспечить (1.20).

По полученным P_i и по (1.22) определяют необходимое относительное среднеквадратическое отклонение номиналов пассивных элементов:

$$\overline{\sigma_i} = \frac{\delta_i}{\sqrt{2}Z_i} \tag{1.24}$$

Технология изготовления микросхемы выбирается исходя из конструктивных требований или имеющегося техпроцесса изготовления ГИС. Виды технологического процесса изготовления микросхем приведены в приложении, где даны и характеристики погрешностей воспроизведения размеров элементов.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под пленочными ИМС и на какие разновидности они подразделяются?
2. В чем состоит определение функциональной сложности ГИС?
3. Что понимается под методом оптимизации ГИС по критерию функциональной точности?
4. От чего зависит вероятность выхода годных ГИС?

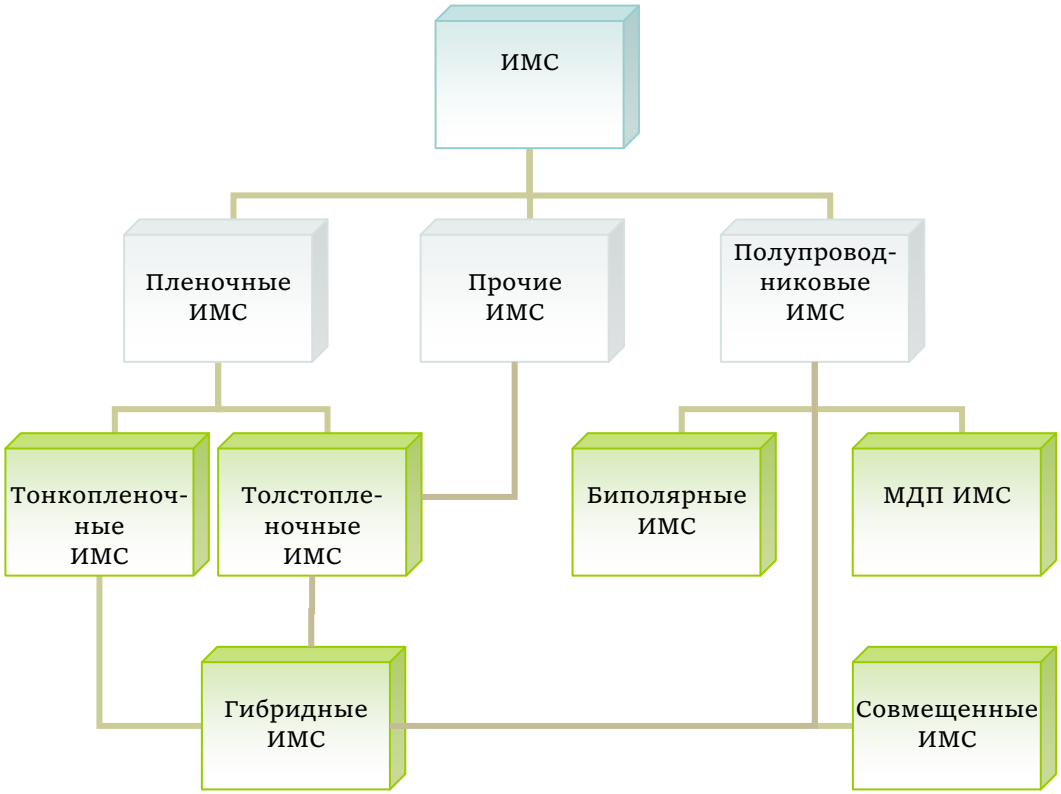
Глава 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Элемент микросхемы (МС) – это часть МС, реализующая функцию какого – либо радиоэлемента, например, резистора, конденсатора и т.д., которая выполнена нераздельно от подложки или кристалла и не может быть выделена как самостоятельное изделие, с точки зрения требования приемки, испытания, поставки и эксплуатации.

Компонент МС это тоже часть МС, реализующая какую - либо функцию радиоэлемента, которая, однако, может быть выделена как самостоятельное изделие. Компоненты присоединяются на этапе сборки МС.

В соответствии с принятой системой условных обозначений и по конструктивно - технологическому признаку все выпускаемые МС можно разделить на полупроводниковые, пленочные и гибридные.

Классификация интегральных микросхем по конструктивно-технологическому признаку выглядит следующим образом.



Наибольшее распространение получили пленочные ИМС, биполярные и МДП совмещенные ИМС.

Каждый тип ИМС имеет свою технологию производства, регламентируемую комплектом технологической документации. Однако, можно выделить общие этапы, присущие технологии производства любой МС.

1. Изготовление и подготовка пластин и подложек
2. Изготовление структур
3. Сборка
4. Герметизация
5. Испытания, измерения
6. Заключительные операции
7. Контроль ОТК

2.1. Технология изготовления тонкопленочных ИМС

Этап формирования структуры элементов ИМС является самым трудоемким.

Элементы тонкопленочных ГИМС формируют на основе проводящих, резистивных, диэлектрических, магнитных пленок, толщина которых колеблется от 30 до 1000 нм. Вид сверху и структура тонкопленочного резистора и трехслойного конденсатора представлены на рисунке 2-1.

Функциональный параметр резистора – сопротивление R

$$R = \rho_{пл} L/dB = \rho_{\square} L/B$$

Функциональный параметр конденсатора – емкость C.

$$C = \varepsilon\, \varepsilon_0 LB/d = C_{уд}\, S,$$

где $\rho_{пл}$ –удельное электрическое сопротивление резистивной пленки, Ом.м;

$\rho_{\square}$ - сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом;

ε, ε_0, – диэлектрическая проницаемость диэлектрической пленки и воздуха, соответственно;

$C_{уд}$ – емкость единицы площади перекрытия обкладок конденсатора, пФ/мм^2;

L, B – соответственно длина и ширина резистивной пленки, мм;

S – площадь перекрытия обкладок конденсатора, мм^2.

Точность геометрических размеров элементов обеспечивается применением масок и фотолитографии.

Точность удельных электрических параметров зависит от чистоты материалов и технологических параметров процесса осаждения пленок

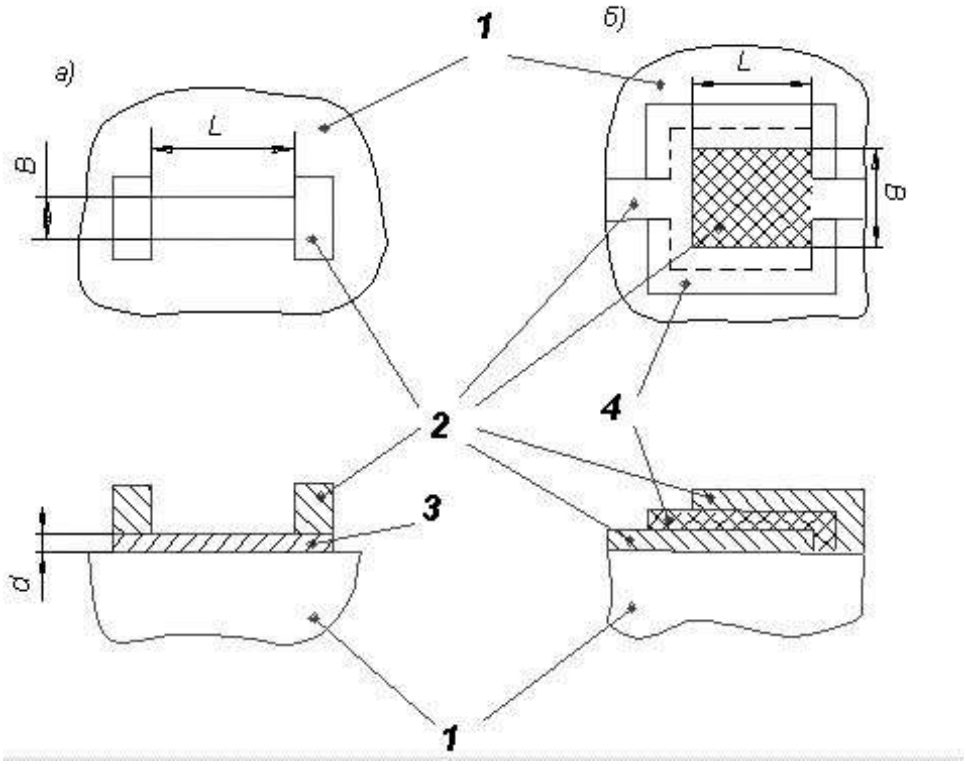


Рисунок 2.1. Структуры и топологии тонкопленочных: а) резистора; б) трехслойного конденсатора: 1-подложка; 2-проводящая пленка; 3-резистивная пленка; 4-диэлектрическая пленка

ТОПОЛОГИЯ микросхемы – это вид сверху на подложку (пластину)

СТРУКТУРА микросхемы – это вид поперечного сечения микросхемы

2.2. Осаждение пленок термическим испарением материала в вакууме

Для получения тонких пленок используется стандартное вакуумное оборудование, например, универсальные вакуумные установки типа УВН-2М-1, УВН-2М-2 и другие.

Упрощенная схема рабочего объема вакуумной установки показана на рисунке 2-2.

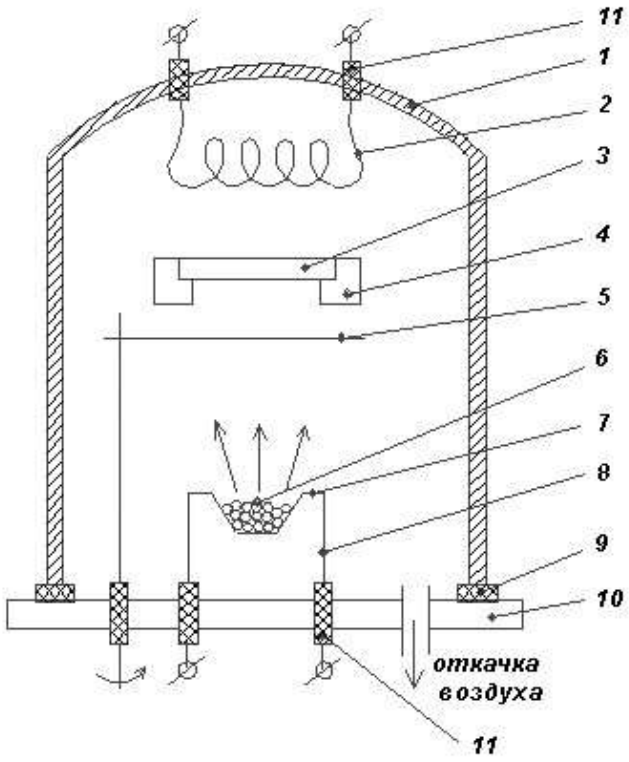


Рисунок 2.2. Схема рабочего объема установки для получения пленок методом ТВИ: 1-колпак; 2-нагреватель подложки; 3-подложка; 4-подложкодержатель; 5-заслонка; 6-испаряемый материал; 7-испаритель; 8-нагреватель испарителя; 9-вакуумное уплотнение; 10-плита; 11-вакуумплотный изолятор

С помощью вакуумных насосов откачивается воздух из замкнутого пространства – рабочего объема (РО) вакуумной установки.

В условиях высокого вакуума (10^{-5} – 10^{-6} мм рт. ст.≈1,33(10^{-3} –10^{-4}) Па материал, помещенный в испаритель, нагревается и испаряется в направлении к подложке. Атомы (молекулы) испаряемого вещества движутся к подложке, где конденсируются, образуя пленку. Скорость роста пленки, ее структура определяются технологическими параметрами процесса, основными из которых являются температура испарителя, температура подложки, давление остаточного газа, молекулярная масса испаряемого вещества и его природа. Имеют значение также и геометрические параметры конструктивных элементов РО.

Реально методом термического вакуумного испарения напыляют пленки толщиной не более 1,5 – 2 мкм.

Хорошую адгезию к диэлектрическим подложкам обнаруживают легкоокисляющиеся металлы, такие как *Al, Cr, Mn, Ti*. Плохую адгезию имеют такие высокоэлектропроводные металлы как *Cu, Au, Pt, Pd.*

При организации серийного производства изделий всегда стоит задача сокращения доли вспомогательного времени, приходящегося на одно изделие. При обработке ИМС в вакууме вспомогательное время включает установку и снятие подложек (≈10 – 15 мин.); откачку системы до рабочего вакуума (≈1,5 – 2 часа при разогретом диффузионном насосе). Основное время – напыление одного слоя, составляет примерно 1 – 1,5 мин. Поэтому для промышленных целей используют многопозиционные вакуумные установки, позволяющие, не нарушая вакуума, последовательно или одновременно обрабатывать несколько подложек. Эффект увеличивается еще за счет применения групповых подложек обычно размером 60*48*0,6 мм или 120*96*0,6 мм.

Общая схема ТП получения тонких пленок методом ТВИ

1. Подготовка (очистка) подложек;
2. Подготовка установки к напылению;
3. Сухая очистка подложек;
4. Создание рабочего вакуума;
5. Подача тока на испаритель, стабилизация процесса испарения;
6. Подача тока на нагреватель подложек;
7. Напыление;
8. Отжиг пленок(выдержка 2 – 2,5часа);
9. Запуск воздуха;
10. Контроль качества и электрофизических характеристик пленки.

2.3. Осаждение пленок распылением материалов ионной бомбардировкой

При бомбардировке поверхности твердого тела – мишени ионами с кинетической энергией, превышающей энергию межатомной связи мишени, происходит выбивание атомов с ее поверхности и выброс их в газовую фазу, т.е. происходит распыление мишени.

Минимальная энергия ионов, которая еще приводит к распылению мишени, называется пороговой энергией. Она зависит от масс сталкиваемых частиц и составляет приблизительно $4H$, где H – теплота сублимации, т.е. теплота, выделяемая при переходе в пар одного атома (или моля) материала мишени.

Простейшая схема такого процесса, 2-х электродная схема катодного распыления, представлена на рисунке 2-3.

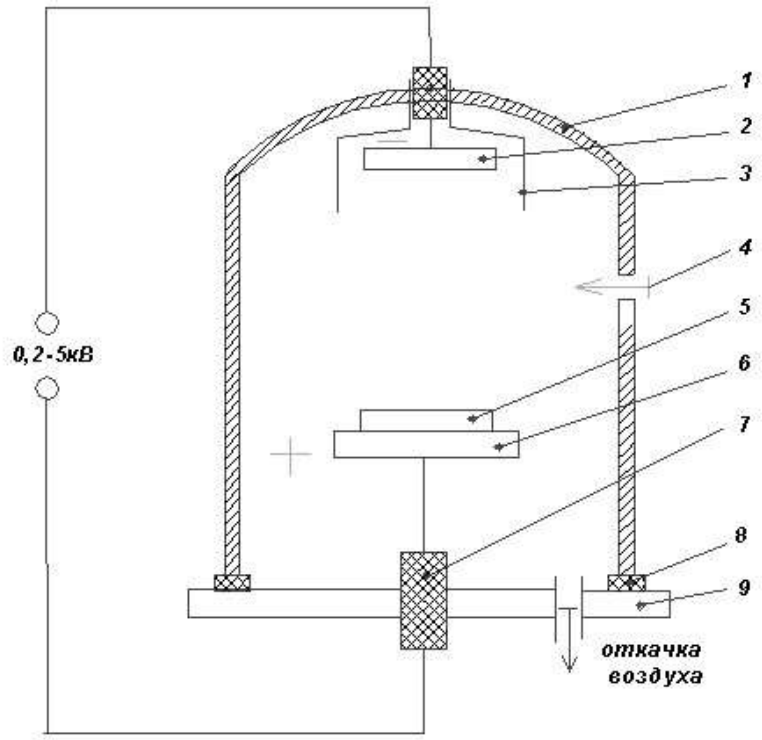


Рисунок 2.3. Двухэлектродная схема катодного распыления
1-колпак; 2-катод; 3-экран; 4-натекатель рабочего газа Ат; 5-подложка; 6-анод; 7-вакуумплотный изолятор; 8-вакуумное уплотнение; 9-плита

В такой системе плазма возбуждается автоэлектронной эмиссией. Под воздействием сильного внешнего электрического поля напряженностью 10^9 В/м электроны, эмитирующие с катода, ионизируют атомы рабочего газа. Положительные ионы в сильном поле ускоряются, ударяются о катод и выбивают атомы катода – мишени. Электрически нейтральные атомы мишени летят нормально от поверхности мишени и оседают на подложке, лежащей на аноде.

Скорость распыления $W_р$ пропорциональна плотности тока мишени $j_м$ и массе атомов мишени $m_м$.

$$W_р = K_р\, j_м\, m_м$$

Коэффициент пропорциональности $K_р$ называется коэффициентом распыления. Он равен отношению числа выбитых атомов к числу ионов, падающих на мишень. $K_р$ зависит от энергии ионов, от структуры поверхности мишени, от угла падения ионов и в значительной степени от природы ионов и

мишени. Максимальные коэффициенты распыления соответствуют ионам инертных газов и некоторому оптимальному давлению рабочего газа.

С целью повышения чистоты пленок, получаемых ионно-плазменным распылением материалов (И-ПР), и одновременно увеличения скорости осаждения пленок используют трехэлектродные схемы распыления или магнетронные распылительные системы.

По сравнению с ТВИ метод И-ПР позволяет распылять самые разные материалы, в том числе, сложные по составу, например, керметы, стали, пермаллои и т.д. Здесь есть возможность в едином цикле, меняя полярность электродов, производить ионную очистку подложек и осаждение пленки. Это способствует высокой степени интеграции технологических процессов.

Недостатком И-ПР по сравнению с ТВИ является сравнительно малая (≈0,5 нм/с) скорость осаждения, наличие в структуре пленки заряженных частиц и молекул газа, так как процесс идет при сравнительно низком вакууме.

Отечественная промышленность выпускает несколько типов установок для И-ПР. В основе своей они представляют собой вакуумные напылители, подобные установкам для ТВИ. Специфичным является наличие устройства для возбуждения и поддержания газового разряда, натекателей и более мощных источников питания. Примерами таких установок являются УВН-62П-1, ИОН-1В и другие.

Общая схема ТП получения тонких пленок методом И-ПР

1. Подготовка (очистка) подложек
2. Подготовка установки к напылению
3. Создание предварительного вакуума
4. Создание высокого вакуума
5. Запуск рабочего газа
6. Подача напряжения анод-катод
7. Напыление. Подача высокого отрицательного потенциала на мишень
8. Отжиг пленок. Выдержка 2,5 часа
9. Запуск воздуха
10. Контроль качества пленок и электрофизических характеристик

2.4. Формирование конфигурации пленочных элементов ГИМС

В основе формирования планарных размеров пленочных элементов МС лежат литографические процессы.

Литография в производстве МС это процесс переноса рисунка шаблона на поверхность пластины, подложки или маски.

Перенос рисунка шаблона осуществляется при облучении специального слоя либо ультрафиолетом, либо рентгеновскими лучами, либо потоком ионов или электронов. Соответственно процесс называется фото- , рентгено-, ионо- или электронолитографией.

В технологии производства ГИМС используется, в основном, фотолитография (ФЛ).

Если пленка напыляется на всю поверхность подложки, а затем методом ФЛ с последующим селективным травлением формируется рисунок слоя, то метод так и называется ФЛ. Если с помощью ФЛ изготавливают маску, то есть фольгу или пластину с отверстиями, соответствующими рисунку слоя, а затем через эту маску напыляют пленку, то метод называется масочным.

Масочный метод более дешевый, но менее точный. При выборе метода формирования рисунка резистивного и проводящего слоев руководствуются технологическими ограничениями, присущими каждому из двух основных методов (см. Таблицу 2.1).

Таблица 2.1 Технологические ограничения

Параметры	Масочный метод	Фотолитография
Максимальное L/B	10	50
Минимальный размер B, мкм	300	100
Точность размеров рисунка, мкм	÷20	÷5
Минимальное расстояние между элементами в одном слое, мкм	300	100

Для микросхем, содержащих резисторы, проводники и конденсаторы используют часто комбинированный метод, совмещающий масочный и фотолитографический методы для отдельных слоев.

При использовании масочного метода точность изготовления резисторов и конденсаторов не более ÷10%. При использовании ФЛ максимально достижимая точность элементов ÷1%.

2.5. Варианты изготовления платы ГИМС или Мсб

Варианты нанесения пленок:

а) Термическое вакуумное испарение – ТВИ;

б) Ионоплазменное распыление – И-ПР.

Варианты формирования конфигурации элементов ГИМС и Мсб, содержащих резисторы, конденсаторы и проводники:

1. Масочный метод

Нанесение через маски:

1 – резисторов;

2 – проводников;

3 – нижних обкладок конденсаторов;

4 – диэлектрика;

5 – верхних обкладок конденсаторов;

6 – защитного слоя.

2. Комбинированный метод - 1

1 – напыление через маску резисторов;

2 – напыление проводникового слоя на всю поверхность;

3 – фотолитография проводников;

4 – напыление через маску нижних обкладок конденсаторов;

5 – напыление через маску диэлектрика;

6 – напыление через маску верхних обкладок конденсаторов;

7 – нанесение защитного слоя.

3. Комбинированный метод - 2

1 – напыление резистивной пленки на всю поверхность;

2 – напыление проводниковой пленки на всю поверхность;

3 – фотолитография проводников и резисторов (формирование ширины резисторов);

4 – фотолитография проводников (формирование длины резисторов);

5 - напыление через маску нижних обкладок конденсаторов;

6 – напыление через маску диэлектрика;

7 – напыление через маску верхних обкладок конденсаторов;

8 – нанесение защитного слоя.

Варианты формирования конфигурации элементов ГИМС и МСБ, содержащих резисторы и проводники:

4. Комбинированный метод - 3

1 – напыление резистивной пленки на всю поверхность;

2 - фотолитография резистивной пленки (формирование ширины резисторов);

3 – напыление через маску проводников (формирование длины резисторов);

4 – нанесение защитного слоя.

5. Комбинированный метод - 4

1 – напыление резистивной пленки на всю поверхность;

2 – напыление через маску проводников (формирование длины резисторов);

3 – фотолитография резистивного слоя (формирование ширины резисторов);

4 – нанесение защитного слоя.

6. Комбинированный метод - 5

1 – напыление через маску резисторов;

2 – напыление проводниковой пленки на всю поверхность;

3 – фотолитография проводников (формирование длины резисторов);

4 – нанесение защитного слоя.

7. Метод фотолитографии - 1

1 – напыление резистивной пленки на всю поверхность;

2 – напыление проводниковой пленки на всю поверхность;

3 – фотолитография проводников (формирование длины резисторов);

4 – фотолитография резисторов (формирование ширины резисторов);

5 – нанесение защитного слоя.

8. Метод фотолитографии - 2

1 – напыление резистивной пленки на всю поверхность;

2 – напыление проводниковой пленки на всю поверхность;

3 – фотолитография проводников и резисторов (формирование ширины резисторов);

4 – фотолитография проводников (формирование длины резисторов);

5 – нанесение защитного слоя.

Если резистивных слоев два, то первым напыляется высокоомный слой. Для формирования рисунка резисторов добавляется цикл ФЛ в вариантах 6 и 7.

При разработке технологического процесса изготовления платы ГИМС или МСБ следует учитывать материал проводящей пленки, помня о том, что благородные металлы и медь требуют адгезионного подслоя, роль которого может выполнять резистивный слой. Если используется алюминий, то такого требования нет.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под гибридной ИМС?
2. В чем отличие элемента ИМС от компоненты
3. Классификация ИМС по конструктивно-технологическим признакам
4. Что такое фотолитография и каково ее назначение?
5. Перечислите методы формирования тонких пленок.
6. Какова роль адгезионного подслоя и какие материалы могут использоваться для этих целей?
7. Что понимается под структурой и топологией микросхемы?

Глава 3. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

3.1. Расчет геометрических размеров пленочных резисторов

Исходными данными для расчета геометрических размеров резисторов являются:

– сопротивления резисторов;

– расчетные значения мощностей рассеяния;

– параметры выбранного технологического процесса;

– технологический разброс геометрических размеров;

– дисперсия $\overline{\sigma_{R_i}^2}$ отклонения номинала резистора.

Цель расчета – выбор материалов и определение геометрических размеров и формы пленочных резисторов, обеспечивающих получение резисторов с заданными, воспроизводимыми и стабильными характеристиками.

Пленочные резисторы представляют собой полоску резистивной пленки “1”, снабженную пленочными контактами “2” (рисунок 3.1).

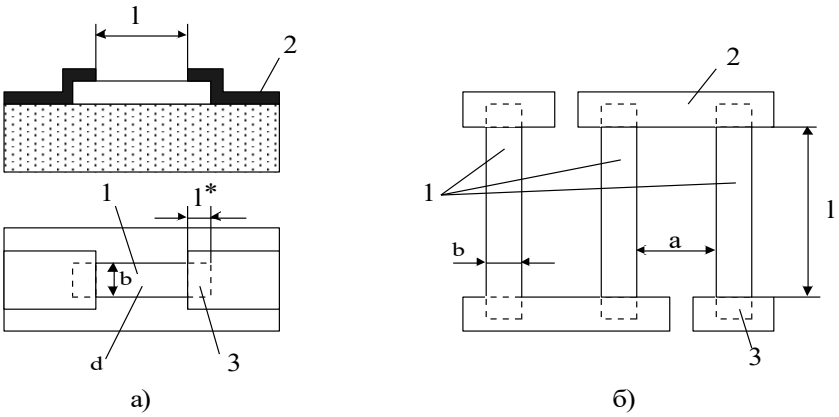


Рисунок 3.1. Модель пленочных резисторов

1 - резистивная плёнка; 2 - плёночный проводник; 3 – области контактов

Пленочные резисторы характеризуются такими основными параметрами как номинальное значение сопротивления R_0, допуск на сопротивление $\pm\delta_r$, мощность рассеяния P, температурный коэффициент сопротивления α_r, коэффициент старения, интервал рабочих температур, надежность и так далее. Эти параметры в свою очередь зависят от материала резистивной пленки, способа нанесения пленки на подложку, способа получения необходимой конфигурации

и других технологических факторов.

Наиболее распространенной является конструкция резисторов прямоугольной формы.

Значения сопротивления пленочного резистора определяется как:

$$R = \frac{\rho_{пл} l}{bd} + 2R_к; \qquad (3.1)$$

где $\rho_{пл}$ – удельное сопротивление пленочного резистивного материала;

l, b, d – длина, ширина и толщина резистивной пленки;

$R_к$ – переходное сопротивление областей контактов резистивной и проводящей пленок.

Характерной особенностью резистивных пленок является зависимость удельного сопротивления материала пленки от толщины, причем эта зависимость связана с условиями нанесения пленок. С точки зрения технологичности нанесения пленки, воспроизводимости и стабильности ее свойств каждый материал характеризуется определенной толщиной, для которой удельное сопротивление материала является оптимальным. Поэтому в технологии микроэлектроники для каждого материала отношение $\rho_{пл}/d = \rho_{\square}$ [Ом] – величина постоянная. Численно эта величина равна сопротивлению пленочного резистора квадратной формы, причем не зависящая от размеров квадрата. Отсюда и название $\rho_{\square}$ – сопротивление квадрата резистивной пленки. Так как для высокоомных резисторов сопротивление контактных областей значительно меньше сопротивления резистивной пленки, сопротивление пленочного резистора является функцией сопротивления $\rho_{\square}$ и геометрических размеров:

$$R = \rho_0 \frac{l}{b} = \rho_0 K_ф; \qquad (3.2)$$

где $K_ф = l/b$ – коэффициент формы резистора.

Полная относительная погрешность резистора определяется суммой погрешностей его изготовления (производственная составляющая) и погрешностей, обусловленных влиянием условий эксплуатации, а именно:

$$\Delta\overline{R} = \Delta\overline{R}_{пр} + \Delta\overline{R}_{t^\circ} + \Delta\overline{R}_{ст} + \Delta\overline{R}_к; \qquad (3.3)$$

где $\Delta\overline{R}_{пр} = \Delta\overline{\rho}_0 + \Delta\overline{l} - \Delta\overline{b}$; $\Delta\overline{R}_{t^\circ} = \alpha_R \Delta T$; $\Delta\overline{R}_{ст}$ – характеризуют темпера-

турную и временную нестабильность резистора;

$\Delta R_к$ – погрешность переходных сопротивлений областей контакта.

Допуск на номинальное сопротивление δ_R определяется относительным изменением сопротивления пленочного резистора, вызванным любыми дестабилизирующими факторами и обусловленным технологическими погрешностями производства и в силу этого $\Delta\overline{R} \le \delta_R$.

В силу того, что для высокоомных резисторов относительная погрешность определяется в основном шириной резистивной пленки, расчетное значение ширины резистора должно удовлетворять условию:

$$b_{расч} \ge \max\left\{ b_{техн}, b_{точн}, b_р \right\}; \qquad (3.4)$$

где $b_{техн}$, $b_{точн}$, $b_р$ – минимальные значения ширины резистора, обусловленные технологическими возможностями изготовления, точностью воспроизведения геометрических размеров и формы резистора, а также из условия обеспечения теплоотвода.

Минимально возможное значение ширины, обеспечивающее требуемую точность, согласно уравнению погрешностей определяется из соотношения:

$$b_{точн} \ge \frac{\Delta l / K_Ф - \Delta b}{\Delta\overline{R} - \Delta\overline{\rho}_0}; \qquad (3.5)$$

где $K_Ф = R_0 / \rho_0$ – коэффициент формы резистора;

Δl, Δb – абсолютные значения погрешностей длины и ширины резистора соответственно, определяемые технологическим процессом формирования рисунка.

Допустимая мощность рассеяния резистора $P_{доп}$ без изменения электрофизических свойств резистивного материала определяется удельной мощностью рассеяния P_0 материала пленки и площадью резистора S_R:

$$P_{доп} = P_0 S_R = P_0 l b = P_0 \frac{l^2}{K_Ф} = P_0 b^2 K_Ф; \qquad (3.6)$$

отсюда минимальное значение ширины, обеспечивающее теплоотвод:

$$b_p \ge \sqrt{\frac{P_{R_i}}{P_0 K_Ф}}. \qquad (3.7)$$

За ширину b резистора принимается ближайшее к $b_{расч}$ большее значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба.

Далее определяется длина резистора из соотношения $l = b_{расч} \cdot K_ф$. Для низкоомных резисторов с $K_ф < 1$ расчетное значение длины определяется из условия:

$$l_{расч} \geq \max\{l_{техн}, l_{точн}, l_p\}; \qquad (3.8)$$

где $l_{техн}$, $l_{точн}$ и l_p имеют тот же смысл, что и раньше (3.4). Здесь:

$$l_{точн} \geq \frac{\Delta l - \Delta b \cdot K_Ф}{\Delta \overline{R} - \Delta \overline{\rho}_0}; \qquad (3.9)$$

$$l_p \geq \sqrt{\frac{P_{R_i} \cdot K_Ф}{P_0}}. \qquad (3.10)$$

Далее определяется ширина резистора из соотношения $b = l_p / K_ф$. С учетом случайного характера распределения погрешностей геометрических размеров пленочных резисторов и при взаимно независимых операциях формирования резисторов, соотношения (3.5) и (3.9) примут вид:

$$b_{точн} \geq \sqrt{\frac{\sigma_b^2 + \sigma_l^2 / K_Ф^2}{\overline{\sigma}_R^2 - \overline{\sigma}_{\rho_0}^2}}; \qquad (3.11)$$

$$l_{точн} \geq \sqrt{\frac{\sigma_l^2 + \sigma_b^2 K_Ф^2}{\overline{\sigma}_R^2 - \overline{\sigma}_{\rho_0}^2}}; \qquad (3.12)$$

где $\overline{\sigma}_R = \frac{\sigma_R}{R}$; $\overline{\sigma}_{\rho_0} = \frac{\sigma_{\rho_0}}{\rho_0}$ – относительные среднеквадратические отклонения сопротивления резистора и сопротивления квадрата резистивной пленки соответственно;

σ_b и σ_l – среднеквадратические отклонения размеров.

Численное значение $\overline{\sigma}_R$ определяется требуемой точностью и вероятностью выхода годного резистора. Согласно неравенству Чебышева вероятность попадания случайной величины в заданный интервал определяется соотношением:

$$P\left(\left|\frac{R-R_0}{R_0}\right|<\delta_R\right)=\Phi(Z); \qquad (3.13)$$

где $\Phi(Z)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^Z e^{-t^2}dt$ – интеграл вероятности;

$Z=\delta_R/\sqrt{2}\overline{\sigma}_R$ – аргумент интеграла вероятности, определяющий взаимосвязь требуемой точности и относительного среднеквадратического отклонения сопротивления резистора.

При расчете высокоомных резисторов сложной конфигурации (рис.3.1б), реализованных в виде отдельных прямоугольных полосок, соединенных проводящими перемычками, после определения ширины резистора рассчитывают сумму длин резистивных полосок $l_\Sigma = bK_\Phi$, после чего определяют количество n резистивных полосок из условия:

$$n=\frac{l_\Sigma}{10b}. \qquad (3.14)$$

Расстояние a между резистивными полосками зависит от способа формирования конфигурации резистора. С целью минимизации занимаемой площади на практике, как правило, значение $a = b$.

3.2. Выбор и обоснование материала резистивной пленки

В связи с независимостью операций оформления длины и ширины, а также нанесения резистивной пленки i-го резистора из комплекса одновременно сформированных резисторов, можно записать:

$$\overline{\sigma}^2_{\Phi_i}=\overline{\sigma}^2_{R_i}-\overline{\sigma}^2_{\rho_0}=\overline{\sigma}^2_{b_i}+\overline{\sigma}^2_{L_i}, \qquad (3.15)$$

или, с учётом того, что $K_{\Phi_i}=\frac{l_i}{b_i}$, $\overline{\sigma}^2_{b_i}=\frac{\sigma^2_b}{b_i^2}$, $\overline{\sigma}^2_{l_i}=\frac{\sigma^2_l}{l_i^2}$,

$$\overline{\sigma}^2_{\Phi_i}=\frac{1}{l_i^2}\left(\sigma_l^2+\sigma_b^2\cdot K^2_{\Phi_i}\right), \qquad (3.16)$$

Очевидно, площадь, занимаемая одним резистором

$$S_{R_i}=\frac{l_i^2}{K_{\Phi_i}}, \qquad (3.17)$$

или с учётом (3.16) и $K_{\Phi_i} = R_i / \rho_0$

$$S_{R_i} = \frac{1}{\overline{\sigma}^2_{\Phi_i}} \left(\frac{\sigma_l^2 \rho_0}{R_i} + \frac{\sigma_b^2 R_i}{\rho_0} \right). \qquad (3.18)$$

Тогда площадь, занимаемая комплексом резисторов:

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} S_{R_i} = \sigma_l^2 \rho_0 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i \overline{\sigma}^2_{\Phi_i}} + \frac{\sigma_b^2}{\rho_0} \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{\overline{\sigma}^2_{\Phi_i}} . \qquad (3.19)$$

Дифференцируя это соотношение по интересующему нас параметру и, приравняв к нулю, получим:

$$\rho_{0\text{опт}} = \frac{\sigma_b}{\sigma_l} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} R_i \big/ \overline{\sigma}^2_{\Phi_i}}{\sum_{i=1}^{n} (R_i \overline{\sigma}^2_{\Phi_i})^{-1}}} . \qquad (3.20)$$

Видно, что существует оптимальное значение сопротивления квадрата резистивной пленки, минимизирующее площадь, занимаемую комплексом резисторов. Таким образом, соотношение (3.20) позволяет обоснованно выбирать материал резистивной пленки.

3.3. Расчет геометрических размеров пленочных резисторов

Расчет геометрических размеров пленочных резисторов осуществляется в такой последовательности:

1. Для оценки возможности реализации всех резисторов на основе использования одного материала резистивной пленки определяют отношение R_{max} к R_{min} в данном функциональном узле и если $R_{max} / R_{min} \leq 50$, то для реализации всех резисторов используется один материал резистивной пленки. Если это условие не выполняется, то необходимо резисторы разделить на две группы с тем, чтобы в каждой группе это условие выполнялось.

2. Производят выбор материала резистивной пленки. Критериями выбора материала являются оптимальные значения $\rho_\square$, максимальное значение P_0 и минимальное значение σ_{ρ_0}, α_R, $K_{\text{ст}}$. При расчете группы резисторов оптимальное значение $\rho_\square$ определяют для каждой группы.

Оптимальное значение ρ_W для резисторов схемы, которое обеспечивает минимальную площадь, занимаемую резисторами, при заданной точности определяют из соотношения (3.20):

$$\rho_{W\text{опт}} = \frac{\sigma_b}{\sigma_l}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{R_i}{\bar{\sigma}^2_{k_{\Phi i}}}}{\sum_{i=1}^{n}(R_i\bar{\sigma}^2_{k_{\Phi i}})^{-1}}},$$

где σ_l и σ_b определяются из технологии изготовления ГИС;

$\bar{\sigma}^2_{k_{\Phi i}} = \bar{\sigma}^2_{Ri} - \bar{\sigma}^2_{\rho_W}$ – дисперсия погрешности коэффициента формы резистора.

Полученное значение $\rho_{\square\text{опт}}$ округляется до рекомендованных значений. По этим значениям выбирается материал резистивной пленки с удельным сопротивлением, ближайшим по значению к расчетному $\rho_{\square\text{опт}}$.. Данные по материалам резистивных пленок приведены в таблице 3-1.

3. Производят проверку правильности выбора материала с точки зрения обеспечения заданной точности изготовления, согласно выражению (3.3)

$$\Delta\bar{K}_{\Phi_{\text{доп}}} = \Delta\bar{l} + \Delta\bar{b} = \Delta\bar{R}_0 - \Delta\bar{R}_{t^\circ} - \Delta\bar{R}_{\text{СТ}} - \Delta\bar{R}_{\text{К}}; \qquad (3.21)$$

где $\Delta\bar{R}_0 \le \delta R$; $\Delta\bar{\rho}_0 = (3 \div 5)\%$ – определяется условиями напыления пленки;

$\Delta\bar{R}_{t^\circ} = \alpha_R(T_{\max} - T_{\min})$; $\Delta\bar{R}_{\text{К}} \le 2\%$; $\Delta\bar{R}_{\text{СТ}}$ – заимствуется из данных таблицы 3.1.

Таблица 3.1. Параметры материалов тонкоплёночных резисторов

Материал		Сопротивление квадрату резистивной плёнки, ρ_S Ом\□	Диапазон номинальных сопротивлений, Ом	ТКС (α_R) 10^{-4}С° в интервале температур, С°		Погрешность старения плёнки, %		Максимально допустимая удельная мощность рассеяния P_0, Вт\см^2
Для напыления резистивной плёнки	Контактных площадок			от –60 до +25	от +25 до +125	за 1000ч при t= 85С°	за 5000ч в нормальных условиях	
Нихром, проволока Х20Н80, диаметр 0,3-0,8мм	медь	300	50-30000	±1,0	±1,0	1,1-1,3	0,1-0,4	2
Нихром, проволока	Золото с подслоем хрома	10	1-10000	-2,0	-2,5	1,1-1,3	0,1-0,4	2
		50	5-50000					
Сплав МЛТ-3М	Медь с подслоем ванадия Медь с подслоем нихрома	500	50-50000	±3,0	±2,0	±0,5	±0,1	2

Специальный сплав №3	Золото с подслоем хрома (нихрома)	500 350	100-500 500-5000 5000-50000	±2,0 0,2-0,5	±2,0 0,2-0,5	-	-	2
Хром	Медь(луженая)	500	50-30000	0,6	0,6	-	-	1
Кермет К-50С	Золото с подслоем хрома (нихрома)	3000	1000-10000	-3	-3	±0,1	±0,3	2
		5000	500-2000000	-4	-4			
		10000	1000-10000000	-5	-5			
Сплав РС-3001	Золото с подслоем хрома (нихрома)	1000	100-50000	-0,2	-0,2	±0,5	-	2
		2000	200-100000					
Сплав РС-3710	Золото с подслоем хрома(нихрома)	3000	10000-200000	-3	-3	±0,5	-	2
Тантал ТВЧ, лента толщиной 0,3-3мм	Алюминий с подслоем ванадия	20-100	100-100000	-2	-2	-	-	3
	Медь	100	50-100000					
	тантал	10	10-15000					

Если рассчитанное таким образом значение $\Delta\overline{K}_{\Phi} < 0$, то это означает, что выбранный материал не обеспечивает изготовление резистора заданной точности. В этом случае необходимо выбирать другой материал с меньшими значениями α_R, $K_{ст}$ и так далее.

4. Определяют конструкцию резисторов по значению коэффициента формы

$$K_{\phi i} = \frac{R_i}{\rho_{\text{W}}}.$$

При 1≤ K_{Φ_i} ≤10 рекомендуется конструировать резистор прямоугольной формы (рис. 3.1а), а при K_{Φ_i} >10 согласно рисунку 3.1б.

5. Определяют допустимые геометрические размеры пленочных резисторов с точки зрения рассеиваемой мощности:

$$b_i \geq \sqrt{\frac{P_{Ri}}{P_0 \cdot K_{\phi i}}}, \qquad (3.22)$$

$$l_i \geq \sqrt{\frac{P_{Ri} \cdot K_{\phi i}}{P_0}}, \qquad (3.22а)$$

где P_{Ri}. – мощность, рассеиваемая на резисторе;

P_0 – максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной пленки;

$$l_i = b_i \cdot k_{\phi i}, \qquad (3.23)$$

$$b_i = l_i / k_{\phi i} \qquad (3.23а)$$

Если коэффициент формы *i*-го резистора $K_{\phi i} \geq 1$, то лучше пользоваться формулами (3.22) и (3.23).

Если $K_{\phi i} < 1$, то следует воспользоваться формулами (3.22а) и (3.23а).

6. Определение геометрических размеров пленочных резисторов исходя из требуемой точности:

$$b_i \geq \sqrt{\frac{\sigma_b^2 + \sigma_l^2 / K_{\phi i}^2}{\bar{\sigma}_{k_{\Phi i}}^2}}, \tag{3.24}$$

$$b_i = l_i / k_{\phi i} \tag{3.24а}$$

или

$$l_i \geq \sqrt{\frac{\sigma_l^2 + \sigma_b^2 \cdot K_{\phi i}^2}{\bar{\sigma}_{k_{\Phi i}}^2}}, \tag{3.25}$$

$$b_i = l_i / k_{\phi i} \tag{3.25а}$$

Из двух полученных значений b_i или l_i, определенных по точности и по допустимой мощности рассеяния, выбирается большее с учетом технологических ограничений.

На этом расчет геометрических размеров пленочных резисторов можно считать законченным.

Контрольные вопросы

1. Исходные данные для расчета геометрических размеров пленочных резисторов.
2. Последовательность расчета геометрических размеров высокоомных резисторов.
3. Последовательность расчета геометрических размеров низкоомных резисторов.
4. Критерии выбора материала резистивной пленки.
5. Физический смысл параметра резистивного материала ρ_{w}.
6. Оптимальное значение сопротивления квадрата резистивного материала

3.4. Расчет сопротивления контактного перехода между резистивной и проводниковой пленками

Контакты между пленочными элементами выполняются двумя основны-

ми методами:

1. После напыления резистивной пленки схема перемещается из одной вакуумной установки в другую. При этом за счет контакта с кислородом атмосферы происходит образование на поверхности резистивной пленки окисной пленки.

2. Напыление контактных участков без съема вакуума между операциями напыления контактной пары. В этом случае окисление поверхности происходит лишь за счет остаточного кислорода в вакуумной установке и в силу этого переходное сопротивление в этом случае несравненно ниже, чем в первом. Для характеристики сопротивления контактной пары вводится понятие удельного переходного сопротивления контактной зоны на единицу площади перекрытия пленок, обозначаемое далее R^* [Ом·мм^2].

Наличие окисной пленки на поверхности резистивной пленки приводит к появлению неметаллического контакта через оксидную пленку. При этом имеет место два основных механизма проводимости в контактной паре:

а) прямое туннелирование из одного металла в другой;

б) термоэлектронная эмиссия Шоттки через потенциальный барьер металл-диэлектрик-металл.

Для определения переходного сопротивления и размеров контактной области рассмотрим простейшую одномерную модель (рисунок 3.2) контактного перехода между резистивной пленкой толщиной Δ и шириной b, перекрываемой проводящей пленкой на длине l^*.

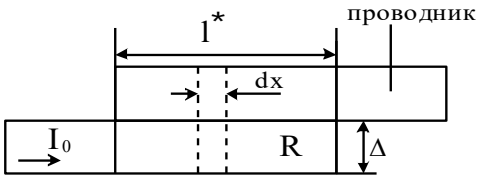


Рисунок 3.2. Модель контактного перехода

Контактный переход любого типа обладает конечным сопротивлением. Контактный слой между резистивной и проводящей пленками представляет собой окисную пленку, толщина и качество которой зависят от степени вакуума,

при котором изготавливалась микросхема, и от времени между процессами нанесения пленок контактной пары. Переходное сопротивление, следовательно, зависит от геометрических размеров контакта, проводимости резистивной пленки и величины удельного переходного сопротивления:

$$R_{пер} \cong \frac{\sqrt{\rho^* \rho_W}}{b} \cdot \frac{1}{tha\sqrt{\frac{\rho_W}{\rho^*}}}, \tag{3.26}$$

где ρ_W – сопротивление квадрата резистивной пленки;

ρ^* – удельное сопротивление переходного слоя, его величина для различных техпроцессов может составлять 0,01 ... 2 Ом·мм^2;

a – длина перекрытия резистивной и проводящей пленок;

b – ширина резистивной пленки.

При небольших значениях аргумента значение гиперболического тангенса стремится к единице. В силу этого расчет можно вести по формуле

$$R_{пер} \cong \frac{\sqrt{\rho^* \rho_W}}{b}, \tag{3.27}$$

Допуская, например, 10 % увеличения переходного сопротивления по сравнению с минимально возможным значением согласно (3.27), можно определить необходимое значение длины перекрытия резистивной и проводящей пленок:

$$l^*_{\min} \geq 1{,}5\sqrt{\frac{R^*}{\rho_0}}. \tag{3.28}$$

Следует отметить, что для реальных значений R^* и ρ_0 длина перекрытия составляет доли миллиметра. Следовательно, весь ток протекает в узкой зоне, что приводит к концентрации плотности тока вблизи края контактной области, увеличивая тем самым удельную мощность рассеяния. Суммарная мощность, рассеиваемая единицей площади контактного перехода:

$$P_{R_\Sigma} = \frac{I_0^2 \rho_0}{b^2}(1 + cth^2 ml^*). \tag{3.29}$$

где $\frac{I_0^2 \rho_0}{b^2} = P_R^*$ – удельная мощность, рассеиваемая резистивной пленкой. Отсюда, при $l^*=l^*_{min}$ удельная мощность, рассеиваемая на переходе – $P_{R_\Sigma} \approx 2{,}21 P_R^*$.

Если значение $R_{пер}$ таково, что величина $2R_{пер}$ превышает допуск на номинал пленочного резистора, то необходимо скорректировать рассчитанные ранее размеры последнего.

Порядок расчета геометрических размеров контактной области

Расчет геометрических размеров контактной области осуществляется в такой последовательности:

1. Определяется минимально возможное значение переходного сопротивления согласно (3.27) для самого низкономинального резистора. Здесь R^* определяется выбранной технологией изготовления резисторов и лежит в пределах R^*=0,01~0,1 [Ом·мм^2] для процесса без съема вакуума. Найденное таким образом $R_{пер}$ должно удовлетворять условию:

$$\frac{R_{пер}}{R_0} \cdot 100 \le \Delta \overline{R}_{K_{доп}};$$

где $\Delta \overline{R}_{K_{доп}}$ – величина, определяемая из зависимости полной относительной погрешности резистора от суммы погрешностей его изготовления (производственная составляющая погрешностей, обусловленных влиянием условий его эксплуатации), а именно:

$$\Delta \overline{R} = \Delta \overline{R}_{пр} + \Delta \overline{R}_{t^\circ} + \Delta \overline{R}_{ст} + \Delta \overline{R}_{к};$$

где $\Delta \overline{R}_{пр} = \Delta \overline{\rho}_0 + \Delta \overline{l} - \Delta \overline{b}$; $\Delta \overline{R}_{t^\circ} = \alpha_R \Delta T$; $\Delta \overline{R}_{ст}$ – характеризуют температурную и временную нестабильность резистора;

$\Delta R_к$ – погрешность переходных сопротивлений областей контакта.

Если это условие не выполняется, то необходимо увеличивать ширину резистора, а далее скорректировать значение длины данного резистора.

2. Определяется необходимое значение длины перекрытия резистивной и проводящей пленок согласно (3.28).

3. Согласно (3.29) определяется мощность, рассеиваемая единицей площади контактного перехода. Найденная, таким образом, $P_{к\Sigma}$ должна удовлетворять условию $P_{к\Sigma} \leq P_0$; где P_0 – удельная мощность рассеяния данного резистивного материала.

4. Если это условие не выполняется, необходимо либо использовать конструкцию резистора с расширением приконтактной зоны, либо увеличивать значение l^* до приемлемой величины.

Контрольные вопросы

1. Механизмы проводимости в контактной паре "пленка-пленка".
2. Вид уравнения, описывающего распределение потенциала вдоль контактной области.
3. Методы обеспечения теплоотвода от контактной области.
4. Пути и методы уменьшения сопротивления контактной области.
5. Последовательность расчета геометрических размеров контактной области.

3.5. Расчет и проектирование прецизионных резисторов

Если к точности изготовления резисторов предъявляются повышенные требования, не обеспечиваемые существующим технологическим процессом, то при конструировании необходимо заранее предусмотреть возможность изменения сопротивления каким-либо способом.

Выбор оптимального метода подгонки применительно к используемому резистивному материалу и техпроцессу изготовления является важной задачей при проектировании прецизионных резисторов. При этом наряду с требованиями возможности более плавной подгонки сопротивления резистора с заданной точностью важным критерием выбора является минимальное ухудшение эксплуатационных характеристик подгоняемых резисторов, сохранение их временной и температурной стабильности.

По характеру воздействия на подгоняемый резистор методы подгонки можно разделить на группы, основанные на изменении электрофизических свойств резистивного материала, и группы, основанные на изменении геометрических размеров резисторов.

К первой группе относятся методы, использующие термическое, химическое и электрохимическое воздействие на подгоняемый резистор, обработку высокочастотным разрядом и др.

При подгонке сопротивления резисторов путем изменения их геометрических размеров применяют механическое скрайбирование, выжигание, испарение с помощью сфокусированного луча ОКГ, электроннолучевую, электроэрозионную обработку. Однако следует учитывать, что применение дополнительной технологической обработки с целью повышения точности неизбежно оказывает влияние на их временную и температурную стабильность, а также повышает уровень шумов.

При проектировании пленочных резисторов повышенной точности применяют специальные конструкции (рисунок 3.3), допускающие дискретную (а) или плавную (б) подгонку их сопротивлений

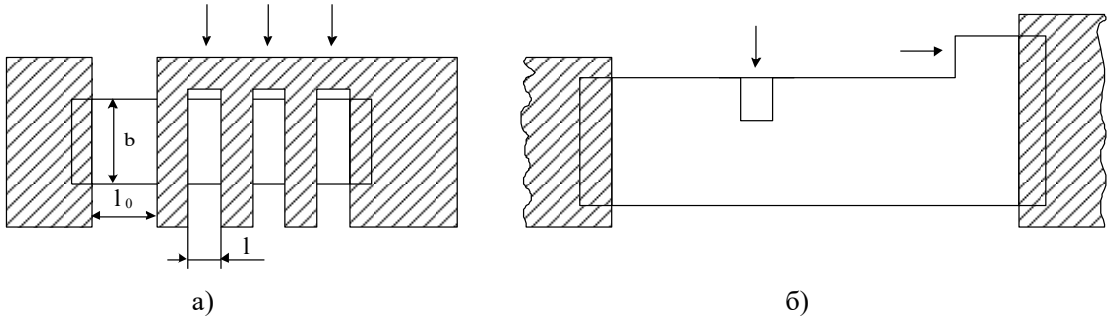


Рисунок 3.3. Модели конструкций прецизионных резисторов

Конструкция резисторов для ступенчатой подгонки предусматривает две части: основную длиной l_0 и дополнительную с подгоночными секциями длиной l_c. При этом шаг подгонки может быть постоянным и переменным. Дискретное изменение сопротивление сопротивления осуществляется удалением металлических перемычек в подгоночных секциях. Проектирование подгоняемых резисторов сводится к определению длин основной и подгоночных секций, а также количества подгоночных секций с учетом того факта, что в процессе подгонки сопротивления резистора может изменяться только лишь в сторону возрастания. Тогда при максимальном значении сопротивления должно выполняться условие:

$$R_{\max} = R_{\text{нч}}(1+3\overline{\sigma}_R) = R_0; \qquad (3.30)$$

где $R_{\text{нч}}$ и R_0 – сопротивление основной части с длиной l_0 и номинальное значение сопротивления соответственно.

Отсюда сопротивление не подгоняемой части

$$R_{\text{нч}} = \frac{R_0}{1+3\overline{\sigma}_R} \qquad (3.31)$$

При минимальном значении сопротивления номинальное значение определяется суммой минимальных значений не подгоняемой части и n последовательно включенных подгоняемых секций.

$$R_0 = R_{\text{нч}\min} + nR_{\text{с}\min} \approx R_{\text{нч}}(1-3\overline{\sigma}_R) + nR_{\text{с}}(1-3\overline{\sigma}_R). \qquad (3.32)$$

Здесь $R_{\text{нч}}$ (не подгоняемой части) находится из (3.31), а сопротивление одной секции $R_{\text{с}}$ находится из условия: максимальное значение сопротивления одной секции не должно превышать величину поля допуска, то есть:

$$R_{\text{с}\max} = R_{\text{с}}(1+3\overline{\sigma}_R) \le \delta_R. \qquad (3.33)$$

Отсюда

$$R_{\text{с}} = \frac{\delta_R}{1+3\overline{\sigma}_R}. \qquad (3.34)$$

где δ_R – допустимая степень отклонения сопротивления, выраженная в омах.

И, наконец, число подгоночных секций определяется из очевидного соотношения:

$$n = \frac{R_{\text{С}_\Sigma}}{R_{\text{С}}}; \qquad (3.35)$$

где $R_{\text{С}_\Sigma}$ определяется:

$$R_0 = R_{\text{нч}\min} + R_{\text{С}_\Sigma}(1-3\overline{\sigma}_R). \qquad (3.36)$$

Отсюда

$$R_{\text{С}_\Sigma} = \frac{6\overline{\sigma}_R R_0}{1-9\overline{\sigma}_R^2}. \qquad (3.37)$$

Полученное значение n по (3.35) округляется до ближайшего большего целого числа. Кроме того, длина подгоночной секции $l_{\text{с}}$ должна быть больше технологических ограничений l_{min}. Если это условие не выполняется, то прини-

мают $l_c = l_{min}$ и рассчитывают ширину b_c секции по выражению:

$$b_C = \rho_0 \frac{n l_C}{R_{C_\Sigma}}. \qquad (3.38)$$

При значении $n \geq 10$ целесообразно использовать конструкцию с переменным шагом подгонки с законом изменения шага подгонки в виде геометрической прогрессии со знаменателем $q = 2$. При этом, заданная точность обеспечивается самой короткой секцией с сопротивлением, определяемым (3.34), а необходимое количество секций:

$$n_0 = 1{,}44 \ln (n + 1); \qquad (3.39)$$

где n – число секций подгонки при постоянном шаге.

Тогда длины подгоночных секций определяются из очевидных соотношений:

$$l_{C_1} = l_{C_{min}} = \frac{R_C b_C}{\rho_0};\ l_{C_2} = 2 l_{C_1};\ l_{C_3} = 4 l_{C_1}\ \text{К} \qquad (3.40)$$

Последовательность расчета прецизионных резисторов.

1. Согласно (3.31) определяется значение сопротивления не подгоняемой части резистора, а затем ее длина по соотношению

$$l_{нч} = \frac{R_{нч} b}{\rho_0}; \qquad (3.41)$$

где значение b определяется, как и ранее из условия обеспечения теплоотвода.

2. Согласно (3.34) определяется сопротивление одной секции, а затем ее длина

$$l_C = \frac{R_C b_C}{\rho_0} \qquad (3.42)$$

и ширина согласно (3.38). Число подгоночных секций n определяется из (3.34), а суммарное значение сопротивления всех подгоночных секций R_{C_Σ} по соотношению (3.36).

3. Если принимается решение об использовании конструкции с переменным шагом подгонки, то определяется необходимое число секций согласно (3.39), которое округляется до ближайшего целого числа.

4. И, наконец, согласно (3.40) определяются длины всех n_0 подгоночных секций.

Контрольные вопросы

1. Методы подгонки пленочных резисторов, их достоинства и недостатки.
2. Влияние методов подгонки на характеристики и стабильность пленочных резисторов.
3. Последовательность расчета геометрических размеров резисторов с дискретной подгонкой.
4. Последовательность расчета геометрических размеров резисторов с переменным шагом подгонки.

Глава 4. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

4.1. Конструктивно-технологические особенности и основные параметры пленочных конденсаторов

В ГИС применяются пленочные конденсаторы различной конфигурации, которые можно свести к трем типовым конструкциям.

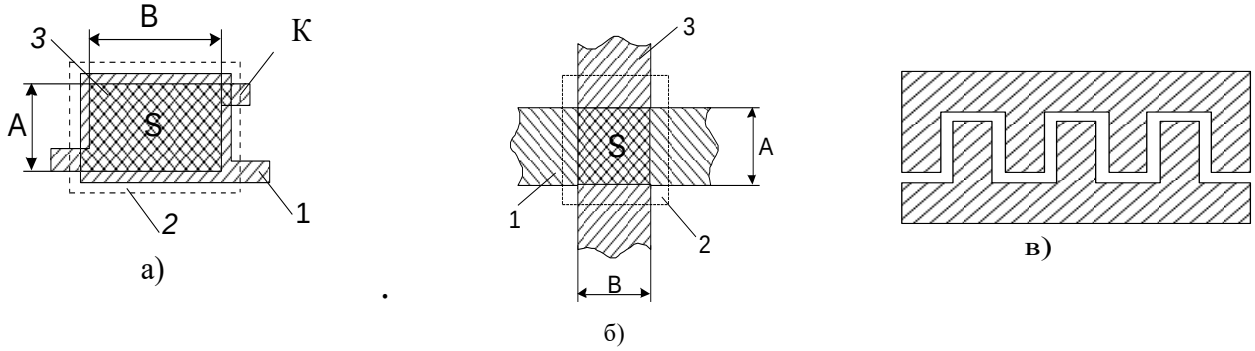


Рисунок 4.1. Модели пленочных конденсаторов
К – компенсатор

Пленочные конденсаторы типа а) и б) представляют собой многослойную структуру, нанесенную на диэлектрическую подложку в следующей последовательности: проводящий слой 1, выполняющий роль нижней обкладки; слой диэлектрика 2 и проводящий слой 3, выполняющий роль верхней обкладки конденсатора. На рисунке 4.1в изображена конструкция гребенчатого конденсатора, емкость которого в основном определяется емкостью, обусловленной краевым эффектом и конструктивно представляющего собой две металлизированные области, нанесенные на верхней поверхности подложки.

Пленочные конденсаторы характеризуются совокупностью следующих параметров:

- ✓ C_0 – номинальное значение емкости,
- ✓ $\pm\delta_c$ – допуск на емкость,
- ✓ $U_р$ – рабочее напряжение,
- ✓ Q_c – добротность,
- ✓ $R_{ут}$ – сопротивление утечки,

- ✓ температурный коэффициент ТКС,
- ✓ диапазон рабочих частот,
- ✓ интервал рабочих температур ΔT и так далее.

Конкретные значения этих параметров зависят от выбора используемых материалов для диэлектрика и обкладок, а также от конструктивного варианта реализации.

Конструкция рисунка 4.1а предназначена для реализации конденсаторов повышенной емкости (сотни и тысячи пикофарад). Здесь контур верхней обкладки вписывается в контур нижней обкладки. Ее особенностью является то, что не совмещение контуров обкладок не сказывается на точности реализации в силу наличия компенсатора. Кроме того, распространение диэлектрика за контур нижней обкладки гарантирует надежную изоляцию обкладок при их предельном не совмещении.

Для конденсаторов небольшой емкости (десятки и сотни пикофарад) целесообразна конструкция рисунка 4.1б в виде пересекающихся проводников одинаковой ширины, разделенных слоем диэлектрика. Емкость конденсатора данной конструкции нечувствительна к смещению обкладок.

Для реализации высокочастотных конденсаторов применяют гребенчатую конструкцию (рис. 4.1в), в которой обкладки расположены в одной плоскости, имеют гребенчатую форму, а диэлектрик является составным типа "подложка - воздух" либо "подложка - диэлектрическое покрытие".

4.2. Расчет геометрических размеров конденсаторов

Емкость пленочного конденсатора (рисунки 4.1а,б) определяется по известной формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot d} = \frac{0.0885 \cdot n \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \qquad (4.1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;
S – площадь перекрытия обкладок; d – толщина диэлектрика; n – количество диэлектрических слоев.

Подобно материалу резистивной пленки, слой диэлектрика, параметры ε

и d которого определяют удельную емкость конденсатора, с точки зрения технологичности, воспроизводимости и стабильности свойств характеризуются оптимальными отношениями ε/d для каждого материала и способа его нанесения. Тогда емкость конденсатора:

$$C = C_{\text{уд}} \cdot S, \tag{4.2}$$

где $C_{\text{уд}} = 0{,}0885\varepsilon/d$ – постоянная величина для каждого материала.

С точки зрения минимизации занимаемой площади для изготовления конденсаторов необходимо применять материалы с максимальной диэлектрической проницаемостью и минимальной толщиной. Однако минимальная толщина диэлектрика ограничена снизу значением рабочего напряжения $U_{\text{р}}$ на конденсаторе и электрической прочностью диэлектрика:

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{d}, \tag{4.3}$$

где $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность материала диэлектрика, [В/мм], $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя диэлектрика, [В]. Тогда минимальная толщина диэлектрика:

$$d_{\min} \geq K_{\text{з}} \cdot U_{\text{Р}} / E_{\text{ПР}}, \tag{4.4}$$

где $K_{\text{з}} = U_{\text{пр}} / U_{\text{раб}} = 2 \div 3$.

Относительная погрешность величины емкости конденсатора обусловлена производственными погрешностями и дестабилизирующими факторами из-за изменения температуры и старения материалов и определяется соотношением:

$$\Delta\overline{C} = \Delta\overline{C}_{\text{УД}} + \Delta\overline{S} + \Delta\overline{C}_{t^\circ} + \Delta\overline{C}_{\text{СТ}}, \tag{4.5}$$

где $\Delta\overline{C}_{\text{УД}}$ – относительная погрешность удельной емкости;

$\Delta\overline{S}$ – относительная погрешность площади перекрытия площадок;

$\Delta\overline{C}_{t^\circ}$ – относительная температурная погрешность, зависящая в основном от ТКС материала диэлектрика и диапазона рабочих температур;

$\Delta\overline{C}_{\text{СТ}}$ – относительная погрешность, обусловленная старением пленок конденсатора.

Первые две составляющие характеризуют технологическую погрешность емкости и определяются соотношением:

$$\Delta\overline{C}_{\text{ПР}} = \Delta\overline{C}_{\text{УД}} + \Delta\overline{S}\ . \qquad (4.6)$$

Поскольку воспроизведение удельной емкости и площади перекрытия обкладок достигается взаимно независимыми операциями, относительное среднеквадратическое отклонение емкости определяется выражением:

$$\overline{\sigma}_C^2 = \overline{\sigma}_{C_{\text{УД}}}^2 + \overline{\sigma}_S^2 \qquad (4.7)$$

Здесь величина $\overline{\sigma}_{C_{\text{УД}}}$ зависит от технологических факторов нанесения слоя диэлектрика и является постоянной величиной для конкретного процесса. Таким образом, минимизация относительной погрешности емкости конденсатора может быть достигнута за счет соответствующего выбора геометрических размеров и формы обкладок.

В общем случае:

$$\overline{\sigma}_S^2 = \overline{\sigma}_C^2 - \overline{\sigma}_{C_{\text{УД}}}^2 = \overline{\sigma}_A^2 + \overline{\sigma}_B^2 + 2\cdot r_{AB}\cdot\overline{\sigma}_A\cdot\overline{\sigma}_B \qquad (4.8)$$

где $\overline{\sigma}_A$ и $\overline{\sigma}_B$ – относительные среднеквадратические отклонения линейных размеров A и B, определяющих площадь перекрытия обкладок $S=AB$;

r_{AB} – коэффициент корреляционной связи между погрешностями размеров A и B.

Когда размеры A и B верхней обкладки конденсатора формируются в процессе одной технологической операции (рисунок 4.1а), можно принять $r_{AB} \approx 1$. Для конструкции (рисунок 4.1б), где линейные размеры A и B формируются на разных операциях независимо $r_{AB} \approx 0$. При $\sigma_A = \sigma_B$ и $A/B=K_{\text{Ф}}$ исследование функции на экстремум с точки зрения минимума погрешности $\overline{\sigma}_S$ дает оптимальное значение $K_{\text{Фопт}}=1$. Тогда для достижения заданной точности реализации емкости конденсатора линейный размер A должен удовлетворять условию:

$$A_{\min} \geq \sigma_A \frac{\sqrt{2\cdot(1+r_{AB})}}{\sqrt{\overline{\sigma}_C^2 - \overline{\sigma}_{C_{\text{УД}}}^2}}\ . \qquad (4.9)$$

Здесь, как и ранее, величина $\overline{\sigma}_C$ определяется из неравенства Чебышева:

$$P\left(\left|\frac{C-C_0}{C_0}\right|<\delta_C\right)=\Phi(z). \qquad (4.10)$$

где $z=\delta_C/\left(\sqrt{2}\cdot\bar{\sigma}_C\right)$ – аргумент интеграла вероятности.

Соотношение (4.9) позволяет определить максимальное значение удельной емкости исходя из условия обеспечения заданной точности:

$$C_{\text{УД}_{MAX}}=\frac{C_0}{A_{\min}^2}. \qquad (4.11)$$

При этом определенное таким образом значение $C_{\text{УД}_{MAX}}$ должно удовлетворять условию обеспечения электрической прочности конденсатора, а именно:

$$C_{\text{УД}_{MAX}}=\frac{C_0}{A_{\min}^2}\le 0{,}0885\cdot\frac{\varepsilon}{d_{\min}}. \qquad (4.12)$$

где d_{min} определяется согласно (4.4).

Если $C_{\text{УД}_{MAX}}$ меньше или равна значению удельной емкости из таблицы 4.1, необходимо увеличить d_{min}

Соотношение (4.12) позволяет выбрать материал диэлектрика (таблица 4.1) и далее определить эксплуатационные составляющие погрешности в (4.5).

Относительная температурная погрешность:

$$\Delta\overline{C}_{t^\circ}=\alpha_C\cdot\Delta T, \qquad (4.13)$$

где α_C – ТКС материала диэлектрика; ΔT – диапазон рабочих температур.

Относительная погрешность, обусловленная старением материала, согласно таблице 4.1 не превышает 2÷3 %.

4.3. Потери в пленочных конденсаторах

Добротность Q пленочного конденсатора обусловлена потерями энергии в конденсаторе:

$$Q=\frac{1}{tg\delta_C}, \qquad (4.14)$$

где $\text{tg}\delta_\text{с}$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Потери в конденсаторе складываются из диэлектрических потерь и по-

терь в обкладках.

Потери в диэлектрике обусловлены свойствами материала диэлектрика на определенной частоте f и определяются суммой миграционных и дипольно-релаксационных потерь:

$$tg\delta_D = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0 f\rho_V} + \frac{2\pi\tau(\varepsilon_B - \varepsilon_H)}{\varepsilon\left[1+(2\pi f\tau)\right]^2}, \qquad (4.15)$$

где ρ_V – удельное сопротивление пленки диэлектрика, τ – время релаксации, ε_B и ε_H – значения относительной диэлектрической постоянной на высоких и низких частотах.

Тангенс угла потерь в обкладках конденсатора:

$$tg\delta_{\text{ОБКЛ}} \approx \frac{2}{3}\omega_{MAX} R_{\text{ОБКЛ}} C, \qquad (4.16)$$

где $R_{\text{ОБКЛ}} = \rho_0 A / B$ – сопротивление обкладок конденсатора (в омах), C – емкость конденсатора (в фарадах), ω_{MAX} – граничная частота, $\omega_{\text{MAX}} = 2\pi f$; ($f$=10мгц).

В практических расчетах $tg\delta_D$ – справочная величина (см. таблицу 4.1), а $tg\delta_{\text{ОБКЛ}}$ – определяется в зависимости от конфигурации конденсатора, материала и формы обкладок.

Таблица 4.1. Характеристики материалов пленочных конденсаторов

Материал диэлектрика	Материал обкладок	Диэл. проницаемость на частоте 1 кГц, ...	Удельная емкость, пФ/см^2.	Тангенс угла диэл. потерь на частоте 1 кГц, tg	Температурный коэф. емкости ТКС·10^{-4}, град	Электрическая прочность, $E_{пр}$·10, В/см	Стабильность в норм. усл. Под рабочим напряжением на 1000 ч работы, %
Моноокись кремния	Алюминий	5 - 6	5000 - 10000	0.01 - 0.02	2 - 3.5	2 -3	±(1.5 - 6)
Моноокись германия	"	10 - 12	5000 10000 15000	0.001 - 0.005	3 - 5	1	1
Двуокись кремния	"	4	20000	0.5	2	5 - 10	
Окись алюминия	Алюминий + никель	8	30000 40000	0.3 - 1	3 - 4	5	
Окись тантала	Тантал + ванадий	20 - 23	50000 100000 200000	0.02	4	2	±1
Боросиликатное стекло (БСС)	Алюминий + ванадий, алюминий	3.9 - 4.2	15000	0.001	0.2	3 - 5	-

	+ титан						
Алюмосиликатное стекло (АСС)	То же	5.2 - 5.5	30000	0.003	1.5	3 - 5	-
Иттрий-боритное стекло (ИБС)	"	10 - 12	60000	0.007	5	2 - 3	-
Паста ПК-12	Паста ПП-1, ПП-2	-	10000	0.03 - 0.04	±10	$U_{пр}$=>150 В	±5
Паста ПК1000-30	То же	-	3700	0.036	±10	$U_{пр}$=>150 В	±5

Следует отметить, что зависимость $tg\delta_c$ от частоты имеет экстремальный характер, то есть на некоторой частоте $f_{опт}$ $tg\delta_c$ – минимальна, а добротность конденсатора максимальна. Материал диэлектрика выбирается исходя из рабочего напряжения.

4.4. Проектирование прецизионных конденсаторов

При необходимости получения конденсаторов повышенной точности, превосходящей технологические возможности производства, применяют специальные конструкции, допускающие, как правило, дискретную подгонку емкости (рис. 4.3):

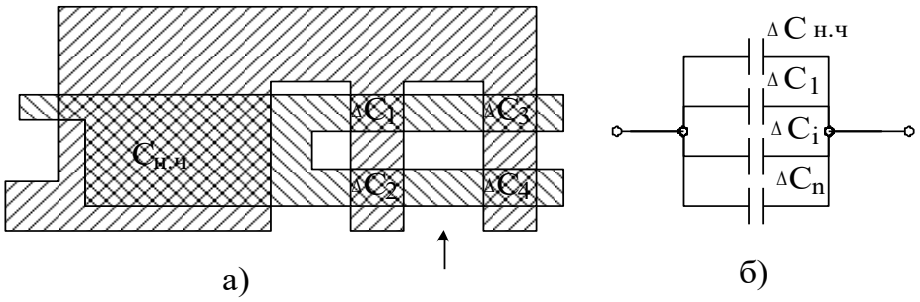


Рисунок 4.3 Модель конденсатора с подгоночными секциями

Конструкция предусматривает наличие двух частей: основную, не подгоняемую часть и дополнительную с подгоночными секциями ΔC_i. При равных значениях ΔC_i имеет место подгонка с постоянным шагом; при $\Delta C_i \neq \Delta C_j$ имеет место подгонка с переменным шагом. Дискретное изменение емкости конденсатора осуществляется удалением перемычек в соответствующих областях, что приводит к уменьшению емкости на ΔC. Таким образом в процессе подгонки емкость конденсатора изменяется в сторону уменьшения. Тогда при максимальном значении емкости не подгоняемой части и подгоночных секций ем-

кость конденсатора должна быть равна номинальному значению при отключенных всех n подгоночных секций, то есть:

$$C_0 = C_{\text{нч}} \cdot (1 + 3 \cdot \overline{\sigma}_C). \tag{4.17}$$

Отсюда емкость не подгоняемой части конденсатора:

$$C_{\text{нч}} = \frac{C_0}{1 + 3 \cdot \overline{\sigma}_C}. \tag{4.18}$$

При этом емкость одной подгоночной секции в наихудшем случае не должна превышать величины поля допуска, то есть:

$$\Delta C_{MAX} = \Delta C \cdot (1 + 3 \cdot \overline{\sigma}_C) \le \delta_C. \tag{4.19}$$

Отсюда величина емкости подгоночной секции:

$$\Delta C = \frac{\delta_C}{1 + 3 \cdot \overline{\sigma}_C}, \tag{4.20}$$

где δ_c – величина допуска, выраженная в пф.

И, наконец, число подгоночных секций определяется из очевидного соотношения:

$$n = \frac{\Delta C_\Sigma}{\Delta C}, \tag{4.21}$$

где ΔC_Σ определяется из условия:

$$C_0 = C_{\text{НЧ}MIN} + \Delta C_\Sigma \cdot (1 - 3 \cdot \overline{\sigma}_C). \tag{4.22}$$

Отсюда

$$\Delta C_\Sigma = \frac{6 \cdot C_0 \cdot \overline{\sigma}_C}{1 - 9 \cdot \overline{\sigma}_C^2}. \tag{4.23}$$

Полученное значение n согласно (4.21) округляется до ближайшего большего целого числа. При этом площадь перекрытия обкладок подгоночной секции:

$$S_C = \frac{\Delta C}{C_{\text{УД}}}, \tag{4.24}$$

а площадь перекрытия обкладок не подгоняемой части конденсатора:

$$S_{\text{НЧ}} = \frac{C_{\text{НЧ}}}{C_{\text{УД}}}. \tag{4.25}$$

На основании (4.24) и (4.25) ведется расчет геометрических размеров конденсатора.

При значении $n \ge 10$ целесообразно использовать конструкцию с пере-

менным шагом подгонки с законом изменения шага подгонки в виде геометрической прогрессии со знаменателем $q = 2$.

При этом заданная точность обеспечивается секцией с площадью перекрытия, определяемой (4.24), а необходимое количество секций определяется согласно (3.39). Тогда площади перекрытий подгоночных секций определяется как:

$$S_{C1} = S_{MIN} = \frac{\Delta C}{C_{УД}}, \quad S_{C2} = 2 \cdot S_{C1}, \quad S_{C3} = 4 \cdot S_{C1}, \text{ и т.д.} \qquad (4.29)$$

4.5. Последовательность расчета геометрических размеров пленочных конденсаторов

Исходными данными для расчета тонкопленочных конденсаторов являются: номинальная емкость C_0 (пФ), допуск на номинал $\pm\delta_c$ (%), максимальное рабочее напряжение $U_р$ (В), рабочая частота f (Гц), добротность конденсатора; диапазон рабочих температур ΔT (°С), технологические данные и ограничения, в том числе погрешность воспроизведения удельной емкости $\bar{\sigma}_{суд}$ (%) и линейных размеров обкладок ΔA, ΔB или их среднеквадратические отклонения σ_A, σ_B (мм) и другие.

1. По заданной технологии и данным таблицы 4.1 выбирают материал диэлектрика. Критериями выбора являются максимальные значения ε, $E_{пр}$ и минимальное значение ТКС и $\mathrm{tg}\delta_Д$.
2. Из условия обеспечения электрической прочности определяется минимальная толщина диэлектрика. Значение d_{min} должно находиться в пределах 0,2 ÷ 0,8 мкм.
3. Согласно соотношению $C_{УД_{MAX}} = 0{,}0885 \cdot \dfrac{\varepsilon}{d_{\min}}$, определяют значение удельной емкости, при которой обеспечивается электрическая прочность конденсатора. Здесь $C_{уд}$ (*пф/см*^{2}), d (*см*).
4. В зависимости от требуемых значений C выбирают конструкцию и форму конденсатора.

5. Далее согласно (4.9) определяются линейные размеры обкладки. Полученные значения округляют до значений, кратных шагу координатной сетки с учетом масштаба топологического чертежа. Так как при $K_ф$=1 имеет место минимум погрешности площади перекрытия, то, как правило $A=B$.
6. По соотношению определяется величина $C_{уд\ мах}$, обеспечивающая заданную точность, а далее проверяется выполнение условия. Если это условие не выполняется, то необходимо либо увеличивать размер A, либо выбрать диэлектрический материал с большим значением электрической прочности $E_{пр}$.
7. С учетом погрешности совмещения масок определяются размеры нижней обкладки и диэлектрического слоя соответственно по выражениям:

$$A_H = A_B + 2 \cdot q, \quad B_H = B_B + 2 \cdot q,$$
$$A_D = A_H + 2 \cdot f, \quad B_D = B_H + 2 \cdot f,$$

где q – погрешность несовмещения нижней и верхней обкладок,

f – погрешность несовмещения нижней обкладки и диэлектрика.

8. Затем согласно (4.16) определяются потери в обкладках конденсатора. С учетом потерь в диэлектрике (таблица 4.1) определяют суммарные потери в конденсаторе и определяется реальная величина добротности. При этом $Q_{реал} \geq Q_{зад}$. Если это условие не выполняется, то необходимо либо выбрать другие материалы обкладок и диэлектрика с меньшими значениями $\rho_{\square}$ и $\mathrm{tg}\delta_D$ соответственно, либо изменить форму обкладок с целью уменьшения сопротивления обкладок.
9. Если в схеме имеется несколько конденсаторов, то для изготовления их в едином технологическом цикле целесообразно выбирать для всех конденсаторов один и тот же диэлектрик с одинаковой толщиной, а, следовательно, с одинаковой удельной емкостью $C_{уд}$. Тогда расчет конденсаторов необходимо начинать с конденсатора, имеющего наименьшую емкость.

Контрольные вопросы

1. Критерии выбора материалов обкладок и диэлектрика конденсатора.
2. Значение эффективной диэлектрической проницаемости двухслойных диэлектриков.
3. Оптимальная форма обкладок с точки зрения минимизации погрешности площади перекрытия.
4. Какими факторами определяется минимальная толщина диэлектрика.
5. Пути и методы обеспечения электрической прочности пленочных конденсаторов.
6. Виды потерь в пленочных конденсаторах.
7. Зависимость добротности пленочных конденсаторов от частоты.

ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИС

5.1. Зависимости погрешности выходного параметра от физических и геометрических параметров элементов

Ранее было отмечено, что дисперсию выходного параметра ГИС можно представить как сумму дисперсий выходного параметра от комплексов элементов, изготовляемых на взаимно независимых операциях (комплексы резисторов, конденсаторов и т.д.), и в силу этого допускается их раздельный анализ.

Следует отметить, что абсолютные отклонения геометрических и физических параметров элементов будут одинаковыми в пределах каждого комплекса. Следовательно, за погрешность выходного параметра от каждого комплекса можно принять среднеквадратичное отклонение выходного параметра ГИС от погрешности комплексов геометрических и физических параметров элементов. Отсюда:

$$\overline{\sigma}^2{}_{\varphi_R} = \overline{\sigma}^2_{\varphi_\Diamond} + \overline{\sigma}^2_{\varphi_b} + \overline{\sigma}^2_{\varphi_l}\ ; \tag{5.1}$$

$$\overline{\sigma}^2{}_{\varphi_C} = \overline{\sigma}^2_{\varphi_{C_{уд}}} + \overline{\sigma}^2_{\varphi_S}\ ; \tag{5.2}$$

Для комплекса резисторов при n=2 первая составляющая (5.1) запишется в виде:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi_{\rho\Diamond}} = A^2_{\rho\Diamond 1}(\overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 1ср} + \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 1П}) + A^2_{\rho\Diamond 2}(\overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 2ср} + \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 2П}) + 2A_{\rho\Diamond 1}A_{\rho\Diamond 2}\overline{\sigma}_{\rho\Diamond 1ср}\overline{\sigma}_{\rho\Diamond 2ср} \tag{5.3}$$

С учётом того, что $\overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 1П} = \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 2П} = \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond П}$ и $\overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 1ср} = \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond 2ср} = \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond ср}$ соотношение (5.3) перепишется:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi_{\rho\Diamond}} = \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond П}(A^2_{\rho\Diamond 1} + A^2_{\rho\Diamond 2}) + \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond ср}(A_{\rho\Diamond 1} + A_{\rho\Diamond 2})^2\ ; \tag{5.4}$$

отсюда при любом “*n*”:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi_{\rho\Diamond}} = \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond П}\sum_{i=1}^{n} A^2_{\rho\Diamond i} + \overline{\sigma}^2_{\rho\Diamond ср}(\sum_{i=1}^{n} A_{\rho\Diamond i})^2\ ; \tag{5.5}$$

Аналогично вторая и третья составляющие (5.1) при любом *“n”* запишутся в виде:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi b} = \sigma^2_{bП} \sum_{i=1}^{n} \frac{A^2_{bi}}{b^2_i} + \sigma^2_{bср} (\sum_{i=1}^{n} \frac{A_{bi}}{b_i})^2 ; \qquad (5.6)$$

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi l} = \sigma^2_{lП} \sum_{i=1}^{n} \frac{A^2_{li}}{l^2_i} + \sigma^2_{bср} (\sum_{i=1}^{n} \frac{A_{li}}{l_i})^2 ; \qquad (5.7)$$

Таким образом, дисперсия выходного параметра ГИС от всех “*n*” элементов $j^{го}$ комплекса, т.е. для $j^{го}$ технологического фактора, может быть представлена выражением:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi_j} = \overline{\sigma}^2_{jП} \sum_{i=1}^{n} A^2_{ji} + \overline{\sigma}^2_{jср} (\sum_{i=1}^{n} A_{ji})^2 ; \qquad (5.8)$$

Анализ выражения (5.8) показывает, что вторая составляющая погрешности $\overline{\sigma}_{jср}$ в силу большего значения весового коэффициента даёт больший вклад в суммарную погрешность выходного параметра. Так, если все элементы $j^{го}$ комплекса имеют одинаковую направленность, то с увеличением числа элементов в комплексе дисперсия выходного параметра увеличивается. Однако наличие хотя бы одного элемента ГИС с противоположной направленностью коэффициента влияния приводит к уменьшению второго члена в выражении (5.8), а значит и уменьшению дисперсии выходного параметра с увеличением числа элементов.

В результате оказывается возможным использовать этот факт при проектировании ГИС с целью минимизации дисперсии выходного параметра. На этапе схемного проектирования относительные значения среднеквадратических отклонений $\overline{\sigma}_{jП}$ и $\overline{\sigma}_{jср}$ считают одинаковыми для всех n_i элементов $j^{го}$ комплекса. Например, это имеет место, если в качестве определяющего параметра рассматривать удельное поверхностное сопротивление комплекса резисторов или удельную ёмкость комплекса конденсаторов. Тогда с учётом того, что в схеме имеется хотя бы один элемент с обратной направленностью коэффициента влияния среди *n* элементов, выражение (5.8) приобретает вид:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi_j} = \overline{\sigma}^2_{jП}\sum_{i=1}^{n} A^2_{ji} + \overline{\sigma}^2_{jср}\left(\sum_{i=1}^{n-1} A_{ji} - A_{jк}\right)^2 ; \qquad (5.9)$$

Используя в качестве переменной отношение коэффициентов влияния $\left(A_{jk} \Big/ \sum_{i=1}^{n-1} A_{ji} \right) = Z$, исследование (5.9) на экстремум даёт оптимальное значение этого отношения, при котором $\overline{\sigma}_{\varphi_j}$ будет оптимальным, а именно:

$$\overline{\sigma}^2_{\varphi_j \min} = \overline{\sigma}^2_{jП}\left[\sum_{i=1}^{n-1} A^2_{ji} + \left(\sum_{i=1}^{n} A_{ji}\right)^2 \frac{1}{1+\left(\overline{\sigma}_{jП} \Big/ \overline{\sigma}_{jср}\right)^2}\right]; \qquad (5.10)$$

где $Z_{opt} = \dfrac{1}{1+\left(\overline{\sigma}_{jП} \Big/ \overline{\sigma}_{jср}\right)^2}$. (5.11)

Следовательно, имея статистические данные по $\overline{\sigma}_{jП}$ и $\overline{\sigma}_{jср}$ при стабильном технологическом процессе, разработчики схем могут изменять коэффициент Z таким образом, чтобы погрешность выходного параметра была минимальной.

При топологическом проектировании учитываются факторы, при которых абсолютные отклонения $\sigma_{jП}$ и $\sigma_{jср}$ будут одинаковыми, а их относительные значения -различными. Например, абсолютные значения погрешностей длины и ширины резисторов будут одинаковыми. Если обозначить геометрический размер к^{го} элемента j^{го} комплекса через X_{jk}, то при наличии хотя бы одного элемента с обратным коэффициентом влияния, оптимальное значение этого параметра будет:

$$X_{jk} = A_{jk}\frac{1+\left(\sigma_{jП} \Big/ \sigma_{jср}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n-1} A_{ji} \Big/ X_{ji}} ; \qquad (5.12)$$

где X_{jk} - номинальное значение геометрического размера i -го элемента в j - м комплексе.

При этом уравнение погрешностей примет вид:

$$\overline{\sigma}_{\varphi_j}^2 = \sigma_{jП}^2 \sum_{i=1}^{n} \frac{A_{ji}^2}{X_{ji}^2} + \sigma_{jср}^2 \left[\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{A_{ji}}{X_{ji}} - \frac{A_{jк}}{X_{jk}} \right) \right]^2 ; \qquad (5.13)$$

Следовательно, используя соотношения (5.12) и (5.13) и, изменяя геометрические размеры X_{jk}, можно уменьшить разброс выходного параметра ГИС, учитывая при этом ограничения на геометрические размеры как снизу, так и сверху, заданной ограниченной площадью.

Таким образом, с помощью рассмотренной методики можно решить задачу последовательной оптимизации схемотехнических и топологических решений по минимуму разброса выходного параметра, в частности, оптимизировать значения удельного сопротивления, удельной ёмкости, распределение площади между группами элементов, геометрические размеры элементов. Оптимальность топологии при этом достигается расчётом геометрических размеров элементов, с одновременным удовлетворением всем требованиям в схемотехническом, технологическом и конструктивном аспектах.

5.2. Исходные данные для проектирования топологии

1. Схемотехнические данные и требования

Схемотехнические данные являются главными при проектировании ГИС, так как они определяют связи и параметры элементов, их функциональное назначение и условия эксплуатации.

К ним относятся:

1) схема электрическая принципиальная;

2) перечень элементов схемы, их параметры и характеристики (номинальные значения, электрические и тепловые режимы, стабильность во времени и т.д.);

3) условия эксплуатации;

4) рабочий диапазон частот.

2. Технологические данные и ограничения

Технологические данные и ограничения характеризуют возможность изготовления ГИС с заданными параметрами. Основными технологическими данными являются параметры структурных элементов ГИС: подложек, плёночных элементов, проводников, контактных площадок, межслойной изоляции и защитного слоя, а так же требования по точности изготовления плёночных элементов. Характеристики основных материалов подложек, плёночных проводников, контактных площадок и защитных слоёв приведены в таблицах 5.1-5.3.

Технологические ограничения, как правило, заимствуются из конкретного технологического процесса и обусловлены современным уровнем плёночной технологии. К ним относится точность изготовления контура плёночных элементов, точность воспроизведения физических свойств плёнок в процессе изготовления.

При использовании биметаллических масок для формирования рисунка, ошибка по контуру $\Delta=\pm10$мкм; ошибка в линейных размерах $\Delta l=\Delta b=\pm10$мкм; ошибка совмещения масок с подложкой $\Delta c=\pm(1\div3)$мкм.

Основные технологические требования:

1. Последовательное нанесение слоёв плёночной структуры;
2. Оригинал топологи ГИС должен выполнятся в прямоугольной системе координат в масштабе 10:1 или 20:1;
3. При разработке топологических чертежей должны предусматриваться поля. При масочном методе не менее 0,5 мм, при фотолитографии не менее 1мм;
4. Для совмещения элементов, расположенных в разных слоях, предусматривают перекрытие не менее 200мкм при масочном методе и 100мкм при фотолитографии;

5. Для измерения номиналов элементов предусматриваются контактные площадки размером не менее 200×200мкм;
6. Компоненты устанавливают на расстоянии не менее 0,5 мм от плёночных элементов и не менее 600мкм от контактной площадки; минимальное расстояние между компонентами составляет 300мкм;
7. Длина проволочных выводов компонентов 600мкм-3мм; не рекомендуется делать перегиб вывода через навесной компонент;
8. Минимальное расстояние между пленочными элементами 300мкм при масочном методе и 100мкм при фотолитографии;
9. Минимально допустимая ширина плёночных резисторов и проводников составляет 200мкм при масочном методе и 50мкм при фотолитографии;
10. У тонкоплёночных конденсаторов нижняя обкладка должна выступать за контур верхней обкладки не менее чем на 200мкм, а диэлектрик должен выступать за контур нижней обкладки не менее чем на 100мкм;
11. Минимально допустимые размеры контактных площадок для приварки гибких выводов 200×150мкм, для припайки 400×400мкм;
12. Минимально допустимые размеры контактных площадок для монтажа компонентов с шариковыми выводами 0,1×0,2мм;
13. Не рекомендуется проектировать пленочные резисторы с числом квадратов менее 0,1 и конденсаторы с площадями менее 0,5×0,5мм и суммарной площадью более 2см2.

Таблица 5.1 Характеристики материалов подложек ГИС

Характеристика	Материал					
	Стекло	Ситал СТ50-1	Плавленный кварц	Керамика	Металл*	Полимид* ПМ-1

	С41-1	С48-3			22ХС(96% AL_2O_3)	поликор	Глазурование	Брокерит (98% BeO)		
Класс чистоты обработки поверхности	14	14	13-14	14	12	12-14	14	Высота микронеровностей 0,45мкм	12-14	12-14
Температурный коэффициент линейного расширения ТКЛР($\times 10^7$) при Т=20÷300°С, град$^{-1}$	41±2	48±2	50±2	55	60±5	70-75	73-78	70	62	200
Коэф-т теплопроводности, Вт/(м·°С)	1	1,5	1,5	7-15	10	30-45	1,2-1,7	210	40	4,5
Диэлектрическая проницаемость при f=10^6Гц и Т=20°С	7,5	3,2-8	5-8,5	3,8	10,3	10,5	13-16	6,4-9,5	6-7	3,5
Тангенс угла диэлектрических потерь ($\times 10^4$) при f=10^6Гц и Т=20°С	20	15	20	--	6	10	18	16	6	30
Объёмное сопротивление при Т=25°С, Ом·см	10^{17}	10^{14}	--	10^{15}	--	--	--	10^{14}	10^{14}	10^{17}
Электрическая прочность, кВ/мм	40	40	--	--	50	--	50	20	--	15

* используется в гибридных БИС и МСБ.

3. **Конструктивные данные и требования**

К ним относятся размер платы, число и расположение выводов, размеры и способ монтажа компонентов, способ монтажа ГИС в корпусе.

Таблица 5.2. Характеристики многокомпонентных систем тонкоплёночных проводников и контактных площадок

Материал подслоя и покрытия	Толщина слоёв, мкм	Удельное поверхностное сопротивление ρ_s, Ом/□	Рекомендуемый способ контактирования внешних выводов
Подслой – нихром Х20Н80 Слой – золото Зл999,9	0,01-0,03 0,6-0,8	0,03-0,05	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
Подслой – нихром Х20Н80 Слой – медь МВ (вакуум-плавленая) Покрытие - никель	0,01-0,03 0,6-0,8 0,08-0,12	0,02-0,04	Сварка импульсным косвенным нагревом
Подслой – нихром Х20Н80 Слой – медь МВ (вакуум-плавленая) Покрытие –золото Зл999,9	0,01-0,03 0,6-0,8 0,05-0,06	0,02-0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
Подслой – нихром Х20Н80 Слой – алюминий А97	0,01-0,03 0,3-0,5	0,06-0,1	Сварка сдвоенным электродом
Подслой – нихром Х20Н80 Слой – алюминий А97 Покрытие - никель	0,04-0,05 0,25-0,35 0,05	0,1-0,2	Сварка импульсным косвенным нагревом

Таблица 5.3 Характеристики материалов, применяемых для защиты элементов

Материал диэлектрика	Удельная ёмкость C_0, пФ/мм^2	Тангенс угла диэлектрических потерь на f=1кГ, tgδ	Удельное объёмное сопротивление $\rho v \times 10^{-12}$, Ом·см	Электрическая прочность Епр$\times 10^{-5}$, В/см	Температурный коэф-т ёмкости ТКС$\times 10^4$ при Т=-60÷85°С, град$^{-1}$
Моноокись кремния	17	0,03	1	30	5
Халькогенидное стекло ИКС-24	50	0,01	1	4	5
Негативный фоторезистор ФН-108	12	0,01	1	1	5
Фоторезистор ФН-11	50-80	--	3	6	--
Лак полимерный электроизоляционный	80-100	--	2	5	--
Окись кремния	100	--	10	6	--
Паста ПД-3	160	0,002	--	5	3
Паста ПД-4	220	0,003	--	5	3

Размер платы выбирают в соответствии с таблицей 5.4. При этом платы с типоразмерами *N* 3-10 используют в стандартных корпусах, остальные в бес-

корпусных ГИС и микросборках.

Таблица 5.4. Типоразмеры плат

№ типо по-раз-мера	Ши-рина	Дли-на	№ типо по-раз-мера	Ши-рина	Дли-на	№ типо по-раз-мера	Ши-рина	Дли-на	№ типо-раз-мера	Ши-рина	Дли на
1	96	120	6	20	24	11	5	6	16	8	10
2	60	96	7	16	20	12	2.5	4	17	24	60
3	48	60	8	12	16	13	16	60	18	20	45
4	30	48	9	10	16	14	32	60	19	20	45
5	24	30	10	10	12	15	8	15			

Примечание. Размеры указаны в миллиметрах.

В одной ГИС следует применять компоненты с одинаковым типом выводов, а в случае гибких выводов - одинакового диаметра и материала.

Компоненты рекомендуется располагать рядами, параллельными сторонами платы и одинаково ориентированными.

Не допускается монтаж компонентов на плёночные конденсаторы и пересечения проводников.

Периферийные контактные площадки располагают по четырём или двум противоположным сторонам платы. При этом шаг расположения соответствует ряду 0,625; 1,25; 2,5мм для бескорпусной защиты или соответствует расположению выводов корпуса.

Каждая ГИС должна иметь ключ – увеличенную контактную площадку или специальный знак, расположенный в нижнем левом углу на большей стороне платы.

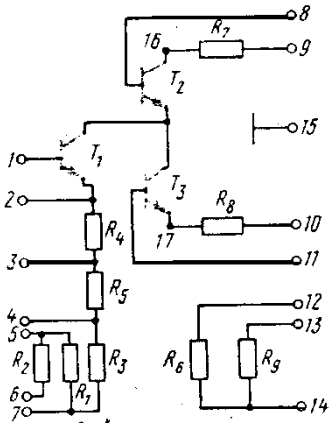
При разработке топологии ГИС элементы и компоненты размещаются в соответствии со схемой соединений, начиная с группы элементов, расположенных в одном из углов платы. При этом грани элементов и компонентов располагают вдоль осей координатной сетки. Разработка топологии завершается проектированием конфигурации защитного слоя и выбором для него материала в соответствии с таблицей 5.3.

По разработанной топологии составляют морфологию ГИС, т.е. разрабатывают конфигурацию каждого слоя топологической структуры, формирование которого осуществляется из одного материала за один технологический цикл.

Далее формируются требования к технологии сборки и монтажа компонентов и плат в корпусе, а также требования к защите и к обеспечению температурного режима.

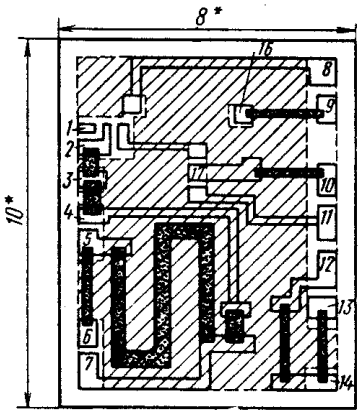
Завершающим этапом проектирования ГИС является разработка комплекта конструкторской документации. В основной комплект входят: схема электрическая принципиальная с перечнем элементов; топологический чертёж платы; топологические чертёжи отдельных слоёв с таблицей координат вершин элементов; сборочный чертёж со спецификацией, а также ведомость покупных изделий. В случае, когда вместе с разработкой топологии и конструкции ГИС производится разработка корпуса, в основной комплект документации входят чертежи общего вида, а также чертежи узлов и деталей корпуса.

На рисунках 5.1-5.6 показаны примеры оформления основных чертежей конструкторской документации на тонкоплёночные ГИС.



Позиционное обозначение	*ГОСТ, ТУ*	*Наименование*	*Кол.*	*Примечание*
R_1	------	*Рез-р62кОм±20%*	*1*	*Р=6,2мВт*
R_2	------	*Рез-р620Ом±10%*	*1*	*Р=10мВт*
R_3	------	*Рез-р3кОм±20%*	*1*	*Р=3мВт*
R_4	------	*Рез-р84Ом±5%*	*1*	*Р=15мВт*
R_5	------	*Рез-р100Ом±5%*	*1*	*Р=16мВт*
R_6, R_7	------	*Рез-р680Ом±10%*	*2*	*Р=12мВт*
R_8, R_9	------	*Рез-р75Ом±20%*	*2*	*Р=1,5мВт*
T_1	*ЩИ3.365.002.ТУ*	*Тран-р 2Т318А*	*1*	
T_2, T_3	*ЩИ3.365.003.ТУ*	*Тран-р 2Т318В*	*2*	

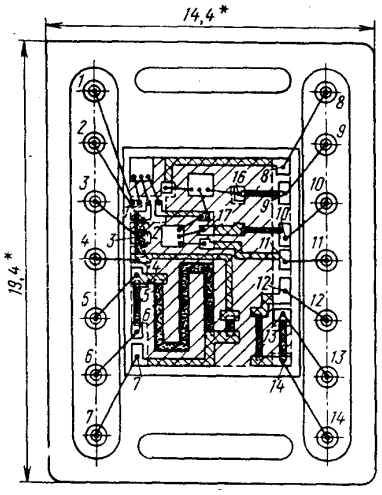
Рисунок 5.1. Схема соединения элементов (преобразованная электрическая схема)



№ слоя	Условное обозначение слоя	Наименование слоя	Материал слоя	Электрическая характеристика ρ_S, Ом/□	Метод нанесения слоя

			Наименование, марка	ГОСТ, ОСТ, ТУ		
1		Резисторы	РС-3710	ГОСТ17021-71	3000	Вакуумное напыление через маску
			Та	ГОСТ2.701-68	100	
			Та	ГОСТ2.701-68	10	
2		Контактные площадки	Нихром	ГОСТ2825-68	0,1	То же
			AL-99	ГОСТ2519-68		
			Никель	ГОСТ2425-68		
3		Защитный слой	ФН-103	0.028007ТУ	---	Фотолитография

Рисунок 5.2 Топологический чертёж гибридной ИМС



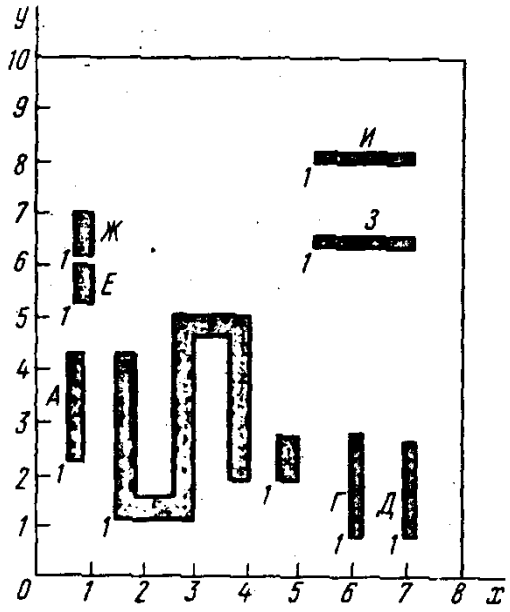
Позиционное обозначение	№ контактов	Проверочный номинал и допуск
R_1	5-7	62кОм±20%
R_2	5-6	620Ом±10%
R_3	4-7	3кОм±20%
R_4	2-3	84Ом±5%
R_5	3-4	100Ом±5%
R_6,	12-14	680Ом±10%
R_7	9-16	680Ом±10%
R_8,	10-17	75Ом±20%
R_9	13-14	75Ом±20%

Рисунок 5.3 Сборочный чертёж гибридной ИМС

Топологический чертёж (рисунок 5.2) является оригиналом топологии и сопровождается таблицей, содержащей информацию о последовательности нанесения слоёв, их условном обозначении и основных электрофизических параметрах каждого слоя.

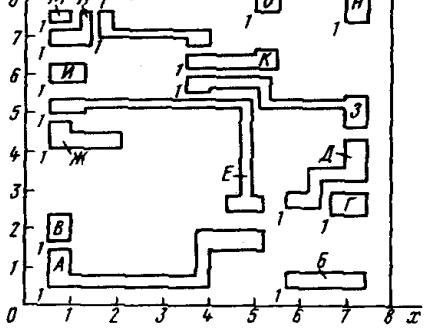
Топологический чертёж – документ, определяющий ориентацию и взаимное расположение всех элементов на подложке. На этом чертеже приводятся условные позиционные обозначения элементов в соответствии со схемой элек-

трической принципиальной, а также номера контактных площадок. Нумерация периферийных контактных площадок начинается с левого нижнего угла против часовой стрелки. При этом нумерация должна соответствовать нумерации аналогичных внешних выводов на схеме электрической и сборочного чертежа. Остальные контактные площадки нумеруются порядковыми очередными номерами в направлении сверху вниз и слева направо. Для удобства вычерчивания используется координатная сетка с шагом 0,01; 0,05; 0,1 или 0,2мм. При этом вершины элементов должны располагаться в узлах сетки. Кроме основного вида приводятся технические требования и таблицы с данными по слоям.



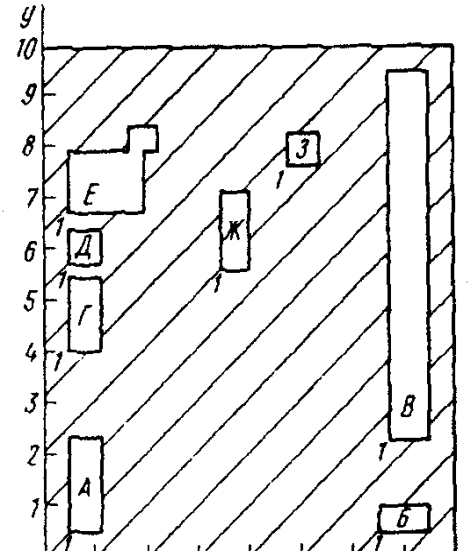
Обозначение элемента	Координаты		Обозначение элемента	Координаты	
	x	y		x	y
А	0,6 0,6 0,9 0,9	2,2 4,3 4,3 2,2	Г	6.0 6.0 6.2 6.2	0.8 2.7 2.7 0.9
Б	1.5 1.5 1.8 1.8 2.6 2.6 4.0 4.0 3.7 3.7 2.9 2.9	1.1 4.3 4.3 1.4 1.4 5.0 5.0 1.9 1.9 4.7 4.7 1.1	Д	7.0 7.0 7.2 7.2	0.8 2.5 2.5 0.8
			Е	0.7 0.7 1.1 1.1	5.2 6.0 6.0 5.2
			Ж	0.7 0.7 1.1 1.1	6.1 7.0 7.0 6.1
В	4.5 4.5 5.0 5.0	1.9 2.6 2.6 1.9			
			З	5.1 5.1 7.1 7.1	6.2 6.4 6.4 6.2
			И	5.1 5.1 7.1 7.1	8.0 8.2 8.2 8.0

Рисунок 5.4 Топологический чертёж резистивного слоя



Обозначение элемента	Координаты				Обозначение элемента	Координаты				Обозначение элемента	Координаты			
	x	y	x	y		x	У	x	y		x	y	x	y
А	0.5 0.5 1 1 3.8	0.5 1.5 1.5 0.8 0.8	3.8 5.2 5.2 4 4	2 2 1.5 1.5 0.5	Е	0.5 0.5 5 5 5.2 5.2	5 5.3 5.3 2.9 2.9 2.5	4.2 4.2 4.8 4.8 1.2 1.2	2.5 2.9 2.9 5.1 5.1 5	И	0.5 0.5	5.8 6.3	1.2 1.2	6.3 5.8
Б	5.6 5.6	0.5 0.9	7.5 7.5	0.9 0.5	Ж	0.5 0.5 1	4.1 4.8 4.8	1 2.2 2.2	4.5 4.5 4.1	К	3.8 3.8 5.2	6.3 6.6 6.6	5.2 5.5 5.5	6.7 6.7 6.3
В	0.5 0.5	1.7 2.4	1 1	2.4 1.7	З	3.8 3.8 5.4 5.4 7 7 7.5	5.6 6 6 5.3 5.3 5.4 5.4	7.5 7 7 5.2 5.2 4 4	4.8 4.8 5.1 5.1 5.7 5.7 5.6	Л	0.5 0.5 1.2	6.8 7.2 7.2	1.2 1.4 1.4	7.6 7.6 6.8
Г	6.6 6.6	2.4 3	7.5 7.5	3 2.4						М	0.5 0.5	7.5 7.8	1 1	7.8 7.5
Д	5.6 5.6 6.2 6.2 7	2.6 3 3 3.5 3.5	7 7.5 7.5 6.5 6.5	4.3 4.3 3.2 3.2 2.6						Н	7 7	7.5 8.3	7.5 7.5	8.3 7.5
										О	5.2 5.2	7.7 8.2	5.6 5.6	8.2 7.7
										П	1.8 1.8 2 2 7.5	8.1 8.5 8.5 9.5 9.5	7.5 6.8 6.8 2.5 2.5	8.8 8.8 9.2 9.2 8.1

Рисунок 5.5 Топологический чертёж слоя проводников и контактных площадок



Обозначение элемента	Координаты		Обозначение элемента	Координаты	
	x	У		x	У
А	0.5 0.5 1.2 1.2	0.5 2.3 2.3 0.5	Г	0.5 0.5 1.2 1.2	4 5.4 5.4 4
Б	6.5 6.5 7.5 7.5	0.5 1 1 0.5	Д	0.5 0.5 1.2 1.2	5.7 6.3 6.3 5.7

В	6.7 6.7 7.5 7.5	2.3 9.5 9.5 2.3	Ж	3.5 3.5 4 4	5.5 7.2 7.2 5.7
Е	0.5 0.5 1.8 1.8 2.2 2.2 2 2	6.7 7.8 7.8 8.3 8.3 7.8 7.8 6.7	З	4.8 4.8 5.4 5.4	7.6 8.1 8.1 7.6

Рисунок 5.6 Топологический чертёж защитного слоя

Технические данные содержат указания о размерах для справок, требования к точности изготовления плёночных элементов, ссылку на таблицу для проверки величины элементов, а также класс точности приборов и т.д.

Количество граф в таблице с данными по слоям не регламентируются, но, как правило, содержат: условное обозначение слоя; наименование слоя; материал слоя; электрические характеристики; метод формирования и т.д.

В таблице для проверок обязательные графы: точки измерения, проверяемая величина и допустимое отклонение.

На послойных документах размеры задаются в прямоугольных координатах. При этом все вершины данного элемента нумеруются арабскими цифрами. Контур каждого элемента обходят начиная с нижнего угла по часовой стрелке. Координаты вершин помещаются в таблицу, которую можно расположить на поле или отдельным документом.

На сборочном чертеже (рисунок 5.3) приводится общий вид топологической структуры платы, размещённой в корпусе. При этом указывается нумерация элементов и выводов в соответствии с обозначениями, принятыми в электрической схеме. Нумерация выводов должна соответствовать нумерации периферийных контактных площадок. Все составные части нумеруются в соответствии с номерами позиций, указанными в спецификации. Кроме того, на поле чертежа указываются вариант установки навесных компонентов, характер соединений и способ герметизации.

Спецификация – документ, определяющий состав сборочной единицы, содержит разделы: документация; сборочные единицы; детали; стандартные из-

делия; прочие изделия и материалы.

5.3. Конструктивные методы защиты ИМС от воздействия дестабилизирующих факторов

Основным способом защиты ИМС от воздействия дестабилизирующих факторов является герметизация. Ее осуществляют либо с помощью специально разработанных корпусов, либо нанесением защитных материалов непосредственно на поверхность ИМС.

Корпуса ИМС классифицируются по форме и расположению выводов. В зависимости от применяемых материалов подразделяются: на стеклянные, керамические пластмассовые, металлические т.д.

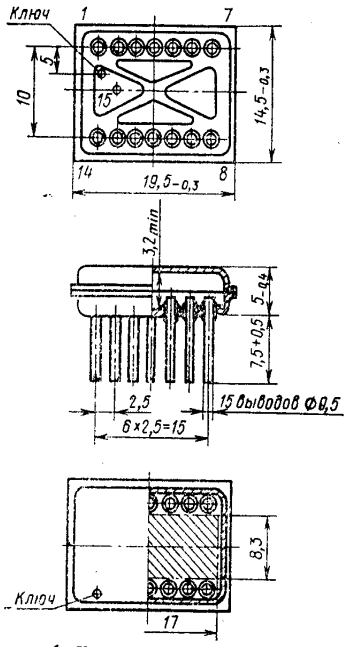


Рисунок 5.7. Конструкция металлостеклянного корпуса 1203(151.15-1)

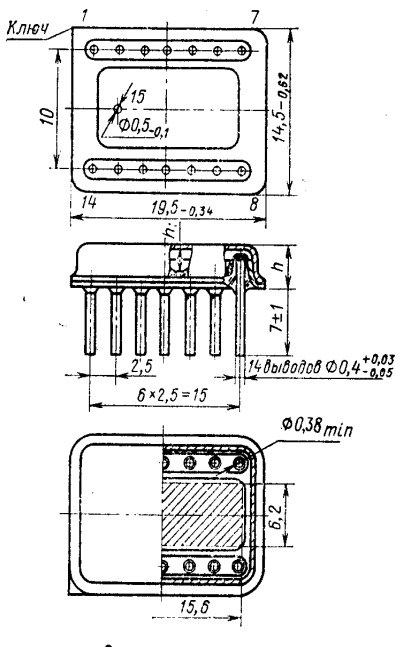


Рисунок 5.8. Конструкции металлостеклянных корпусов 1203(151.15-2; 151.15-3)

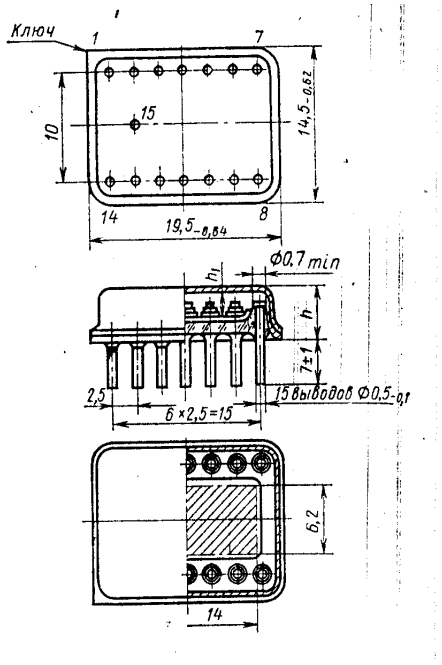


Рисунок 5.9. Конструкции металлостеклянных корпусов 1203(151.15-4; 151.15-5; 151.15-6)

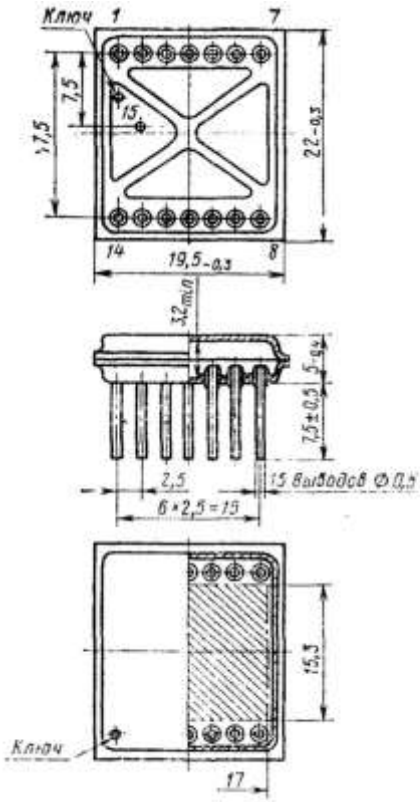


Рисунок 5.10. Конструкция металлостеклянного корпуса 1206 (153.15-1)

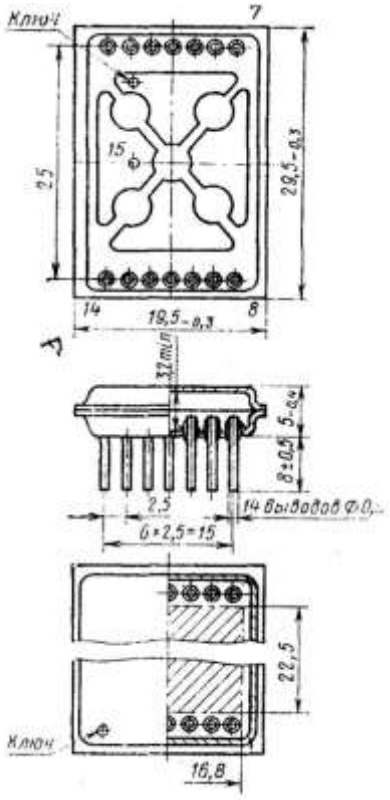


Рисунок 5.11. Конструкция металлостеклянного корпуса 1207 (155.15-1)

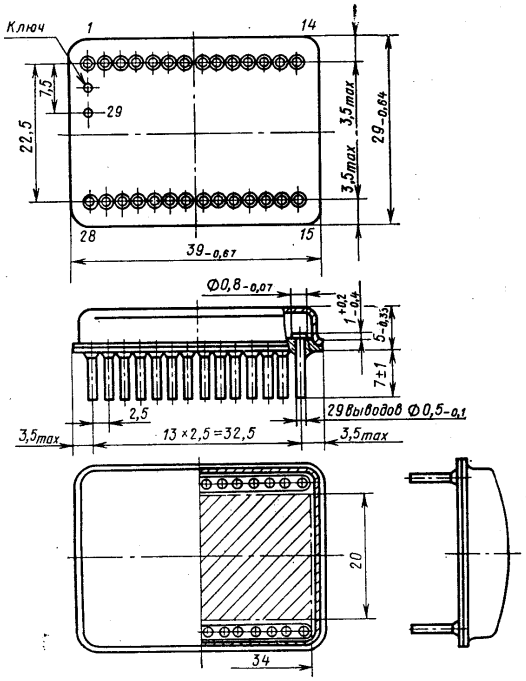


Рисунок 5.12. Конструкция металлостеклянного корпуса 1210 (157.29-1)

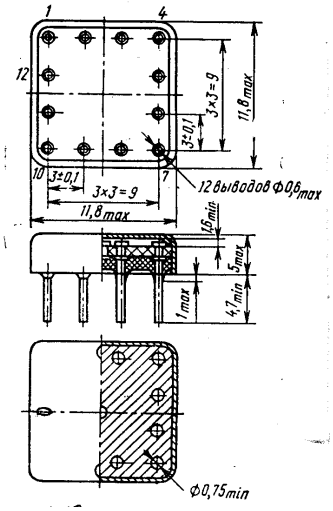


Рисунок 5.13. Конструкция металлополимерного корпуса «Тропа»

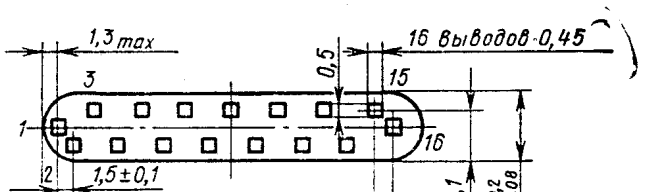


Рисунок 5.14 Конструкция металлополимерного корпуса «Пенал»

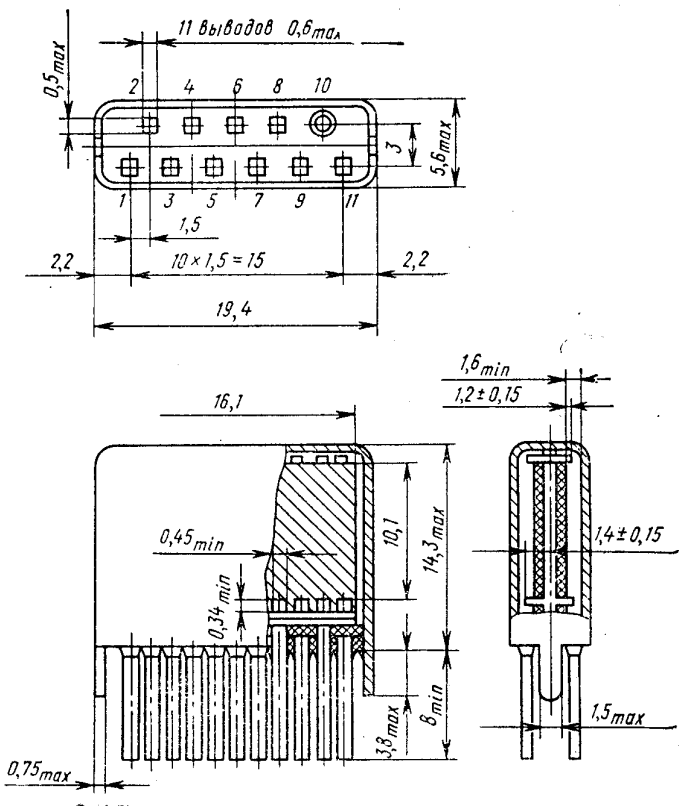


Рисунок 5.15 Конструкция металлополимерного корпуса “Акция”

Таблица 5.4. Конструктивно технологические характеристики корпусов для герметизации гибридных ИМС

Условное обозна-	Вари-ант ис-	Масса, г, не	Размеры мон-тажной пло-	Мощность рассеивания	Метод гер-метизации

чение корпуса	полне-ния	более	щадки, мм	при темпе-ратуре 20°С, Вт	корпуса
1203(151.14-2,3)	МС	1,6	15,6×6,2	3,2	КС
1203(151.15-1)	МС	2,0	17,0×8,3	1,6	АДС
1203(151.15-2,3)	МС	1,6	15,6×6,2	3,3	КС,АДС
1203(151.15-4,5,6)	МС	2,4	14,0×6,2	3,2	КС
1206(153.15-1)	МС	2,8	17,0×15,3	2,0	АДС
1207(155.15-1)	МС	6,5	16,8×22,5	2,5	КС
1210(157.29-1)	МС	14,0	34,0×20,0	4,6	ЛС
ТРОПА	МП	1,5	8,1×8,1	0,7	ЗК
ПЕНАЛ	МП	2,4	20,1×8,1	0,6	ЗК
АКЦИЯ	МП	1,8	16,1×10,1	0,5	ЗК
Примечание: 1)МС и МП – металлостеклянные и металлополимерные корпусы; 2)для посадки платы в корпус используют клей холодного отверждения; 3)КС, АДС, ЛС, ЗК – конденсаторная, арнодуговая, лазерная сварка и заливка компаундом соответственно.					

Выбор типа корпуса определяется условиями работы и требованиями по сборке, установке и монтажу ГИС на печатных платах. Выбор типоразмера корпуса определяется размерами платы ГИС и числом выводов. Допускается применение корпусов большим, чем это необходимо по схеме, числом выводов. При установке ГИС на печатную плату не задействованные выводы удаляются, но нумерация выводов сохраняется. Нумерация начинается с вывода, расположенного в зоне ключа в качестве которого может быть выступ, выемка или другой конструктивный знак, а так же надпись, выполненная маркировкой.

5.4. Бескорпусная герметизация ГИС

Начальным этапом герметизации, как бескорпусной, так и с использованием корпусов является предварительная защита поверхности ГИС плёнкой диэлектрических материалов, параметры которых приведены в таблице 5.5. Поверх этих сравнительно тонких слоёв электрически и химически инертных материалов при бескорпусной герметизации наносят герметики либо в электростатическом поле распылением, либо погружением или поливом. В качестве герметиков используют фторосодержащие лаки ФП-525, УР-231, либо эмаль ФП-545, толщиной 0,2-1,2мм.

Контрольные вопросы

1. Схемотехнические данные и требования при проектировании топологии ГИС.
2. Технологические данные и ограничения при проектировании топологии ГИС.
3. Основные требования к материалу подложки.
4. Структура и содержание топологического чертежа ГИС.
5. Метод образмеривания на послойных чертежах.

Глава 6. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ ГИС

6.1. Принципы практического проектирования и компоновки топологической структуры ГИС

Процесс проектирования топологической структуры ГИС включает последовательное выполнение четырех основных этапов:

1. Расчет геометрических размеров и выбор формы пленочных элементов.
2. Определение размеров платы, выбор компонентов и типоразмера корпуса.
3. Разработку коммутационной схемы соединений элементов на подложке.
4. Разработку окончательного варианта топологии.

При выполнении каждого из этих этапов необходимо придерживаться следующих общих принципов:

- минимизация площади, занимаемой элементами, компонентами и схемы в целом;
- минимизация числа пересечений межэлементных соединений;
- равномерное расположение элементов и компонентов на площади подложки;
- минимизация числа используемых материалов для реализации пленочных элементов;
- минимизация длины соединительных проводников.

Первый этап проектирования предполагает анализ электрической схемы с целью выделения пленочных и навесных (дискретных) элементов. К навесным элементам, кроме активных, можно отнести часть пассивных, реализация которых затруднена технологически или когда в пленочном исполнении они занимают большую площадь.

Расчет геометрических размеров пленочных элементов производится в последовательности, изложенной в соответствующих разделах.

Для определения площади, занимаемой ГИС, необходимо провести расчет площади под каждый вид пленочных элементов и дискретных компонентов. В качестве компонентов ГИС применяют бескорпусные диоды и диодные матрицы, транзисторы и транзисторные матрицы, полупроводниковые ИМС, конденсаторы и т.д. При этом компоненты могут иметь жесткие или гибкие выводы.

Способ монтажа компонентов на плату должен обеспечить фиксацию положения компонента и выводов, сохранение его целостности, параметров и свойств, а также отвод тепла. На рисунках 6.1. и 6.2. показаны способы установки, крепление и присоединения выводов компонентов ГИС. В таблице 6.1. приведена система обозначений полупроводниковых приборов, используемых в качестве компонентов ГИС.

Способы установки на плату, электрические параметры, габаритные и присоединительные размеры транзисторов приведены в таблице 6.2 и на рисунке 6.3, а диодов, диодных матриц и диодных сборок – в таблице 6.3 и на рисунке 6.4. Из разных типов конденсаторов перспективными для применения в ГИС являются керамические конденсаторы К10-17 (рисунок 6.5.) и К10-9 (рисунок 6.6.). Их параметры приведены в таблицах 6.4. и 6.5. Эти конденсаторы выпускаются двух видов – с посеребренными и лужеными торцами, являющиеся выводами обкладок. Посеребренные выводы предназначены для присоединения к контактным площадкам с помощью гибких выводов (рисунок 6.7а), луженые – непосредственно к контактным площадкам платы ГИС (рисунок 6.7б).

Конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики имеют нормированный ТКС (группы П33, М47, М75, М750, М1500, М2200), где буква означает: П – положительный, М – отрицательный ТКС, а цифра – среднее значение ТКС$\cdot 10^{-6}$ на частоте порядка МГц. Конденсаторы с диэлектриком из низкочастотной керамики имеют ненормированный ТКС с допуском ±30%, ±50%.

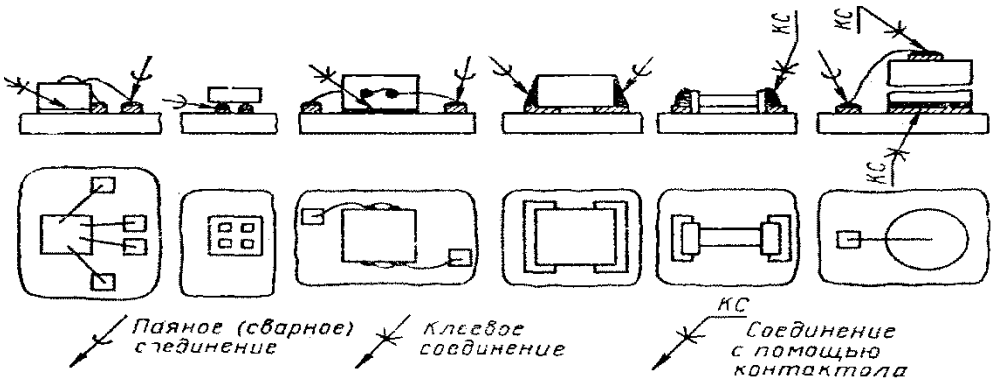


Рисунок 6.1 Способы крепления компонентов ГИС и присоединения их выводов

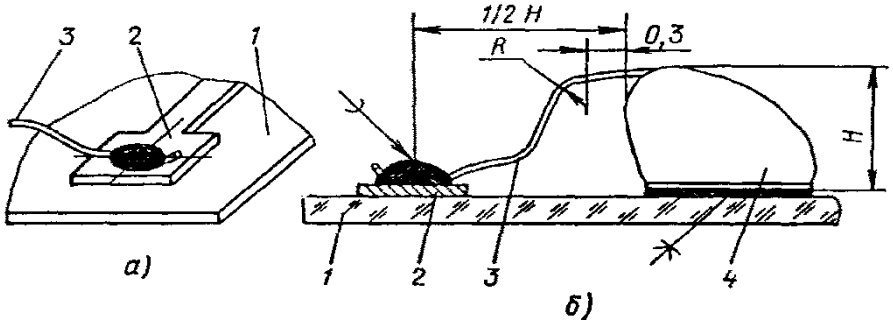


Рисунок 6.2 Крепление компонентов ГИС к плате и присоединение гибкого вывода к контактной площадке

Таблица 6.1 Система обозначений полупроводниковых приборов

1-й элем-т обозн.	2-й элем-т обозн.	3-й, 4-й и 5-й элемент обозначения (характеризует качественные свойства, тип или назначения прибора, а также порядковый номер разработки технологического типа прибора)									6-й элем-т обозн.
Г – германий и его соединения К – кремний и его соединения	Т – транзисторы биполярные П – транзисторы полевые Д – диоды	101--199	201--299	301--399	401--499	501--599	601--699	701--799	801--899	901--999	от А до Я
		Малой мощности P_{max}<=0,3 Вт			Средней мощности 0,3 Вт<P_{max}<=1,5 Вт			Большой мощности P_{max}>1,5 Вт			
		f<= 3 МГц	3 МГц <f<= 30МГц	f> 3 МГц	f< 3 МГц	3 МГц <f<= 30МГц	f> 3 МГц	f<= 3 МГц	3 МГц <f<= 30МГц	f> 3 МГц	
		Выпрямительные				Импульсные					
		малой мощности I<= 0.3 А	средней мощности 0.3 <I<= 10 А	Магнитодиоды и термодиоды	Универсальные τ>500 нс	150нс <τ≤ 500нс	30нс <τ≤ 150 нс	5нс <τ ≤ 30 нс	1нс <τ≤ 5нс	τ≤1 нс	

Таблица 6.2 Способы установки на плату, электрические параметры, габариты и присоединительные размеры транзисторов

Способ установки	Тип	Электрические параметры				Габаритные размеры, мм, не более			Интервал рабочих температур, °С	Масса, г, не более
		$I_{ктах}$, мА	$P_{ктах}$, мВт	$U_{кэ}$, В	$h_{21э}$	a	b	H		
Рис. 6.3а	КТ120-КТ120В	10	10	60	20-200	1,00	1,00	1,0	-10÷56	0,020
	КП201Е-КП201Л	20	150	20	20-90	1,20	1,20	0,6	-40÷85	0,005
	КТ202А-КТ202Г	10	15	15	40-150	0,83	0,83	0,5	-60÷85	0,012
	КТ307А-КТ307Г	20	15	10	20	0,86	0,86	0,8	260÷85	0,002
	КТ317А-КТ317В	15	15	5	25-250	1,30	1,30	1,1	-60÷85	0,010
	КТ318А-2Т318В	20	15	10	70-280	1,00	1,00	1,0	-60÷85	0,010
	КТ324А-КТ324Е	20	15	10	20-250	0,66	0,66	0,6	-55÷85	0,002
	КТ331А-КТ331Г	20	15	15	40-120	1,20	1,20	0,8	-60÷125	0,003
	КТ332А-КТ332Д	20	15	15	20-120	1,20	1,20	0,8	-60÷125	0,003
	2Т354А-2Т354В	20	20	10	40-400	1,20	1,20	0,8	-60÷85	0,001
	2Т360А-2Т360В	20	10	15	80-240	1,29	1,20	0,80	-40÷55	0,005
	КТ369А-КТ369Г	250	50	45	40-200	2,00	2,00	1,0	-60÷85	0,020
Рис. 6.3б	2Т364А-2Т364В	200	30	20	40-240	1,25	3,00	1,00	-60÷85	0,006
Рис. 6.3в	2Т33А-2Т333Е	20	15	10	50-280	0,75	0,75	0,34	-60÷85	0,010
	КТ348А-КТ348В	15	15	5	25-250	0,75	0,75	0,34	-40÷85	0,010
	КТ359А-КТ359В	20	15	15	50-280	0,75	0,75	0,34	-50÷85	0,010
Рис. 6.3г	2Т205А	20	40	200	10-40	1,25	1,25	0,37	-60÷125	0,003

Примечание:
$I_{ктах}$ – максимальный ток коллектора;
$P_{ктах}$ – максимальная мощность в цепи коллектора;
$U_{кэ}$ – постоянное напряжение коллектор-эмиттер;
$h_{21э}$ – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером.

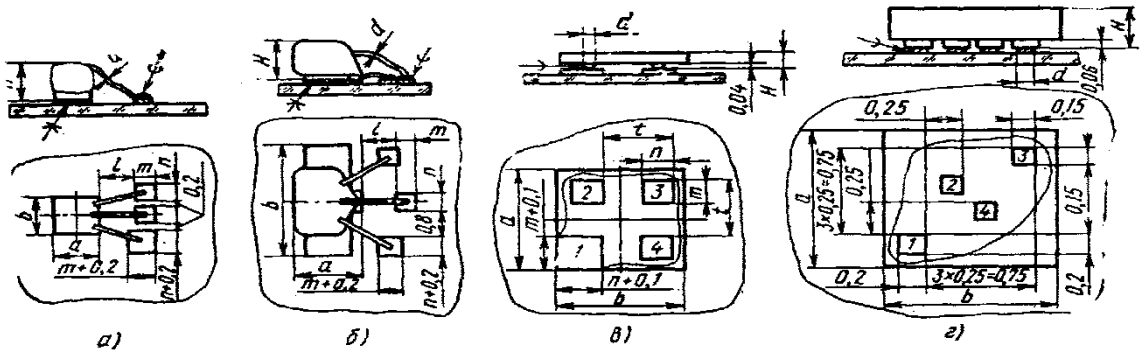


Рисунок 6.3 Способы установки на плату, электрические параметры, габаритные и присоединительные размеры транзисторов

Таблица 6.3. Способы установки на плату, электрические параметры, габаритные и присоединительные размеры бескорпусных диодных матриц, диодных сборок, диодов

Способ установки	Тип	Электрические параметры				Габаритные размеры, мм, не более			Масса, г, не более
		$U_{обр\ max}$, В	$I_{пр max}$, мА	кол-во соединий	схема соединения	a	b	H	
Рис. 6.4а	2Д918Б, 2Д918Г, КД907Б, КД907Г	40	50	4	с общим анодом	1.15	1.15	1.0	0.005 0.006
Рис. 6.4б	КД907А- КД901Г 2Д904А- 2Д904Е	10 12	- 5	6 6	с общим катодом	1.1 1.3 1.0	1.3 1.1 1.0	0.8 1.0	0.005 0.010
Рис. 6.4в	2ДС408А, 2ДС408Б	12	20	4	диоды не соединены между собой	0.9	1.1	0.7	0.006
Рис. 6.4г	2Д910А- 2Д910В 2Д911А- 2Д911Б	5	10	3	с общим катодом	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	0.01 -
Рис. 6.4в	2Д912А КД913А	10 10	5 10	3 3	с общим анодом с общим катодом	0.75 0.75	0.75 0.75	0.34 0.75	0.01 0.002

Примечание:

$U_{обр\ max}$ – постоянное обратное напряжение в интервале температур –60 ÷ 80° С;

$I_{обр\ max}$ – суммарный средний прямой ток через все диоды или один диод в интервале температур –60 ÷ 80° С.

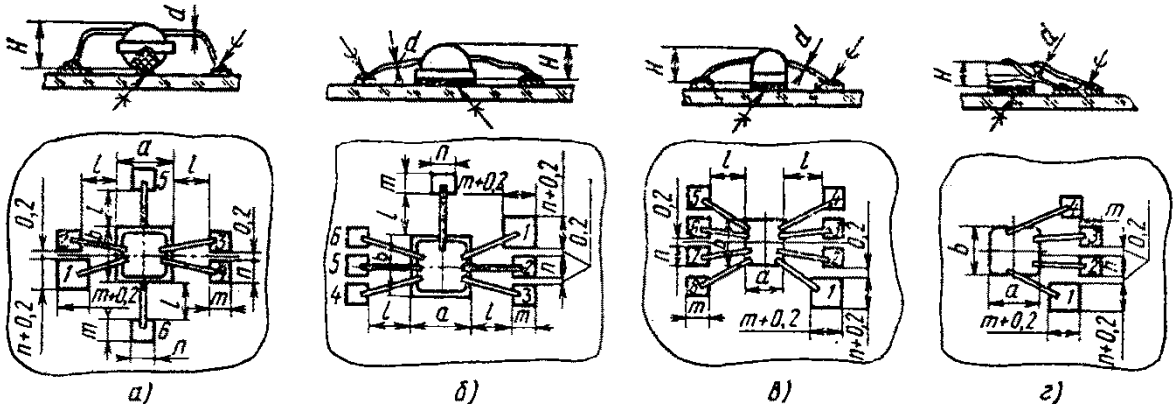


Рисунок 6.4 Способы установки на плату, электрические параметры, габаритные и присоединительные размеры бескорпусных диодных матриц, диодных сборок, диодов

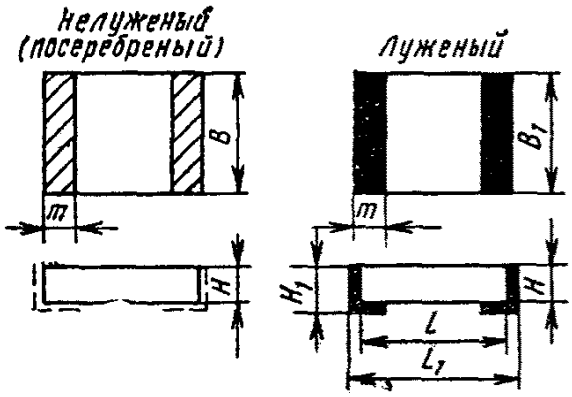


Рисунок 6.5 Конструкции конденсатора К10-17 с нелужеными и лужеными выводами (B_1, L_1, H_1 – размеры после лужения)

В качестве электролитических конденсаторов в ГИС целесообразно использовать оксидно-полупроводниковые конденсаторы К53-15 и К53-16, отличающиеся конструкцией выводов.

Конденсатор К53-15 (рисунок 6.8) имеет выводы по типу шариковых, а конденсатор К53-16 имеет гибкие выводы (рисунок 6.9). Параметры этих конденсаторов приведены в таблицах 6.6 и 6.7.

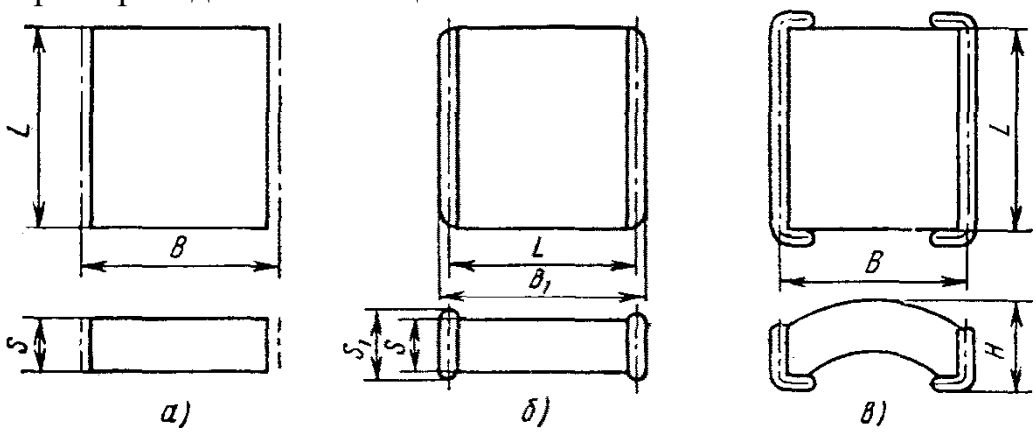


Рисунок 6.6 Конструкции конденсатора К10-9 с нелужеными (а) и лужеными (б) выводами; конденсатора К10-9М с лужеными выводами (в) (B, S –размеры после металлизации, B_1, S_1, – размеры после металлизации и лужения)

Таблица 6.4. Параметры конденсаторов К10-17

Пределы номинальных емкостей для групп ТКС, пФ			Допустимая реактивная мощность, вар	Габаритные размеры, мм							Масса, г, не более
П33	М47	М75		L	B	H	L_1	B_1	H_1	m	
22-68	22-82	33-100	1	1.5	1.2	1.0	1.5	1.4	1.2	0.2-0.5	0.1
75-150	91-180	110--200	2	2	1.7	1.0	2	1.9	1.2	0.2-0.7	0.1
160-510	200-620	220-910	3.5	4	2.7	1.0	4	3.0	1.2	1-1.5	0.2
560-910	690-1000	1000-1200	5	5.5	2.7	1.0	5.5	3.0	1.2	1.5-2	0.3
1000-1800	1100-2000	1300-2400	10	5.5	4.3	1.0	5.5	4.6	1.2	1.5-2	0.4
560-820	680-1000	1000-1500	7	4	2.7	1.8	4	3.0	2.0	1-1.5	0.3
1000-1500	1100-1800	1600-2000	10	5.5	2.7	1.8	5.5	3.0	2.0	1.2-2	0.4
2000-3000	2400-3600	2700-3900	20	5.5	4.3	1.8	5.5	4.6	2.0	1.5-2	0.5

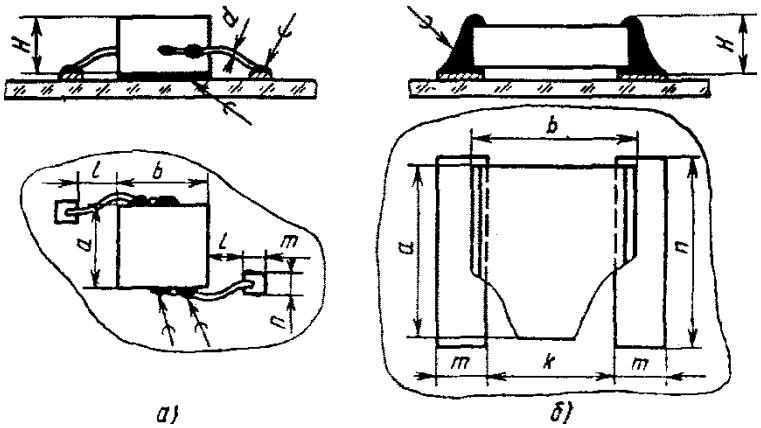


Рисунок 6.7 Способы установки конденсаторов К10-17 и К10-9 на плату ГИС:
а – с гибкими выводами; *б* – на контактные площадки

Таблица 6.5. Параметры конденсаторов К10-9

Типо-размер	Пределы номинальных емкостей для групп ТКС, пФ					Допустимая реакт. мощ-ность, вар	Габаритные размеры, мм					Масса г, не более
	П33, М47	М75	М1500	Н30	Н90		L	B	S	B_1	S_1	
1	2.2-10	11-24	36--1000	150--1000	1000--3300	1.25	2	2	0.6	2	1.2	0.1
2	11-27	27-51	110--200	1500	4700	2.5	2	4		4		0.15
3	30-51	56-120	220--390	2200--3300	6800--10000	5	4					0.3
4	10-51	22--120	180--390	680--3300	1000--10000	5	2.5	5.5		5.5		0.3
5	56-120	130--270	430--1000	4700--6800	15000--2200	10	6					0.6
6	11-24	27-62	110--240	1500--2200	4700--10000	1.25	2	2	1	2	1.5	0.1
7	30-62	56--120	220--470	2200--4700	6800-15000	2.5	2	4		4		0.15
8	68-120	130--270	520--1000	6800--10000	22000--33000	5	4					0.3
9	56--120	130--270	430--2000	4700--10000	15000--33000	5	2.5	5.5		5.5		0.6
10	130-330	300--620	1100--2400	15000--33000	57000--68000	10	6					0.6
11	27-38	68-91	273-390	3300	15000	2,5	2	2	1,4	2	2	0,2
12	68-100	130-200	510-750	6800	22000	5	2	4		4		0,3

13	110-200	220-430	820-1500	10000-15000	33000-47000	10	4					0,5
14	130-200	300-400	1100-1500	15000	47000	10	2,5	5,5		5,5		0,5
15	220-560	470-1200	1600-4700	22000-47000	68000-100000	20	6					1,0
16	110-150	220-430	820-1500	10000-15000	33000-47000	5	2	4	2,5	4	3	0,3
17	160-330	470-820	1600-3000	22000-33000	68000-100000	10	5					0,5
18	220-330	470-820	1600-3000	22000-33000	68000-100000	10	2,5	5,5	2,5	5,5		0,5
19	360-820	910-2200	3300-8200	47000-68000	15000-22000	20	6					1,0
20	910-2200	2400-3900	9100-15000	10000-15000	33000-47000	30	8	8	2,5	8		1,5

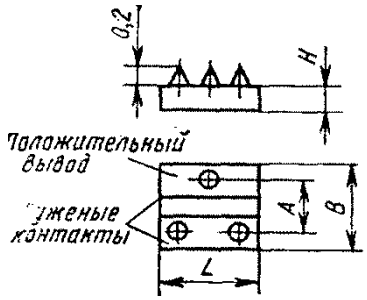


Рисунок 6.8 Конструкция конденсатора К53-15

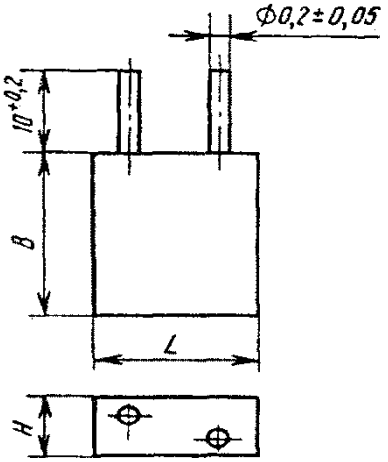


Рисунок 6.9 Конструкция конденсатора К53-16

Таблица 6.6 Параметры конденсаторов К53-15

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры, мм				Масса, г, не более
		L	B	H	A	
3	2.2; 3.3	2.5	4	2	2.3	0.15
	4.7; 6.7	5.0				0.25
	10; 15		8		5.5	0.65
	22; 33	10.0				1.5
6.3	1.5; 2.2	2.5	4	2	2.3	0.15
	3.3; 4.7	5.0				0.25
	6.8		8		5.5	0.65
	10; 15	10.0				1.5
10	1.0; 1.5	2.5	4	2	2.3	0.65
	2.2; 3.3	5.0				1.5
16	0.68; 1.0	2.5	4	2	2.3	0.15
	1.5; 2.2	5.0				0.25
	3.3; 4.7		8		5.5	0.65
	6.8; 10	10.0				1.5
20	0.47; 0.68	2.5	4	2	2.3	0.15
	1.0; 1.5	5.0				0.25
	2.2; 3.3		8		5.5	0.65
	4.7; 6.8	10.0				1.5
30	0.1; 0.15; 0.22	2.5	4	1.6	2.3	0.12
	0.68; 1.0	5.0		2		0.25
	1.5; 2.2				5.5	0.65
	3.3; 4.7	10.0	8			1.5

	0.33; 0.47	2.5			2.3	0.15

Таблица 6.7 Параметры конденсаторов К53-16

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры, мм			Масса, г, не более
		L_{max}	B_{max}	H_{max}	
1.6	1.5; 2.2 4.7 6.8; 10	1.9 2.3 2.3	3.4 3.7 5.0	3.4 1.6 1.6	0.05 0.075 0.1

Ориентировочную площадь платы определяют по формуле:

$$S = k\left(\sum_{i=1}^{n} S_{R_I} + \sum_{j=1}^{k} S_{C_J} + \sum_{i=1}^{m} S_{\mathrm{K}_I} + \sum_{i=1}^{r} S_{\mathrm{HK}_I}\right), \qquad (6.1)$$

где k – коэффициент запаса по площади (2-3);

$S_{R_I}, S_{C_J}, S_{\mathrm{K}_I}, S_{\mathrm{HK}_I}$ – площади, занимаемые резисторами, конденсаторами, контактными площадками и навесными компонентами соответственно.

После вычисления потребной площади платы выбирают ее типоразмер согласно таблице 5.4 и типоразмер корпуса.

6.2. Разработка коммутационной схемы соединений

Разработка коммутационной схемы соединений является составной частью топологического проектирования и включает в себя преобразование исходной электрической схемы с целью составления схематического плана размещения элементов и соединений между ними на подложке микросхемы. На этом этапе целесообразно руководствоваться следующими принципами:

- упрощение конфигурации электрической схемы для уменьшения числа пересечений и изгибов линий;
- выделение на преобразованной схеме пленочных и навесных элементов;
- снабжение электрической схемы внутренними и периферийными контактными площадками;
- рассмотрение пассивной части как графа, вершинами которого являются контактные площадки, а ребрами – пассивные элементы электрической цепи. Преобразование исходной схемы осуществляется перекладыванием ребер графа до тех пор, пока число пересечений внутрисхемных соединений не будет

сведено к минимуму. При этом одновременно решают задачу взаимного расположения элементов и соединений с учетом равномерного расположения периферийных контактных площадок и кратчайшего пути прохождения электрического сигнала.

В качестве примера на рисунке 6.10а приведена исходная электрическая схема, а на рисунке 6.10б, в – варианты ее преобразования. В данном примере размещение периферийных контактов площадок отвечает двухстороннему расположению выводов корпуса ГИС. Пассивные элементы и внутрисхемные соединения, выполняемые групповыми методами на рисунке, выделены более толстыми линиями. Тонкопленочные резисторы изображены так, что большим номинальным значениям сопротивлений соответствуют более узкие и длинные конфигурации.

На следующем этапе разработки коммутационной схемы соединений, из преобразованной схемы рисунка 6.10в удаляются навесные компоненты, в том числе и перемычка, замещая их соответствующими контактными площадками с последовательной за периферийными контактными площадками их нумерацией.

Пленочные элементы в процессе их размещения на площади заданных размеров вычерчивают в масштабе 10:1 или 20:1. Элементы и компоненты размещают в соответствии с преобразованной схемой соединений. При этом грани элементов и компонентов располагают вдоль осей координатной сетки. Все элементы и компоненты снабжают контактными площадками, расположение и размеры которых должны соответствовать конструктивно - технологическим требованиям. При этом расположение периферийных контактных площадок, предназначенных для внешних соединений, должно соответствовать выводам корпуса.

Навесные компоненты изображают с соблюдением порядка расположения выводов.

Одновременно с размещением элементов и компонентов, проводят линии электрической связи параллельно осям координат.

При разработке топологии нужно учитывать обеспечение возможности

измерений электрических параметров пленочных элементов, а также возможность выполнения требований к монтажу применяемых навесных компонентов и их сборке.

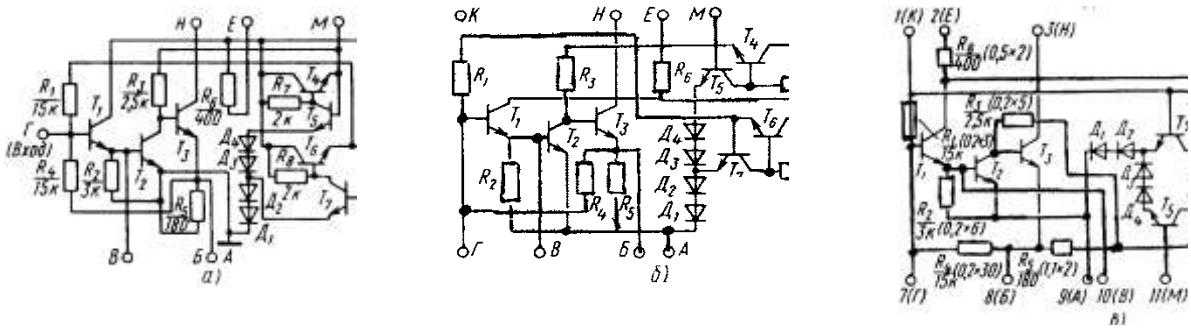


Рисунок 6.10 Электрическая схема:
6.10а – исходная; 6.10б – после преобразования графа пассивной части; 6.10б – после преобразования с учетом конструктивных требований

Последовательность разработки топологии и коммутационной схемы

Разработка топологии является одним из основных этапов в процессе конструирования ГИС, на котором решается задача компоновки пленочных элементов микросхем с учетом общей компоновки микросхемы, электрических особенностей схемы и технологических особенностей ее изготовления.

Сущность разработки топологии состоит в том, что рассчитываются геометрические размеры пленочных элементов, определяется их взаимное расположение и формы и в определенном масштабе вычерчивается их размещение на подложке.

Для разработки топологии необходимы:

- электрические данные и требования;
- основные конструктивные данные и требования;
- основные технологические данные и ограничения.

Электрические и конструктивные данные и требования определяются на этапе эскизного проектирования, включающего разработку принципиальной электрической схемы и конструкции проектируемой аппаратуры.

Основные технологические данные и ограничения определяются разработанной технологией изготовления микросхем, освоенной на предприятиях, и могут уточняться по мере ее совершенствования.

Техническое задание на конструирование ГИС должно содержать следующие сведения:

- схема принципиальная электрическая узла, разрабатываемого в виде конструктивно законченной ГИС или БГИС;
- номинальные значения электрических параметров и поле допуска;
- частные технические требования (допустимые значения паразитных реактивностей, требования к стабильности номиналов, степени механической прочности и т.д.).

Этапы разработки топологии

Разработку топологии пленочных микросхем целесообразно начинать с согласования общих электрических, конструктивных и технологических данных. В процессе согласования следует определить основные технологические приемы изготовления микросхем, возможные размеры пленочных элементов (с учетом требований к точности изготовления проводников коммутации), а также вводимые или паразитные связи. Окончательные размеры подложки определяются только после проработки одного-двух вариантов топологии.

В зависимости от выбранной технологии изготовления ГИС выбирается последовательность нанесения слоев микросхемы. Основные схемы последовательности нанесения слоев для различных вариантов технологии приведены в приложениях 2 - 4 .

Разработку топологии рекомендуется разделить на следующие этапы:

- разработка коммутационной схемы топологии, т.е. выбор взаимного расположения элементов (резисторов, конденсаторов) и контактных площадок, при котором их соединение должно удовлетворять предъявленным к топологии конструктивным и электрическим требованиям;
- расчет геометрических размеров пленочных элементов проводников и контактных площадок с учетом требований по точности, мощности рассеяния, напряжению, допустимому сопротивлению проводников и др.;

– размещение и выбор форм пленочных элементов на рабочей площади подложки заданных размеров с учетом конструктивно-технологических ограничений и рекомендаций (приложение 5);
– оценка качества разработанной топологии и при необходимости проведение соответствующей коррекции.

Разработка коммутационной схемы

Исходными данными для разработки коммутационной схемы топологий являются: 1) принципиальная электрическая схема с перечнем элементов; 2) конструктивные требования:

– желательный или максимально допустимый размер подложки
– расположение и размеры контактных площадок, обусловленные предполагаемой конструкцией микросхемы (расположением выводов корпуса) и устройства в целом;
– допустимые значения паразитных емкостных связей и утечек между элементами и узлами схемы;
– диапазон рабочих частот устройства;
– пределы и шаг регулировки подстраиваемых элементов.

Основной задачей этого этапа является упрощение коммутационных связей (сокращение числа пересечений проводников и уменьшение их длины). При этом преобразовании возможны перестановки контактных площадок, не нарушающих электрические и конструктивные требования.

Порядок разработки может быть следующим:

– из принципиальной схемы в соответствии с перечнем элементов исключают навесные элементы и их выводы заменяют контактными площадками;
– в полученной коммутационной схеме выводные контактные площадки (вход, выход, питание) размещают в соответствии с конструктивными и электрическими требованиями (например, вход и выход схемы должны располагаться на противоположных сторонах

подложки, питание должно быть расположено на определенной стороне и т.д.);

– определяют возможности уменьшения числа пересечений и производят соответствующие упрощения.

В качестве примера рассмотрим процесс разработки коммутационной схемы для следующего узла (рисунок 6.11).

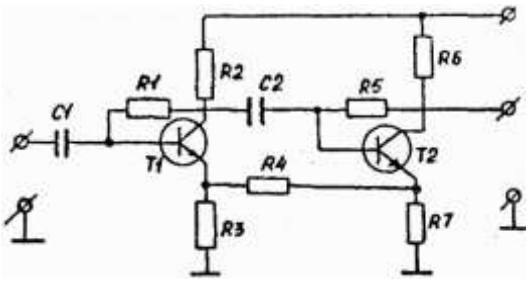


Рисунок 6.11 Принципиальная электрическая схема узла

Исходные данные:

1) принципиальная электрическая схема;

2) конструктивные требования:

– исходные контактные площадки желательно размещать на нижней стороне подложки;

– выходные контактные площадки желательно размещать по возможности дальше от нижней стороны подложки.

Из принципиальной электрической схемы (рисунок 6.11) исключаем навесные элементы и вычерчиваем схему, в которой выводы навесных элементов, транзисторов *T*1 и *T*2 заменяем контактными площадками (рисунок 6.12).

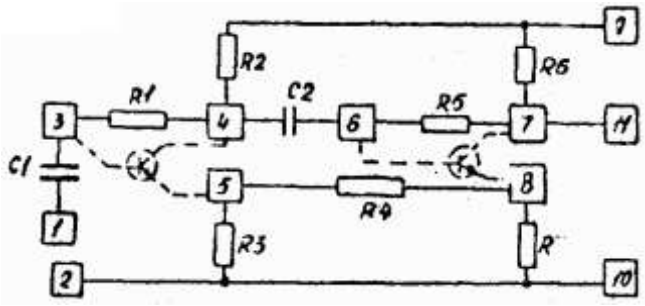


Рисунок 6.12. Коммутационная схема без навесных элементов

Полученную схему необходимо преобразовать, т.е. переставить контактные площадки в соответствии с конструктивными требованиями, приведенны-

ми в исходных данных, на основании которых контактные площадки 1, 2 должны располагаться в нижней части подложки, а 9 - 11 – в верхней (рисунок 6.13).

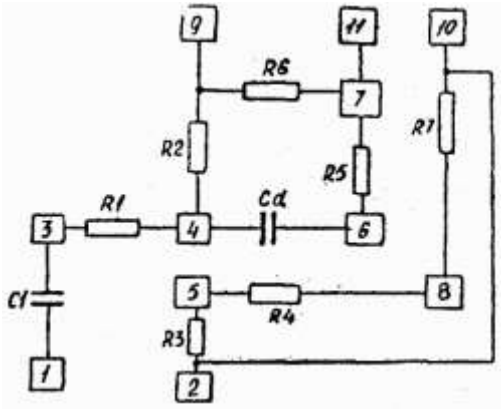


Рисунок 6.13 Преобразованная схема

На этом разработку коммутационной схемы можно считать законченной.

В процессе разработки коммутационной схемы контактные площадки можно нумеровать произвольно. Окончательная нумерация контактных площадок производится после окончания разработки топологии.

Определение размеров подложки

Для ориентировочного расчета размеров подложки необходимо подсчитать площадь, занимаемую элементами схемы. Как показывает опыт, площадь подложки должна быть в 1,5 - 3 раза больше площади, занимаемой всеми элементами. Это диктуется необходимостью наличия технологической зоны по краям подложки, зазоров между элементами, соединительных пленочных проводников. Общая площадь подложки в соответствии с формулой 6.1 равна:

$$S = k\left(\sum_{i=1}^{n} S_{R_I} + \sum_{j=1}^{k} S_{C_J} + \sum_{i=1}^{m} S_{\mathrm{K}_I} + \sum_{i=1}^{r} S_{\mathrm{HK}_I}\right),$$

где n – количество пленочных резисторов;

S_{R_i} – площадь i-го резистора;

k – количество пленочных конденсаторов;

S_{c_j} – площадь j-го конденсатора;

m – количество навесных элементов (транзисторов, диодов, конденсаторов, бескорпусных полупроводниковых ИС);

S_{K} – площадь, занимаемая m-м навесным элементом;

$S_{нк}$ – площадь k-й контактной площадки;

r – количество контактных площадок.

Площадь, которую занимают навесные элементы, определяется по их габаритам согласно чертежам и справочным данным.

Данные на основные навесные элементы ГИС приведены в [5]. Площадь подложки округляют до площади ближайшей подложки из рекомендованного ряда (таблица 5.4). Ряд стандартных подложек образуется из деления подложки размером 60x48 мм на целое число частей с учетом конструкций корпусов гибридных интегральных схем согласно приведенной форме:

Размер	48	24	16	12	8	6	3
60	+						
30	+	+					
20		+	+				
15				+	+		
12			+		+		
10				+	+		
8				+	+		
6					+		
5						+	
4						+	+

Материал подложки выбирается по таблице 5 приложения I.

Размещение и выбор формы пленочных элементов

Исходными данными для размещения элементов являются:

- коммутационная схема топологии;
- размер подложки;
- геометрические размеры пленочных элементов;
- электрические требования и условия;
- основные технологические данные и ограничения.

Способ и последовательность работ по размещению и выбору формы элементов носит индивидуальный характер, основанный на опыте разработчика.

Для получения наиболее простых геометрических форм элементов и минимальной занимаемой площади часто необходима проработка не одного, а нескольких вариантов топологии, более полно удовлетворяющих заданным требованиям.

При проработке первого варианта обычно не удается получить качественной топологии и работа над следующим вариантом сводится к изменению отдельных узлов первого варианта, направленному к устранению недостатков. Для просмотра конфигурации отдельных слоев в каждом варианте топологии целесообразно производить раскраску слоев в различные цвета или различную штриховку.

Вычерчивание пленочных элементов в процессе их размещения целесообразно производить на миллиметровой бумаге в определенном масштабе 10:1 или 20:1.

При размещении элементов необходимо стремиться к тому, чтобы их форма была по возможности наиболее простой и чтобы площадь, занимаемая элементами, была по возможности минимальной.

Рекомендуется проектировать топологию микросхемы в прямоугольной системе координат. Придание элементам форм, состоящих из отрезков прямых непараллельных осям координат, допустимо в тех случаях, когда это приводит к значительному упрощению формы элемента.

Если после размещения всех элементов осталась значительная незанятая площадь подложки, рекомендуется перейти на меньший размер платы или увеличить ширину проводников для уменьшения их сопротивления.

После окончательного выбора размера подложки в последний вариант топологии микросхемы вносят изменения (если позволяет площадь подложки), направленные на упрощение технологии изготовления пленочных микросхем (увеличение размеров контактных площадок, увеличение допусков на совмещение слоев, увеличение расстояний между элементами и т.д.).

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТОПОЛОГИИ

Спроектированная топология должна обладать следующими качествами:

а) удовлетворять всем предъявленным конструктивным и электрическим требованиям;

б) удовлетворять всем ограничениям, обусловленным технологией изготовления микросхем;

в) расположение элементов на подложке должно обеспечивать нормальную работу схемы при заданном конструктивном исполнении и при заданных внешних климатических воздействиях;

г) топология должна быть составлена таким образом, чтобы изготовление микросхемы обходилось по возможности простой и дешевой технологией;

д) использование площади должно быть по возможности максимальным.

Выполнение требований "а" и "б" осуществляется в процессе проектирования топологии и по мере необходимости вносятся соответствующие коррективы.

Выполнение требований "г" и "д" носит рекомендательный характер и имеет чисто качественную оценку.

Для выполнения требований "в" необходимо проведение специальных расчетов емкостных паразитных связей в топологии и температурных режимов, которые могут быть сделаны после разработки топологии. В случае необходимости в топологию должны быть внесены соответствующие изменения.

Контрольные вопросы

1. Этапы проектирования топологической структуры ГИС.
2. Схемотехнические данные и требования при проектировании топологии ГИС.
3. Технологические данные и ограничения при проектировании топологии ГИС.
4. Критерии качества топологической структуры ГИС.
5. Конструктивно-технологические ограничения при разработке топологической структуры ГИС.
6. Способы крепления компонентов ГИС и присоединения их выводов.
7. Структура и содержание топологического чертежа ГИС.

8. Метод расстановки размеров на послойных чертежах.
9. Этапы разработки топологии
10. Этапы разработки коммутационной схемы соединений
11. Как рассчитывается площадь платы ГИМС?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, Ю.А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники. [Электронный ресурс] / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. — Электрон. дан. — СПб.: Лань, 2013. — 496 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/12948 — Загл. с экрана.

2. Коваленко А.А. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для студ. вузов. – М. : Академия, 2010. – 240 с. – 135 экз.

3. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем микроэлементов ЭВА. – М.: Радио и связь, 1982

4. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1983

5. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры /Под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002

6. Ефимов, И.Е. Основы микроэлектроники. [Электронный ресурс] / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2008. — 384 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/709 — Загл. с экрана.

7. Ефимов, И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника: проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. – М: Высшая школа,1987

8. Гатчин, Ю.А. Введение в микроэлектронику. [Электронный ресурс] / Ю.А. Гатчин, В.Л. Ткалич, А.С. Виволанцев, Е.А. Дудников. — Электрон. дан. — СПб. : НИУ ИТМО, 2010. — 114 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/40882 — Загл. с экрана.

9. Коледов, Л.А. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование.-М: Радио и связь, 1984

10. Коледов, Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2009. — 400 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/192 — Загл. с экрана.

11. Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. М.: Бином. 2005.

12. Валитова Ф.К. Технология микросхем. Практикум. Казань: Изд-во Казан.

гос. техн ун-та, 2009. 44 с.
13. Валитова Ф.К., Гайнуллина Н.Р. Технологический практикум. Казань: Изд-во. Казан. гос. техн ун-та, 2005.
14. Вентцель Е.Е. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица 1. Материалы резистивных пленок и их электрофизические характеристики

Материал резистивной пленки	Материал контактных площадок	Сопротивление квадрата резистивной пленки	Диапазон номинальных значений сопротивлений	ТКС-104,°С$^{-1}$ от -60 до +125	Удельная мощность рассеяния. Вт/см^2
Нихром	Медь			± 1,0	I
ГОСТ 12766-67	Золото с подслоем хрома	200 - 500	50 –-15000	- 2,5	I
Нихром ГОСТ 8803-58	Медь с подслоем нихрома	200 - 500	50 - 15000	± 2	I
Сплав МЛТ-ЗМ 028.005ТУ					
Хром					
ГОСТ 5905-67	Медь	200 – 500	50 -. 15000	0,6	2
Кермет К-50С, ЕТ0.021.013ТУ	Золото с подслоем хрома (нихрома)	3000 - 10000	1000 - 100000	(+ 3) – (-5)	I
Сплав РС-3001 ЕТ0.021.019ТУ	Золото с подслоем хрома(нихрома)	500 - 3000	100 – 50000	- 0,2	I
Сплав РС37I0 ЕТ0.021.034ТУ	- « -	500 - 3000	100 - 50000	- 3	I
Материал резистивной пленки	Материал контактных площадок	Сопротивление квадрат резистивной пленки	Диапазон номинальных значений сопротивлений	ТКС-104,00-1 от -60 до +125	Удельная мощность рассеяния

					Вт/см
Специальный сплав № 3 0Ж0.021.010ТУ	Золото с подслоем хрома (нихрома)	200 - 500	50 - 20000	2 - 5,0	1
Тантал ТВЧ РЭТУ 1244-67	Алюминий с подслоем ванадия Медь с подслоем нихрома Тантал	20 – 100 100 10	100 – 100000 50 - 100000 10 - 15000	- 2	2

Таблица 2. Погрешности воспроизведения геометрических размеров пассивных элементов

Технология изготовления пассивной части ГИС	Среднеквадратическое отклонение размеров проводников одного слоя $\sigma_{e,}$мм	Среднеквадратическое отклонение ширины резистивных пленок $\sigma_{b,}$мм	Относительное квадратичное отклонение сопротивления квадрата резистивной пленки $\bar{\sigma}_{\rho_w}$	Относительное среднеквадратическое отклонение удельной емкости диэлектрического слоя пленочных конденсаторов $\bar{\sigma}_{c\,уд}$.
Масочный метод изготовления ГИС	0,01 - 0,03	0,007 - 0,01	0,02 - 0,05	0,03 - 0,07
Метод фотолитографии	0,003 - 0,007	0,002 - 0,005	0,02 - 0,05	0,03 - 0,07
Танталовая технология	0,003 - 0,007	0,002 - 0,005	0,02 - 0,05	0,02 - 0,05

Таблица 3. Материалы диэлектрических пленок и их электрофизические характеристики

Материал для напыления диэлектрика	Материал для напыления обкладок	$\rho_{\square}$ обкладок	Удельная емкость, *пф/см*^{2}	Рабочее напряжение, В	ε f=1кГц	$tg\,\delta$ f=1кГц	$E\cdot10^6$, В/см	$f_{раб}$, МГц	ТКЕ$\cdot10^{-4}$,°С$^{-1}$ от -60 до +125
Моноокись кремния 0.28.004 ТУ			1000-10000	60-30	5-6	0,01-0,02	2-3	500	2
Моноокись германия ЕТ0.021.014ТУ			2000-15000	20-10	11-12	0,005-0,007	1.0	500	3
Боросиликатное стекло ЕТ0.075.015ТУ	Алюминий А99 ГОСТ 11069-64	0,05	2500-15000	24-10	4	0,001-0,0015	3-4	300	0,36
Стекло электровакуумное С41-1 НП0.027.600			5000-40000	12,6-6,3	5,2	0,002-0,003	3-4	300	1,0-1,5
Трехсернистая сурьма МРТУ 6-09-2858-66			5000-20000	10	13-14	0,005-0,01	0,7-2	300	5
Пятиокись тантала	Тантал ТБЧ РЭТУ1244-67 (нижняя обкладка) Алюминий А99 ГОСТ 11069-64 (верхняя обкладка)	1-10 0,05	6000-100000	15-10	23	0,02	2	0,1	4

Таблица 4

Значения внутреннего теплового сопротивления навесных элементов

Тип прибора	Тепловое сопротивление $R_т$ .10^{-3}, °С/Вт
КТ307	0,63
КТ324	0,86
КТ33I	1,6
КТ332	1,6
КТ3I9	0,74
КТIНТ29I	0,21
КД901	0,22
КД902	0,22
КД907	0,22
КД904	0,22

Таблица 5

Электрические и теплофизические параметры материалов подложек

Материал	Допустимое значение рассеиваемой мощности на единицу площади подложки Вт/см^2	Теплопроводность λ, Вт/см°С	ε	tgδ
Стекло С4I-1	0,6	0,003	7,5	$20\cdot10^{-4}$
Стекло С48-3	0,6	0,008 - 0,013	6,8	$15\cdot10^{-4}$
Ситалл Ст50-1	6,0	0,012	8,5	$20\cdot10^{-4}$
Керамика 22ХС	6,0	0,084	10,3	$6\cdot10^{-4}$
Керамика "Поликор"	6,0	0,230 - 0,380	10,5	$1\cdot10^{-4}$
Керамика "Глазурь"	6,0	0,010 - 0,015	16,0	$19\cdot10^{-4}$

Таблица 6

Значения нормальной функции распределения

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{1}{2}t^2} dt$$

x	Ф*(x)	x	Ф*(x)	x	Ф*(x)
-0,00	0,5000	-0,3	0,6821	-0,6	0,2743
-0,01	4960	-0,31	3783	-0,61	2709
-0,02	4920	-0,32	3745	-0,62	2676
-0,03	4880	-0,33	3707	-0,63	2643
-0,04	4840	-0,34	3669	-0,64	3611
-0,05	4801	-0,35	3632	-0,65	2578
-0,06	4761	-0,36	3594	-0,66	2546
-0,07	4721	-0,37	3557	-0,67	2514
-0,08	4681	-0,38	3520	-0,68	2483
-0,09	4641	-0,39	3483	-0,69	2451
-0,10	0,4602	-0,4	0,3446	-0,7	0,2420
-0,11	4562	-0,41	3409	-0,71	2389
-0,12	4522	-0,42	3372	-0,72	2358
-0,13	4483	-0,43	3336	-0,73	2327
-0,14	4443	-0,44	3300	-0,74	2297
-0,15	4404	-0,45	3264	-0,75	2266
-0,16	4364	-0,46	3228	-0,76	2236
-0,17	4325	-0,47	3192	-0,77	2206
-0,18	4286	-0,48	3156	-0,78	2177
-0,19	4247	-0,49	3121	-0,79	2148
-0,20	0,4207	-0,5	0,3085	-0,8	0,2119
-0,21	4168	-0,51	3050	-0,81	2090
-0,22	4129	-0,52	3015	-0,82	2061
-0,23	4090	-0,53	2981	-0,83	2033
-0,24	4052	-0,54	2946	-0,84	2005
-0,25	4012	-0,55	2912	-0,85	1977
-0,26	3974	-0,56	2877	-0,86	1949
-0,27	3936	-0,57	2843	-0,87	1922
-0,28	3897	-0,58	2810	-0,88	1894
-0,29	3859	-0,59	2776	-0,99	1867
-0,9	0,1841	-1,3	0,0968	-1,7	0,0446
-0,9	1814	-1,31	0951	-1,71	0436
-0,9	1788	-1,32	0934	-1,72	0427
-0,9	1762	-1,33	0918	-1,73	0418

Продолжение таблицы

x	Ф*(x)	x	Ф*(x)	x	Ф*(x)
-0,94	0,1736	-1,34	0,0901	-1,74	0,0409
-0,95	1711	-1,35	0885	-1,75	0401
-0,96	1685	-1,36	0869	-1,76	0392
-0,97	1660	-1,37	0853	-1,77	0384
-0,98	1635	-1,38	0838	-1,78	0375
-0,99	1611	-1,39	0823	-1,79	0367
-1,0	0,1587	-1,4	0,0808	-1,8	0,0359
-1,01	1563	-1,41	0793	-1,81	0351
-1,02	1539	-1,42	0778	-1,82	0344
-1,03	1515	-1,43	0764	-1,83	0336
-1,04	1492	-1,44	0749	-1,84	0329
-1,05	1469	-1,45	0735	-1,85	0322
-1,06	1446	-1,46	0721	-1,86	0314
-1,07	1423	-1,47	0708	-1,87	0307
-1,08	1401	-1,48	0694	-1,88	0301
-1,09	1379	-1,49	0681	-1,89	0294
-1,1	0,1357	-1,5	0,0668	-1,9	0,0288
-1,11	1335	-1,51	0655	-1,91	0281
-1,12	1314	-1,52	0643	-1,92	0274
-1,13	1292	-1,53	0630	-1,93	0268
-1,14	1271	-1,54	0618	-1,94	0262
-1,15	1251	-1,55	0606	-1,95	0256
-1,16	1230	-1,56	0594	-1,96	0250
-1,17	1210	-1,57	0582	-1,97	0244
-1,18	1190	-1,58	0571	-1,98	0239
-1,19	1170	-1,59	0559	-1,99	0233
-1,2	0,1151	-1,6	0,0548	-2,0	0228
-1,21	1131	-1,61	0537	-2,1	0179
-1,22	1112	-1,62	0526	-2,2	0139
-1,23	1093	-1,63	0516	-2,3	0107
-1,24	1075	-1,64	0505	-2,4	0082
-1,25	1056	-1,65	0495	-2,5	0062
-1,26	1038	-1,66	0585	-2,6	0047
-1,27	1020	-1,67	0475	-2,7	0035
-1,28	1003	-1,68	0465	-2,8	0026
-1,29	0985	-1,69	0455	-2,9	0019

Продолжение таблицы

x	Ф*(x)	x	Ф*(x)	x	Ф*(x)
-3,00	0,0014	0,3	0,6179	0,7	0,758
-3,10	0,001	0,31	0,6317	0,71	0,7611
-3,20	0,0007	0,32	0,6255	0,72	0,7642
-3,30	0,0005	0,33	0,6293	0,73	0,7673
-3,40	0,0003	0,34	0,6331	0,74	0,7703
-3,50	0,0002	0,35	0,6368	0,75	0.7734
-3,60	0,0002	0,36	0,6406	0,76	0,7764
-3,70	0,0001	0,37	0,6443	0,77	0,7794
-3,80	0,0001	0,38	0,648	0,78	0,7823
-3,90	0	0,39	0,6517	0,79	0,7852
0	0,5	0,4	0,6554	0,8	0,7881
0,01	0,504	0,41	0,6591	0,81	0,791
0,02	0,508	0,42	0,6628	0,82	0,7939
0,03	0,512	0,43	0,6664	0,83	0,7967
0,04	0,516	0,44	0,67	0,84	0,7995
0,05	0,5199	0,45	0,6736	0,85	0,8023
0,06	0,5239	0,46	0,6772	0,86	0,8051
0,07	0,5279	0,47	0,6808	0,87	0,8078
0,08	0,5319	0,48	0,6844	0,88	0,8106
0,09	0,5359	0,49	0,6879	0,89	0,8133
0,1	0,5398	0,5	0,6915	0,9	0,8159
0,11	0,5438	0,51	0,695	0,91	0,8186
0,12	0,5478	0,52	0,6985	0,92	0,8212
0,13	0,5517	0,53	0,7019	0,93	0,8238
0,14	0,5557	0,54	0,7054	0,94	0,8264
0,15	0,5596	0,55	0,7088	0,95	0,8289
0,16	0,5636	0,56	0,7123	0,96	0,8315
0,17	0,5675	0,57	0,7157	0,97	0,834
0,18	0,5714	0,58	0,719	0,98	0,8365
0,19	0,5763	0,59	0,7224	0,99	0,8389
0,2	0,5793	0,6	0,7257	1	0,8413
0,21	0,5832	0,61	0,7291	1,01	0,8437
0,22	0,5871	0,62	0,7324	1,02	0,8461
0,23	0,591	0,63	0,7357	1,03	0,8485
0,24	0,5948	0,64	0,7389	1,04	0,8508
0,25	0,5987	0,65	0,7422	1,05	0,8531
0,26	0,6026	0,66	0,7454	1,06	0,8554
0,27	0,6064	0,67	0,7486	1,07	0,8557
0,28	0,6103	0,68	0,7517	1,08	0,8599
0,29	0,6141	0,69	0,7549	1,09	0,8621

Продолжение таблицы

x	Ф*(x)	x	Ф*(x)	x	Ф*(x)
1,1	0,8643	1,5	0,9332	1,9	0,9713
1,11	0,8665	1,51	0,9345	1,91	0,9719
1,12	0,8686	1,52	0,9357	1,92	0,9726

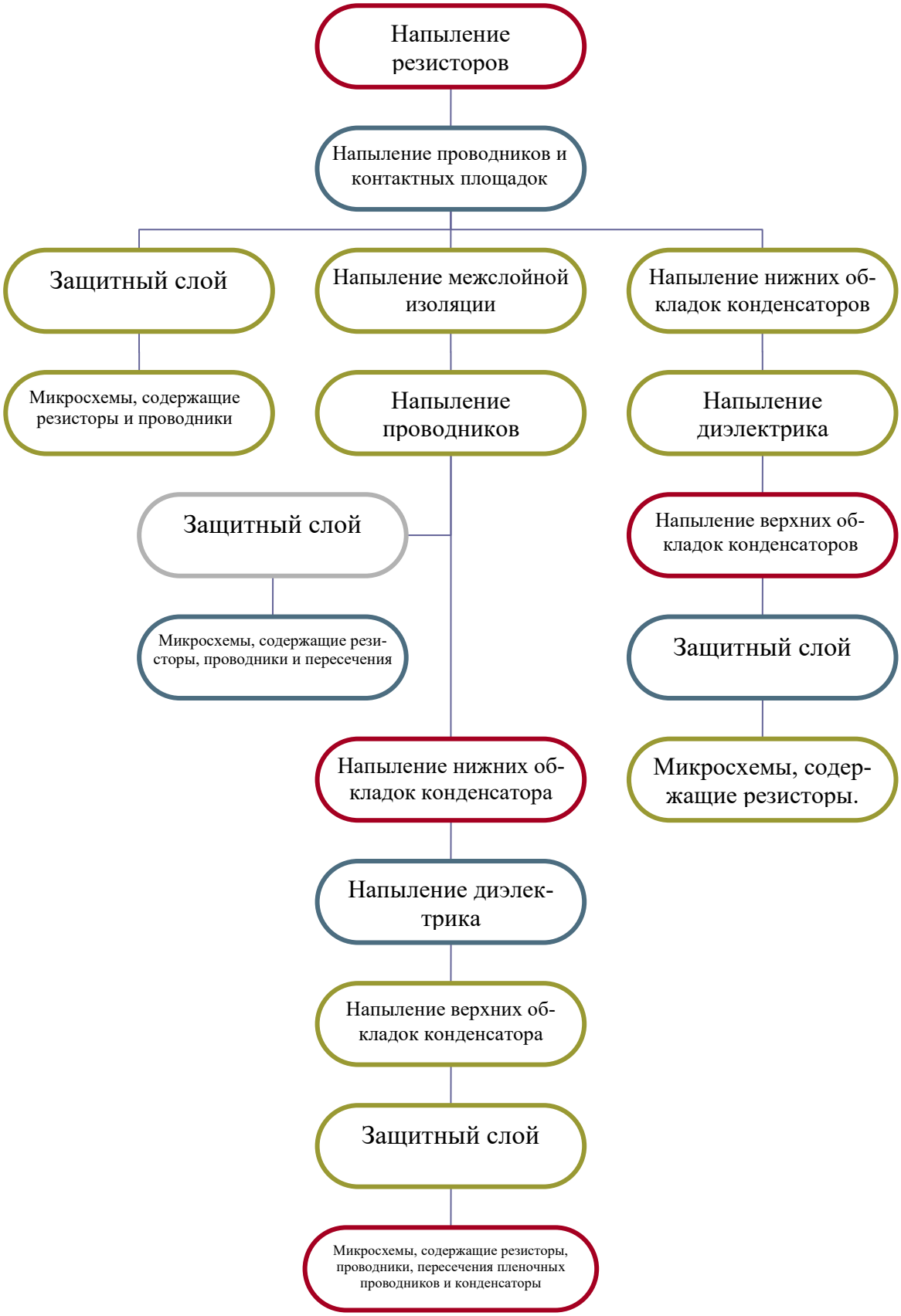
1,13	0,8708	1,53	0,937	1,93	0,9732
1,14	0,8729	1,54	0,9382	1,94	0,9738
1,15	0,877	1,55	0,9406	1,95	0,9744
1,16	0,879	1,56	0,9418	1,96	0,975
1,17	0,881	1,57	0,9428	1,97	0,9756
1,18	0,883	1,58	0,9441	1,98	0,9671
1,19	0,8849	1,59	0,9452	1,99	0,9767
1,2	0,8869	1,6	0,9463	2	0,9772
1,21	0,8888	1,61	0,9474	2,1	0,9821
1,22	0,8907	1,62	0,9484	2,2	0,9871
1,23	0,8925	1,63	0,9495	2,3	0,9893
1,24	0,8944	1,64	0,9505	2,4	0,9918
1,25	0,8962	1,65	0,9515	2,5	0,9938
1,26	0,898	1,66	0,9525	2,6	0,9953
1,27	0,8997	1,67	0,9535	2,7	0,9965
1,28	0,9015	1,68	0,9545	2,8	0,9974
1,29	0,9032	1,69	0,9554	2,9	0,9981
1,3	0,9049	1,7	0,9564	3	0,9986
1,31	0,9066	1,71	0,9573	3,1	0,999
1,32	0,9082	1,72	0,9582	3,2	0,9993
1,33	0,9115	1,73	0,9591	3,3	0,9995
1,34	0,9115	1,74	0,9599	3,4	0,9997
1,35	0,9131	1,75	0,9608	3,5	0,9998
1,36	0,9147	1,76	0,9616	3,6	0,9998
1,37	0,9162	1,77	0,9625	3,7	0,9999
1,38	0,9177	1,78	0,9633	3,8	0,9999
1,39	0,9192	1,79	0,9641	3,9	1
1,4	0,9207	1,8	0,9649		
1,41	0,9222	1,81	0,9656		
1,42	0,9236	1,82	0,9664		
1,43	0,9251	1,83	0,9671		
1,44	0,9265	1,84	0,9678		
1,45	0,9279	1,85	0,9686		
1,46	0,9292	1,86	0,9693		
1,47	0,9306	1,87	0,9699		
1,48	0,9319	1,88	0,9706		
1,49	0,9332	1,89	0,9713		

Таблица 7. Значения функции $\gamma_2(q_0, K)$

K q_0	1,0	1,05	1,10	1,175	1,25	1,325	1,40	1,65	1,90	2,15	2,40	2,70	3.0	3,5	4.0	5.0	6,0	8,0	10,0	15.5	20,0	35,0	50,0
0,010	0,0261	0,0258	0,0265	0,0251	0,0248	0,0243	0,0241	0,0231	0,0223	0,0216	0,0209	0,0202	0,0195	0,0136	0,0178	0,0164	0,0153	0,0135	0,0122	0,0099	0,0083	0,0053	0,0037
0,015	0352	0348	0344	0339	0334	0329	0324	0309	0297	0285	0276	0265	0255	0241	0229	0209	0193	0167	0148	0144	0092	0053	0033
0,020	0434	0428	0423	0415	0409	0402	0395	0376	0360	0345	0332	0318	0305	0286	0270	0244	0223	0190	0165	0122	0094	0043	0026
0,030	0575	0568	0558	0547	0537	0527	0517	0489	0465	0443	0424	0403	0384	0357	0334	0295	0265	02 18	0183	0126	0089	0036	0016
0,040	0605	0683	0673	0558	0645	0631	0619	0582	0549	0521	0495	0468	0444	0409	0379	0329	0290	0231	0188	0119	0078	0025	0008
0,055	0848	0832	818	0798	0780	0762	0745	0694	0650	0612	0578	0542	0510	0463	0424	0359	0309	0235	0182	0103	0060	0013	0003
0,070	0974	0956	0939	0914	0891	0863	0847	0784	0729	0632	0639	0595	0555	0493	0450	0373	0313	0227	0168	0084	0044	0007	0001
0,085	1084	1082	1041	1012	0983	0957	0932	0856	0791	0735	0685	0632	0586	0519	0464	0375	0308	0213	0151	0067	0031	0003	0000
0,100	1179	1153	1129	1094	1061	1031	1002	0915	0840	0775	0713	0658	0605	0530	0468	0370	0296	0196	0132	0052	0021	0002	
0,125	1310	1278	1249	1207	1167	1129	1094	0989	0899	0821	0753	0682	0620	0533	0461	0350	0270	0165	0103	0033	0011	0001	
0,150	1414	1378	1343	1294	1847	1204	1162	1040	0936	0846	0769	0689	0619	0521	0442	0323	0240	0133	0078	0021	0006	0000	
0,075	1498	1456	1417	1361	1308	1258	1212	1073	0956	0857	0772	0682	0606	0501	0417	0293	0209	0109	0058	0012	0003		
0,200	1565	1519	1474	1412	1353	1298	1246	1093	0965	0856	0763	0667	0586	0475	0388	0262	0180	0086	0042	0008	0001		
0,250	1658	1602	1550	1476	1406	1341	1280	1102	0955	0831	0726	0621	0533	0416	0326	0204	0129	0053	0022	0003	0000		
0,300	1710	1646	1588	1502	1423	1349	1281	1082	0920	0735	0674	0563	0472	0354	0267	0154	0090	0032	0011	0001			
0,350	1730	1660	1594	1500	1415	1334	1259	1043	0870	0789	0614	0501	0410	0296	0215	0114	0062	0018	0006	0000			
0,400	1728	1652	1580	1479	1387	1300	1220	0993	0813	0668	0551	0440	0352	0244	0170	0084	0042	0011	0003				
0,500	1676	1591	1310	1398	1296	1202	1116	0874	0689	0545	0432	0329	0251	0161	0104	0044	0018	0003	0001				
0,600	1582	1491	1405	1287	1180	1032	0993	0749	0568	0432	0330	0239	0174	0103	0061	0022	0008	0001	0000				
0,700	1467	1373	1284	1163	1054	0956	0868	0630	0460	0337	0247	0171	0119	0065	0036	0011	0003	0000					
0,800	1343	1247	1158	1037	0930	0834	0748	0523	0367	0258	0182	0120	0080	0040	0020	0005	0001						
0,900	1216	1121	1034	0915	0811	0719	0638	0429	0290	0196	0133	0084	0053	0025	0012	0003	0001						
1,00	1095	1000	0915	0801	0702	0615	0540	0349	0227	0148	0096	0058	0035	0015	0007	0001	0000						
1,15	0919	0832	0753	0648	0558	0481	0415	0253	0155	0095	0059	0033	0018	0007	0003	0000							
1,30	0765	0684	0512	0518	0439	0372	0315	0182	0105	0061	0035	0018	0010	0003	0001								
1,45	0431	0558	0494	0411	0342	0285	0237	0129	0071	0039	0021	0010	0005	0002	0000								
1,60	0517	0452	0395	0324	0263	0217	0177	0091	0047	0024	0012	0006	0003	0001									
1,80	0393	0338	0292	0233	0187	0149	0119	0057	0027	0013	0008	0003	0001	0000									
2,00	0296	0251	0213	0167	0130	0102	0080	0035	0016	0007	0003	0001	0000										
2,25	0207	0172	0143	0109	0083	0063	0048	0019	0008	0003	0001	0000											
2,5	0143	0117	0095	0071	0052	0038	0028	0010	0004	0001	0000												
3,0	0068	0053	0042	0029	0020	0014	0010	0003	0001	0000													
3,5	0032	0024	0018	0012	0008	0005	0003	0001	0000														
4,25	0010	0007	0005	0003	0002	0001	0001	0000															
5,0	0003	0002	0001	0001	0000	0000	0000																

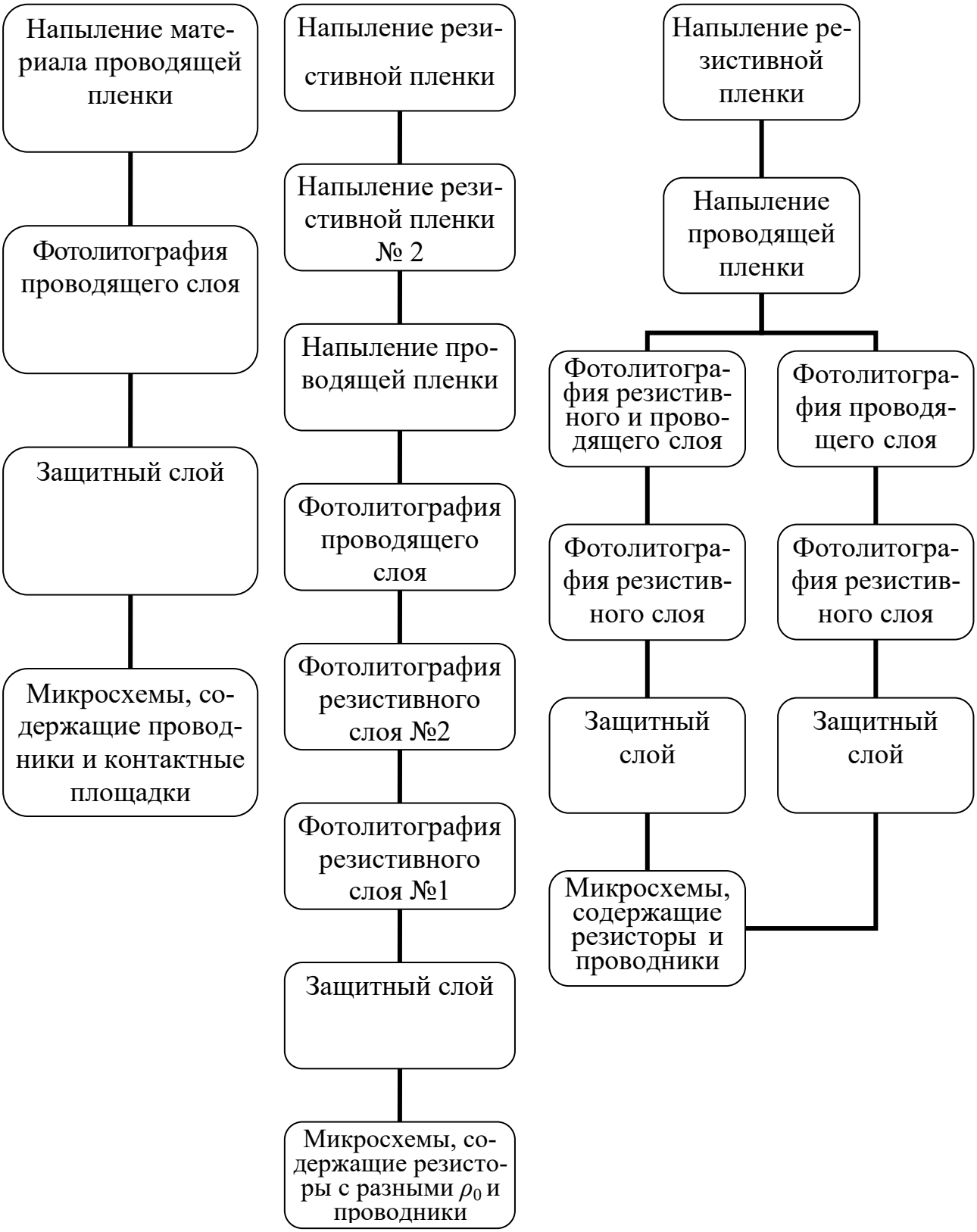
Приложение 2

Схема последовательности нанесения слоев микросхемы при масочном методе изготовления



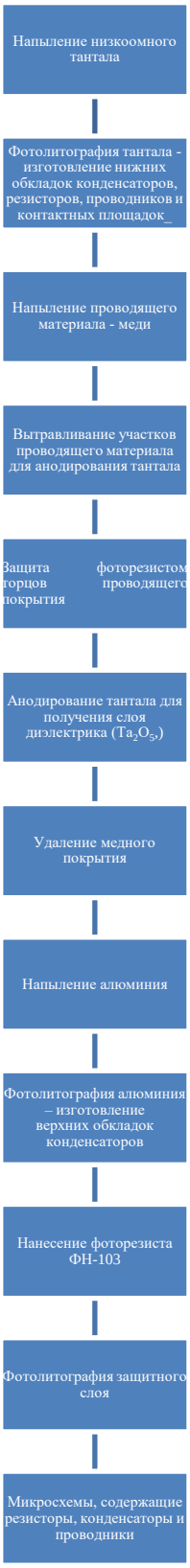
Приложение 3

Схема последовательности формирования микросхемы при изготовлении методом фотолитографии



Приложение 4.

Схема последовательности нанесения слоев микросхемы при методе изготовления на основе тантала



Приложение 5

Технологические ограничения на топологию гибридных микросхем

Ограничения, обусловленные технологией механической обработки подложек	Размер, мм
Минимальное расстояние от края подложки:	
до пленочных элементов	0,3
до края отверстий	1,0
Минимальное расстояние от пленочных элементов до края отверстий	0,5
Ограничения, обусловленные технологией монтажа навесных элементов	
Минимальные размеры контактных площадок для монтажа навесных проводников в случае:	
сварки	0,3 x 0,3
однократной пайки	0,4 x 0,4
многократной пайки	0,5 x 0,5
Минимальные расстояния между контактными площадками для монтажа навесных проводников	0,2
Минимальное расстояние от контактной площадки до навесного элемента	0,5
Допускается навесные элементы устанавливать на пленочные проводники и резисторы, защищенные диэлектриком, при условии, что данный диэлектрик не разрушается от воздействия клеевого слоя	
Максимальная длина вывода навесного элемента до контактной площадки	5,0
Минимальное расстояние навесного элемента от края платы	0.4
Контактные площадки для монтажа внешних проводников располагать с шагом не менее	0,5
Минимальное расстояние между навесными элементами, в том числе и проводниками	0,3
Минимально допустимая ширина пленочных резисторов	
при масочном методе	0,2
при фотолитографии	0,05
на основе тантала	0,05

Окончание

Ограничения, обусловленные технологией монтажа навесных элементов	Размер, мм
Минимальная ширина перекрытия двух тонкопленочных полосок для осуществления электрического контакта между ними при масочном методе при фотолитографии	 0,2 0,1
Минимальное расстояние от края диэлектрика при соединении выводов обкладок конденсаторов с другими элементами	0,3
У конденсаторов нижняя обкладка должна выступать за край верхней, не менее	0,2
диэлектрик должен выступать за край нижней обкладки не менее	0,1
Минимальная ширина пленочных проводников при масочном методе при фотолитографии на основе тантала	 0,1 0,05 0,05
При изготовлении масочным методом резисторов сложной конфигурации, минимальное расстояние между параллельными участками резистивной пленки	0,2
Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами, расположенными в одном слое при масочном методе при фотолитографии на основе тантала	 0,2 0,05 0,05

Приложение 6

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»

Институт радиоэлектроники и телекоммуникаций

Кафедра Нанотехнологии в электронике

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу

по дисциплине "МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"

(11.03.04)

Студент_____ группа_____

Руководитель_____

Дата выдачи задания_____

Дата защиты работы_____

Тема курсовой работы

_____Проектирование гибридных микросхем_____

(наименование узла, блока)

Исходные данные:

(схема принципиальная электрическая, напряжение питания,

частотный диапазон, условия эксплуатации и т.д.)

Содержание и объем курсовой работы

Разработать конструкцию узла (блока) в гибридном пленочном исполнении

1. Пояснительная записка - на 20-25 рукописных страницах, включая разделы:

1) задание на проектирование;
2) технические условия проектирования;
3) аннотация, введение
4) анализ объекта проектирования;
5) выбор и обоснование материалов элементов микросхемы;
6) выбор и обоснование технологического процесса изготовления узла;
7) расчеты элементов микросхемы;
8) разработка топологии;
9) определение размеров подложки и выбор корпуса микросхемы;
10) список используемой литературы;
11) содержание.

2. Графическая часть:

1) схема электрическая принципиальная;
2) топологический и сборочный чертежи.

Приложение 7

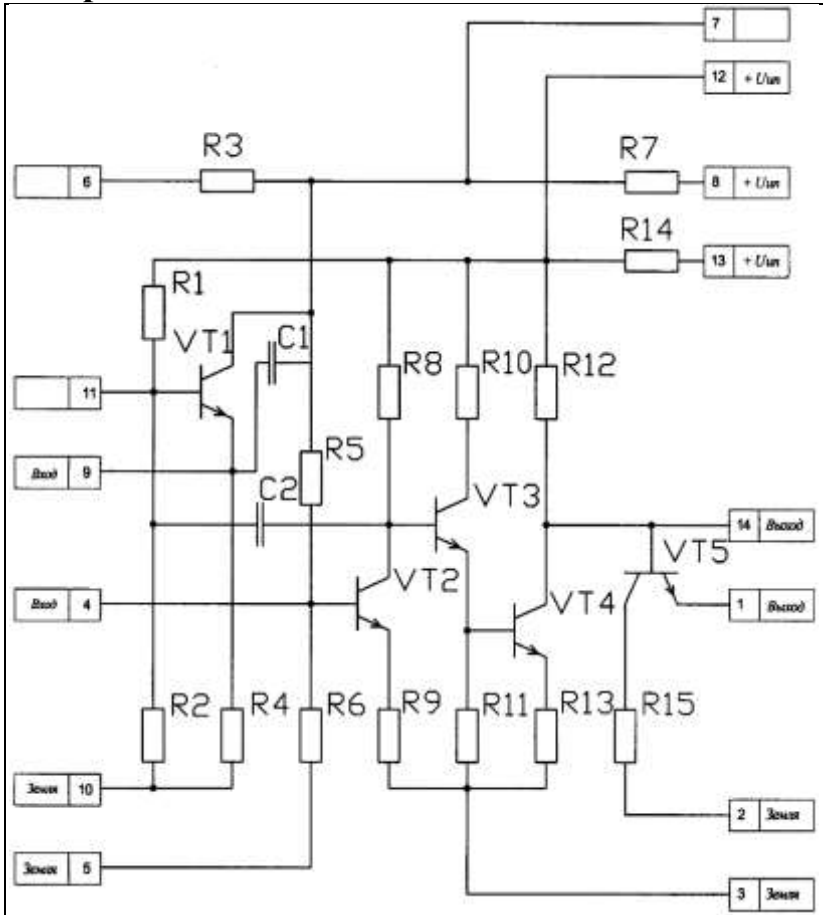
Исходные данные для проектирования

№ задания	*Uпит*, В	*Pвых*	*ΔTраб*, °С	*fгран*, МГц	$P \cdot 10^{-3}$, Вт
1.	12	0,75	-60÷+60	2	20
2.	6	0,7	-60÷+60	0,5	5
3.	10	0,85	-60÷+60	0,1	25
4.	12	0,6	-60÷+60	1	30
5.	±6	0,56	-60÷+60	5	15
6.	6	0,8	-60÷+60	10	20
7.	10	0,95	-60÷+60	5	50
8.	6	0,95	-60÷+60	0,05	40
9.	12	0,65	-60÷+60	0,05	20
10.	6	0,65	-60÷+60	0,1	10
11.	10	0,9	-60÷+60	10	15
12.	±6	0,7	-60÷+60	5	50
13.	±6	0,95	-60÷+60	10	50
14.	±6	0,9	-60÷+60	10	40
15.	±6	0,8	-60÷+60	5	30
16.	10	0,8	-60÷+60	10	15
17.	6	0,99	-60÷+60	1	20
18.	10	0,85	-60÷+60	15	30
19.	6	0,9	-60÷+60	10	40
20.	10	0,65	-60÷+60	20	20
21.	10	0,95	-60÷+60	2	30
22.	12	0,59	-60÷+60	10	35
23.	6	0,9	-60÷+60	0,5	10
24.	10	0,6	-60÷+60	2	20
25.	6	0,9	-60÷+60	10	10

Приложение 8

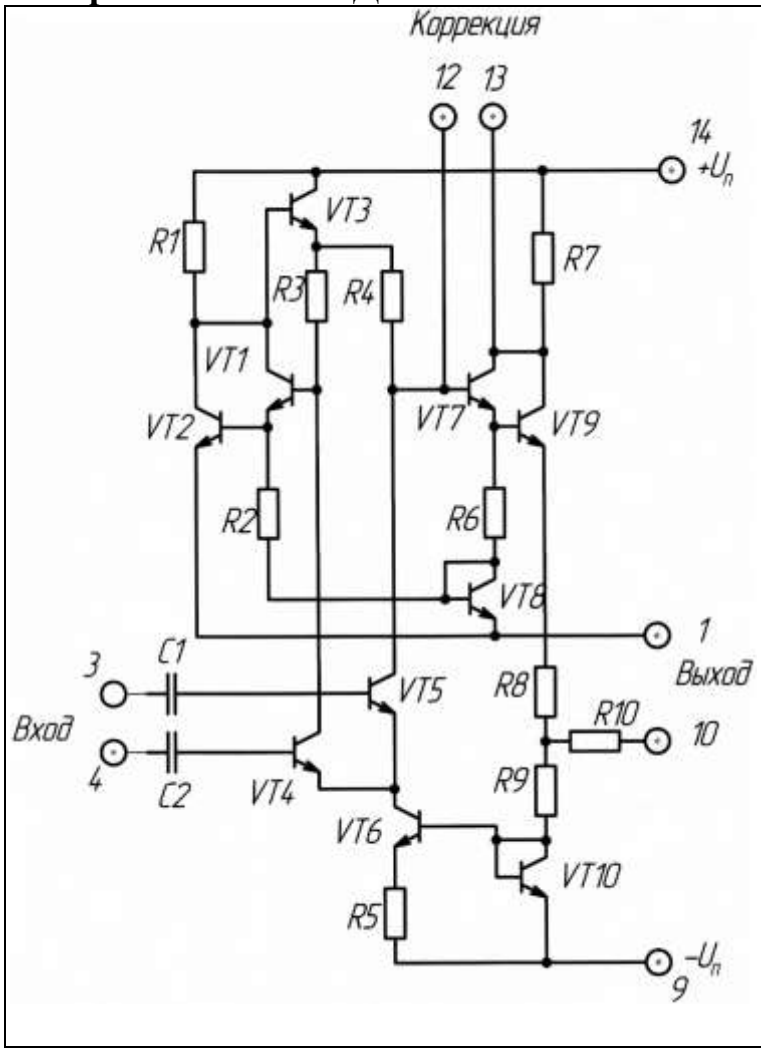
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

ЗАДАНИЕ 1
Микросхема К2УС3 71



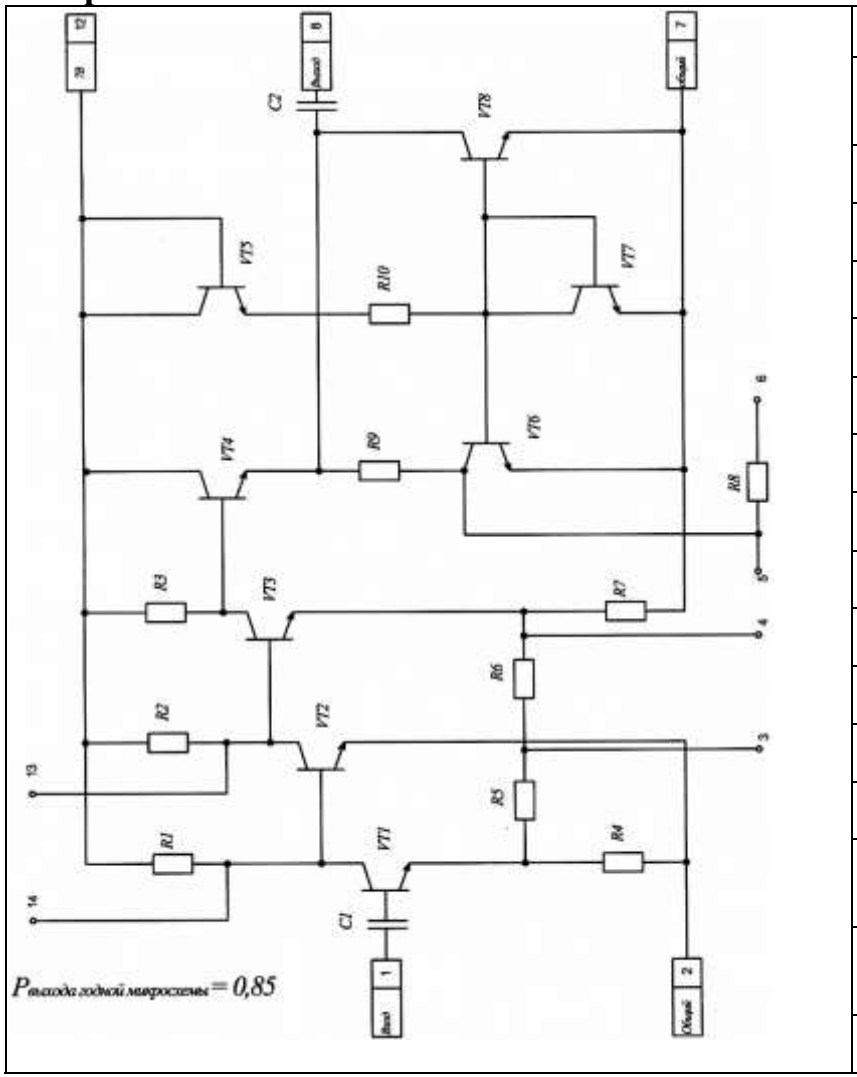
Конденсаторы			
C1	200пФ±15%	1	плёночный
C2	К10-9 0,1мкФ±15%ОЖО. 460. 047 ТУ	1	навесной
Резисторы			
Rl	15 кОм±1%	1	
R2	5 кОм ±10%	1	
R3	450 Ом ±10%	1	
R4	850 кОм ±10%	1	
R5	10 кОм ±10%	1	
R6	5 кОм ±10%	1	
R7	2,9 кОм ±10%	1	
R8	20 кОм ±0,5%	1	
R9	1кОм ±10%	1	
R10	4 кОм ±10%	1	
Rll	3 кОм ±10%	1	
R12	4 кОм ±10%	1	
R13	250 Ом ±10%	1	
R14	1,5 кОм±10%	1	
R15	25 Ом ±10%	**1**	
	Транзисторы		
VT1-VT5	КТ324 ЖИ3.365.143.ТУ	5	навесной

ЗАДАНИЕ 2
Микросхема К253УД1



C1	Конденсатор 20пФ 15% 33В	1	Пленочный
C2	Конденсатор К10-9 15000пФ 15% 25В	1	
R1	Резистор 10 кОм 10%-0,00082Вт	1	Пленочный
R2	Резистор 3кОм 10%-0,0027Вт	1	Пленочный
R3	Резистор 25к0м 0,5%-0,03025Вт	1	Пленочный
R4	Резистор 25к0м 10%-0.03025Вт	1	Пленочный
R5	Резистор 2,4 к0м 10%-0,01161Вт	1	Пленочный
R6	Резистор 3кОм 10%-0,00432Вт	1	Пленочный
R7	Резистор 10 кОм 10%-0,00476Вт	1	Пленочный
R8	Резистор 3,6кОм 10%-0,00518Вт	1	Пленочный
R9	Резистор 18к0м 10%-0,02812Вт	1	Пленочный
R10	Резистор 10кОм 10%-0,00476Вт	1	Пленочный
VT1-VT10	Транзистор КТ324А	10	СБ0.336.017 ТУ

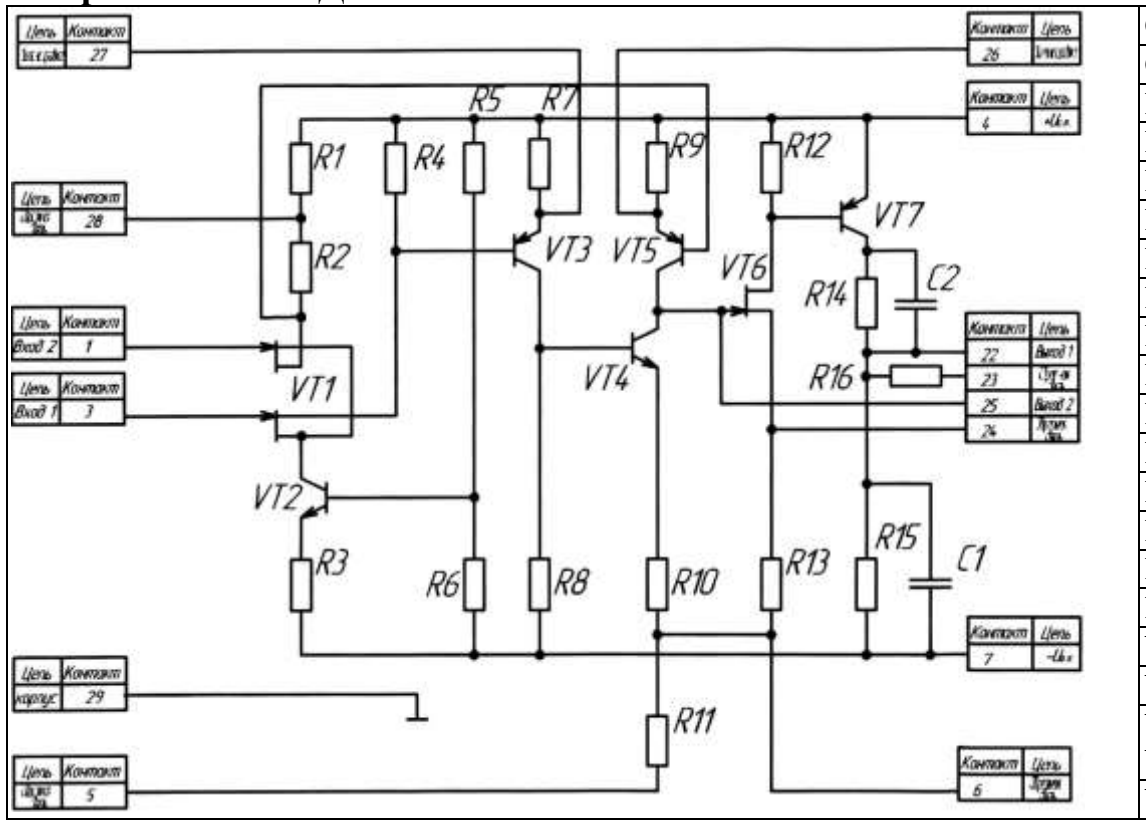
ЗАДАНИЕ 3
Микросхема К223УН1



	Конденсаторы		
C1	К10-17- 3300 пФ ±15% Up=30В	1	навесной
C2	110пФ±15% Up=30В	1	пленочный
	Резисторы (плёночные)		
R1	9кОм ±10% 4,4мВт	1	
R2	5кОм ±10% 8,5мВт	1	
R3	6000м ±10% 53мВт	1	
R4	100 Ом ±10% 49мкВт	1	
R5	430 Ом ±10% 30мкВт	1	
R6	6,3кОм ±10% 10 мкВт	1	
R7	100 Ом ±10% 8,8мВт	1	
R8	13кОм ±4% 5мкВт	1	
R9	3кОм ±10% 14мВт	1	
R10	6кОм ±10% 6мВт	1	
	Транзисторы (навес-ные)		
VT1-VT8	КТ332Д ГОСТ 15172-70	8	

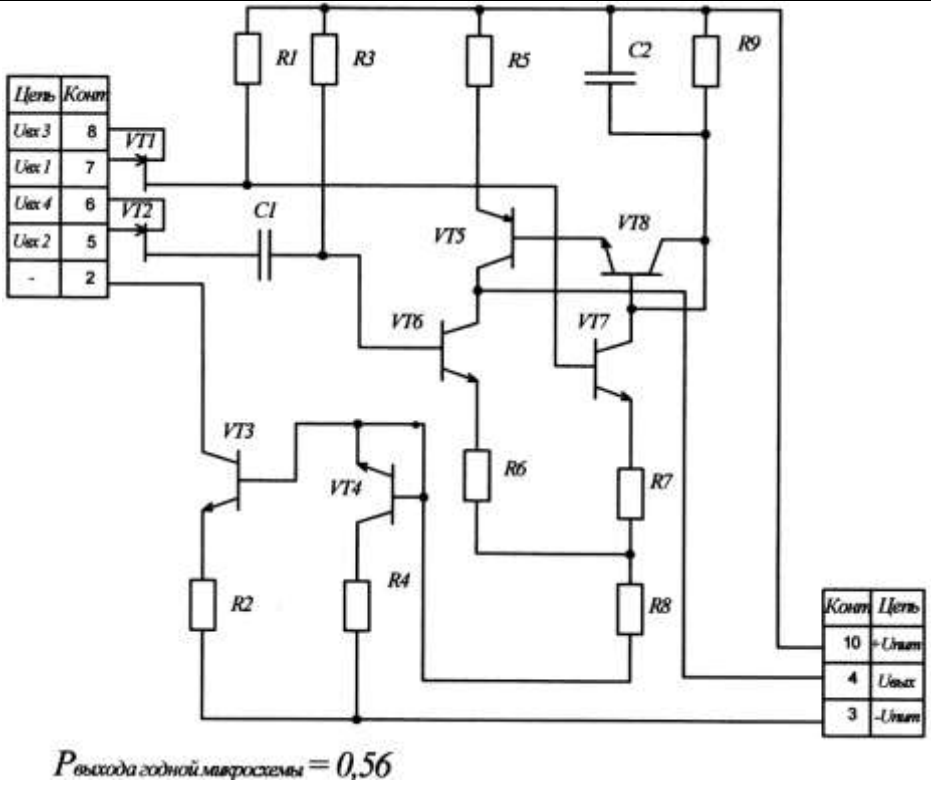
ЗАДАНИЕ 4

Микросхема К284УД2



C1	Конденсатор 200пФ 15% 25В	1	К10-17
C2	Конденсатор 5нФ 15% 13,2В	1	Пленочный
R1	Резистор 25к0м 10%-0,069Вт	1	Пленочный
R2	Резистор 5к0м 10%-0,034Вт	1	Пленочный
R3	Резистор 3,56к0м 10%-0,048Вт	1	Пленочный
R4	Резистор 7,5к0м 10%-0,023Вт	1	Пленочный
R5	Резистор 9,3к0м 10%-0,018Вт	1	Пленочный
R6	Резистор 4кОм 10%-0,043Вт	1	Пленочный
R7,R9	Резистор 12к0м 10%-О,014Вт	2	Пленочный
R8	Резистор 9кОм 10%-0,019Вт	1	Пленочный
R10	Резистор 6кОм 10%-0,043Вт	1	Пленочный
R11	Резистор 150 0м 10%-1,16Вт	1	Пленочный
R12	Резистор 1к0м 10%-0,17Вт	1	Пленочный
R13,R15	Резистор 10кОм 10%-0,017Вт	2	Пленочный
R14	Резистор 300 Ом 10%-Q58Вт	1	Пленочный
R16	Резистор 40кОм 0,5%-0,043Вт	1	Пленочный
VT1	Транзистор КПС202А-2	1	
VT2, VT4	Транзистор КТ215Б-1	2	
VT3, VT5,VT7	Транзистор КТ120В	3	
VT6	Транзистор КП308Д2	1	

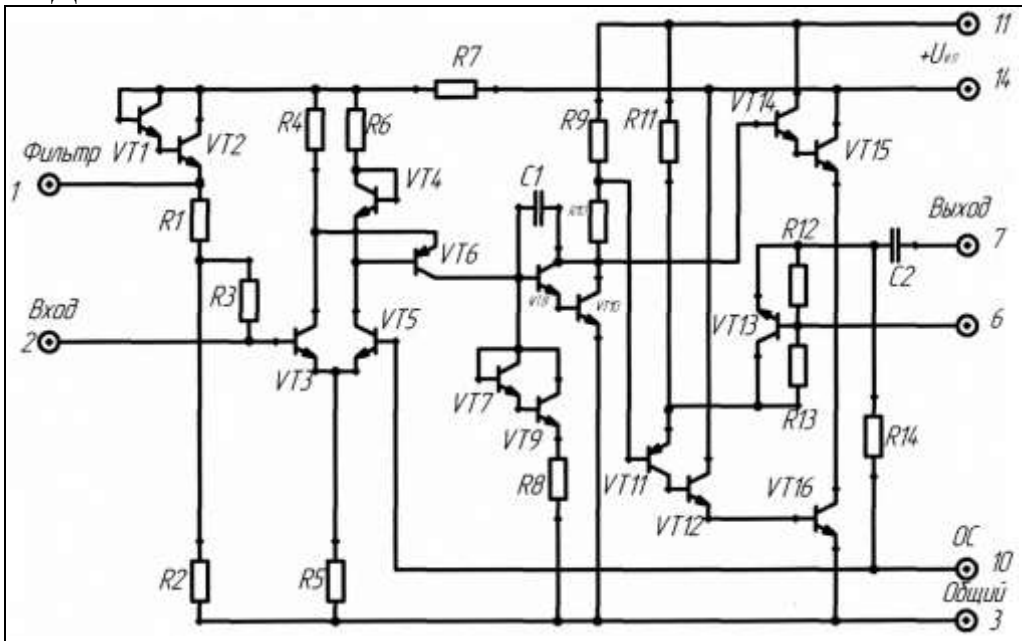
ЗАДАНИЕ 5
Микросхема К224УД1А



$P_{выхода\ годной\ микросхемы} = 0,56$

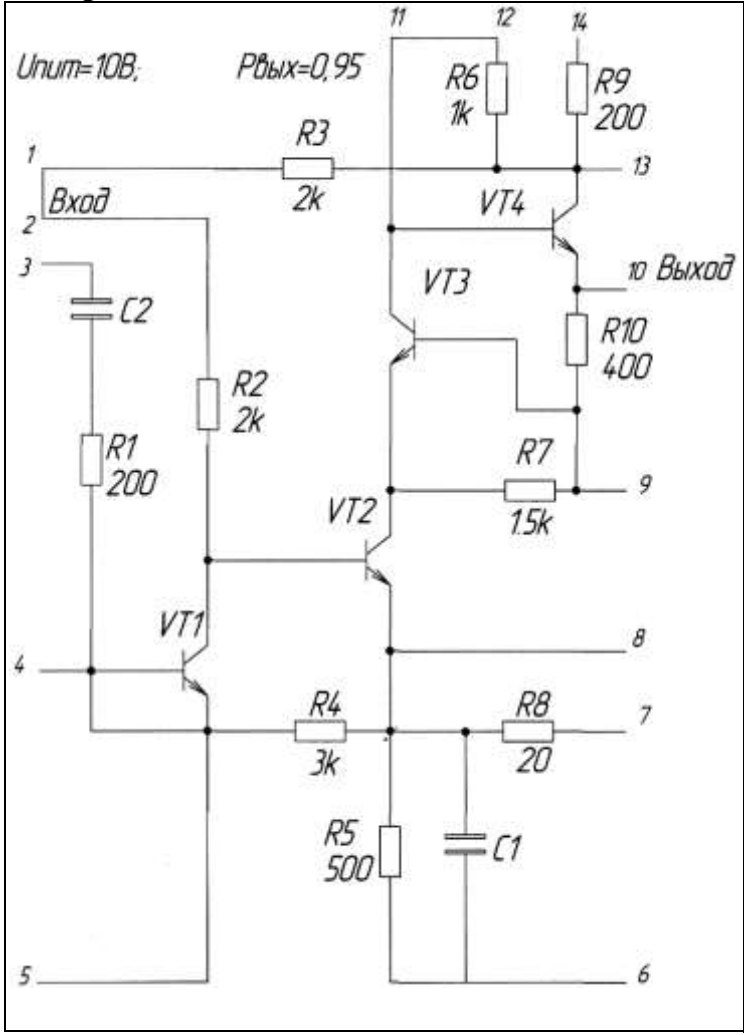
Конденсаторы			
C1	К10-9-Н30 2000пФ±15% ожО.464.123.ту	1	
C2	100пФ±15%	1	пленочный
Резисторы пленочные			
R1	15кОм±10%	1	
R2	4кОм±10%	1	
R3	15кОм±10%	1	
R4	4кОм±10%	1	
R5	5,6кОм±10%	1	
R6,R7	1кОм±10%	2	
R8	30кОм±0,5%	1	прецизионный
R9	5,6кОм±10%	1	
Транзисторы навесные			
VT1, VT2	КП201Е ТФ3.365.006 ТУ	2	
VT3, VT4	КП307А СБО.365.006 ТУ	2	
VT5	КТ120А ЖИ3.365.006 ТУ	1	
VT6-VT8	КП307А СБО.365.006 ТУ	3	

ЗАДАНИЕ 6



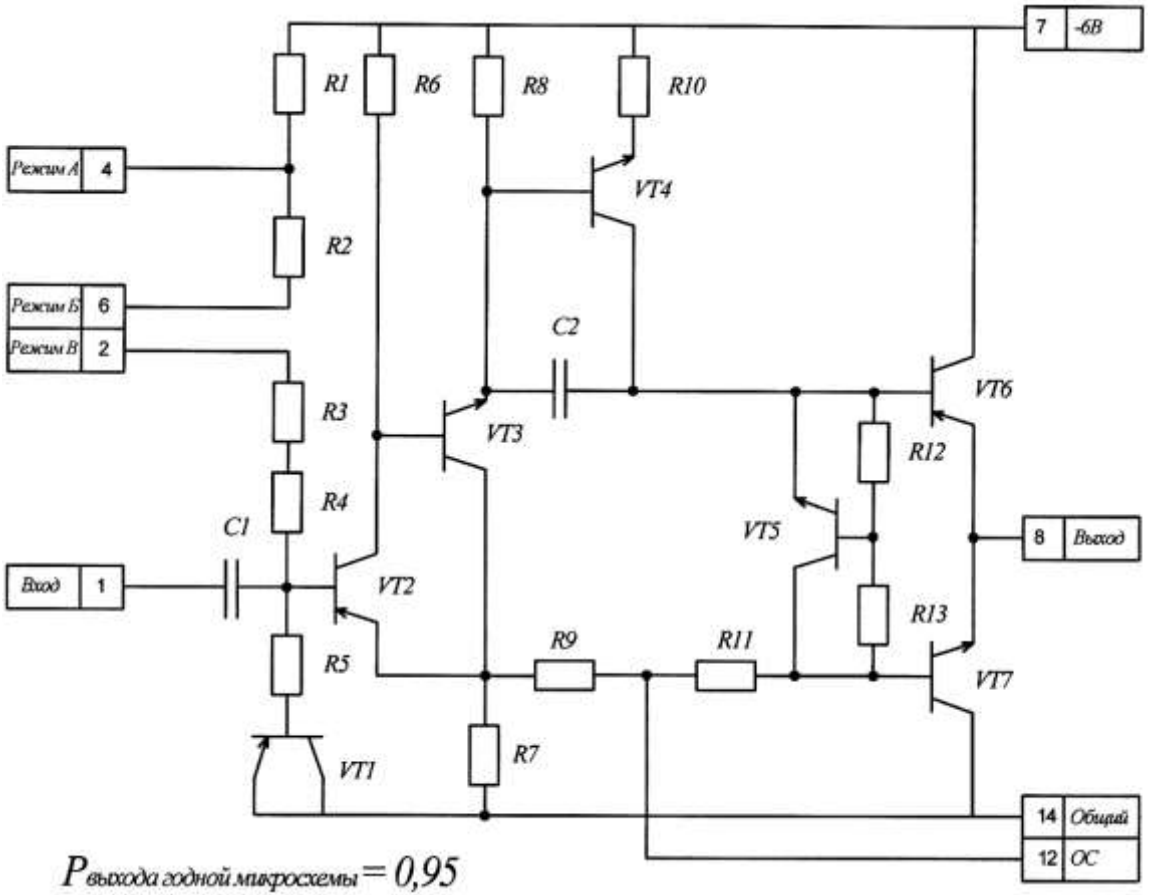
C1	Конденсатор 0,5нФ ± 15% 13,2В	1	Пленочный
C2	Конденсатор 1000 пФ ± 15% 25В	1	К10-9
R1	Резистор 4,7к0м ± 10%-0,0047Вт	1	Пленочный
R2	Резистор 9кОм ± 10%-0,00225Вт	1	Пленочный
R3	Резистор 15к0м ± 10%-0,00135Вт	1	Пленочный
R4,R6	Резистор 2,5к0м ± 10%-0,0009Вт	2	Пленочный
R5	Резистор 10кОм ± 10%-0,008836Вт	1	Пленочный
R7	Резистор 1кОм ± 10%-0,00529Вт	1	Пленочный
R8	Резистор 30кОм ± 15%-0,002883Вт	1	Пленочный
R9	Резистор 6кОм ± 10%-0,02166Вт	1	Пленочный
R10	Резистор 0,8к0м ± 10%-0.002888Вт	1	Пленочный
R11	Резистор 1кОм ± 10%-0.17424Вт	1	Пленочный
R12	Резистор 2к0м ± 10%-0,0004608Вт	1	Пленочный
R13	Резистор 3кОм ± 10%-0,000691226Вт	1	Пленочный
R14	Резистор 22к0м ± 10%-0,0050688Вт	1	Пленочный
VT1-VT5, VT7-VT10, VT12-VT16	Транзистор 1Т317А	14	СБ0.336.017 ТУ
VT6,VT11	Транзистор КТ120В	2	СБО.336.017 ТУ

ЗАДАНИЕ 7
Микросхема К2УС375



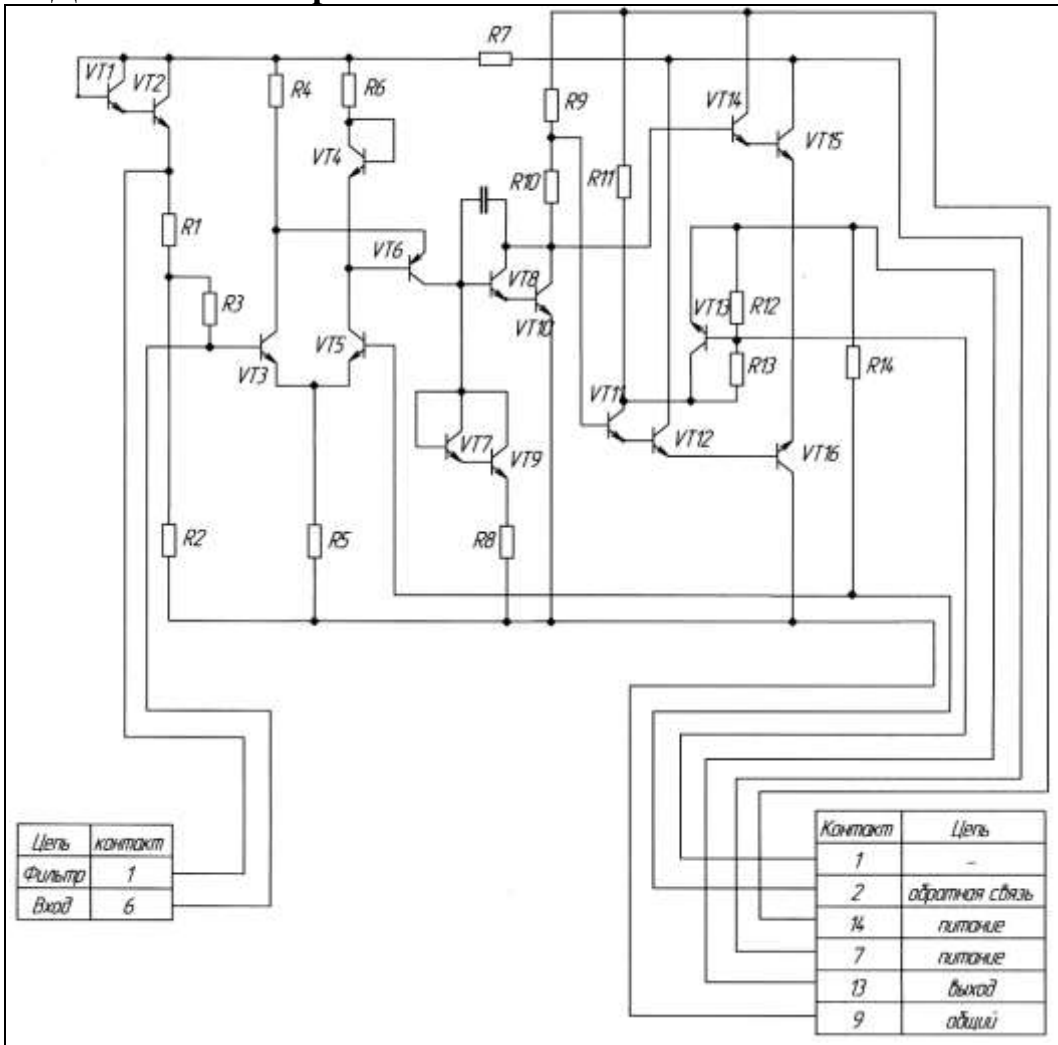
Резисторы пленочные			
R1	200 Ом±10% P=0,002мВт	1	
R2	2000 Ом±10% P=0,32мВт	1	
R3	2000 Ом± 10% P=0,32 мВт	1	
R4	3000 0м±2% P=50 мВт	1	
R5	500 Ом±10% P=2,88 мВт	1	
R6	1000 Ом±10% P=0,16 мВт	1	
R7	1500 Ом±10% P=13,5 мВт	1	
R8	20 Ом±10% P=0,005 мВт	1	
R9	200 Ом±10% P=0,184 мВт	1	
R10	400 Ом±10% P=2,4 мВт	1	
Конденсаторы			
C1	К10-9 1500пФ±15% Uр=10В	1	Навесной
	ОЖО 460.068 ТУ		
C2	700пФ±15% Uр=15В	1	Пленочный
Транзисторы			
VT1-VT4	КТ331А ХМО.336.000 ТУ		Навесной

ЗАДАНИЕ 8
Микросхема К224УН16



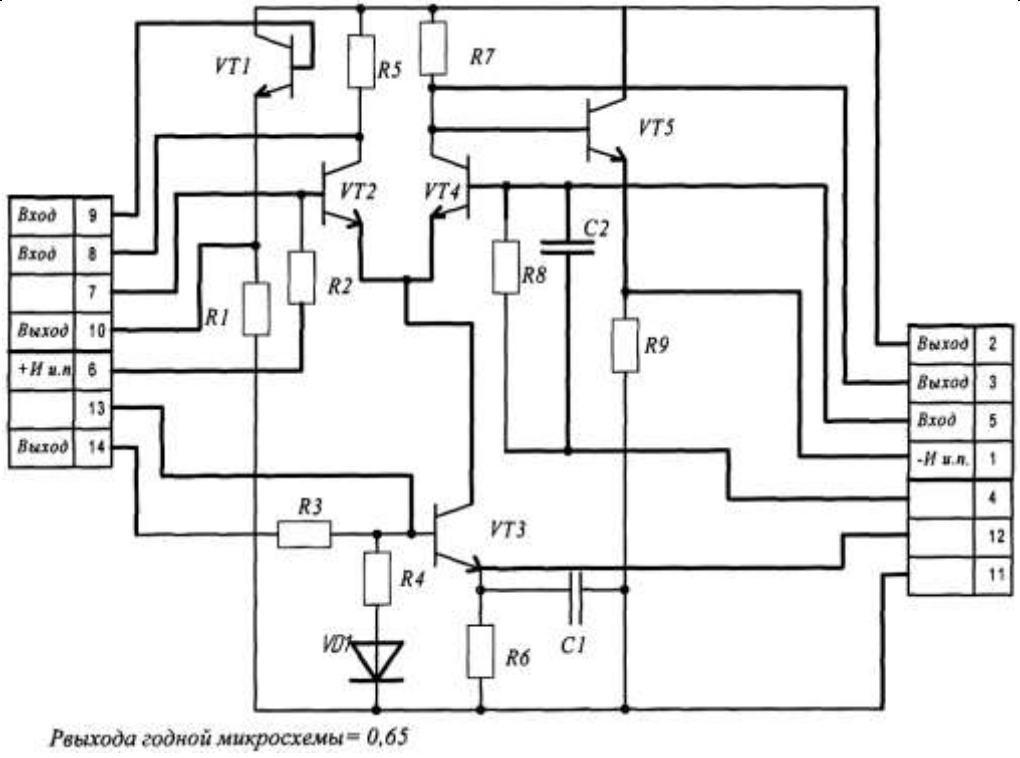
Конденсаторы			
C1	3300пФ±15% Up=30В	1	навесной
C2	110пФ±15% Up=30В	1	
Резисторы (плёночные)			
R1	5,1кОм ±20%25мВт	1	
R2	10 кОм ±20% 48мВт	1	
R3	2,2кОм ±20% 11 мВт	1	
R4	2,7кОм ±20% 13мВт	1	
R5	680 Ом±20% 3,3мВт	1	
R6	10 кОм ±20% 48мВт	1	
R7	20кОм ±20% 37мВт	1	
R8	2кОм ±20% 10мВт	1	
R9	27кОм ±20% 13мВт	1	
R10	50кОм ±20% 24мВт	1	
R11	12кОм ±20% 58мВт	1	
R12	68кОм ±0,5% 33мВт	1	
R13	18кОм ±20% 87мВт	1	
Транзисторы (навесные)			
VT1, VT2	КТ369Г ГОСТ 15172-70	2	
VT3-VT5	КТ332Д ГОСТ 15172-70	3	
VT6	КТ369Г ГОСТ 15172-70	1	
VT7	КТ332Д ГОСТ 15172-70	1	

ЗАДАНИЕ 9 Микросхема К274УН8



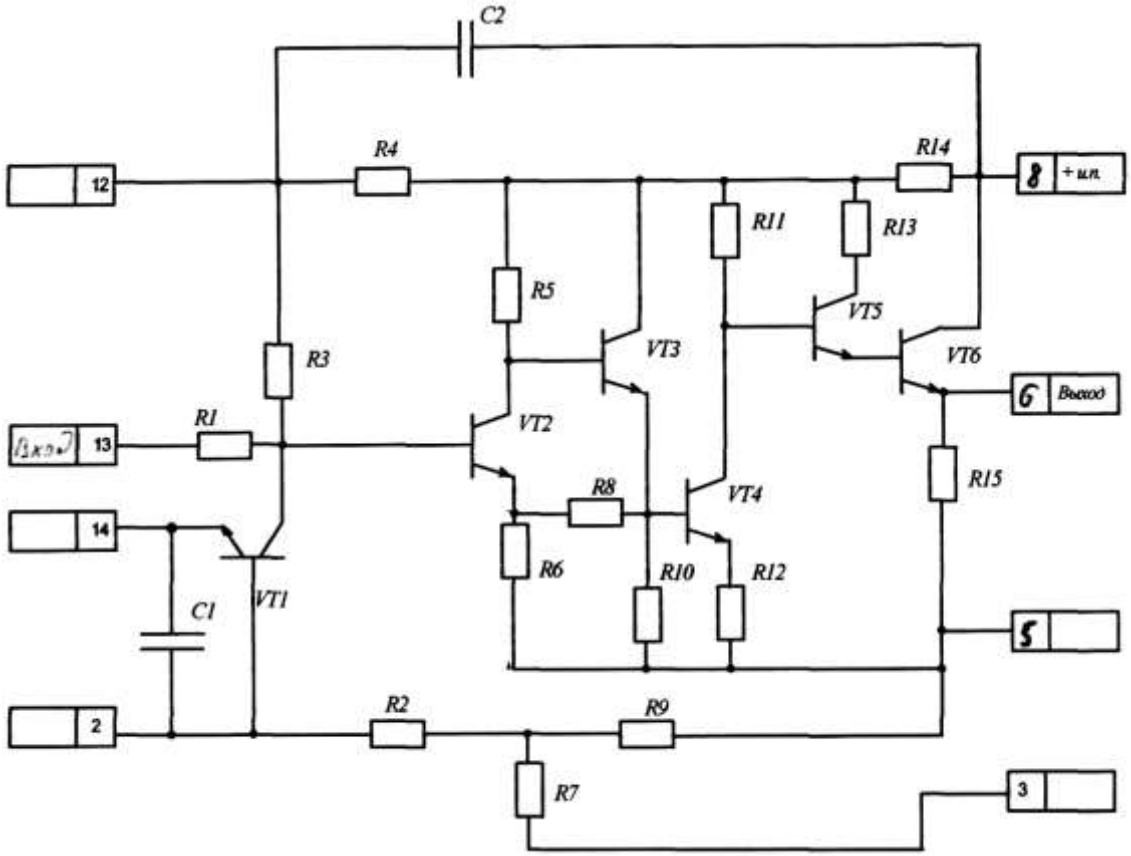
R1	Резистор 4.7кОм± 10% 2,52мВт	1	
R2	9к0м±10% 4,84 мВт	1	
R3	15к0м±10% 50мкВт	1	
R4	2.5к0м±10% 17,89мВт	1	
R5	10кОм±10% 7,16мВт	1	
R6	2.5к0м±10% 17,89мВт	1	
R7	1к0м±10% 0,71мВт	1	
R8	30к0м±0.5% 50мкВт	1	
R9	6кОм±10% % 14,79 мВт	1	
R10	0.8к0м±10% 1,97мВт	1	
R11	1кОм±10% 121 мВт	1	
R12	2к0м±10% 50мкВт	1	
R13	3к0м±10% 50мкВт	1	
R14	22к0м±10% 10 мкВт	1	
C1	Конденсатор 200 пф ± 15% Un=13,2В	1	
C2	К10-17-ПЗЗ 2200 пф± 15% Un=13,2В	1	
VT1-VT16	К129НТ1А1	8	

ЗАДАНИЕ 10
Микросхема К22УНІ6



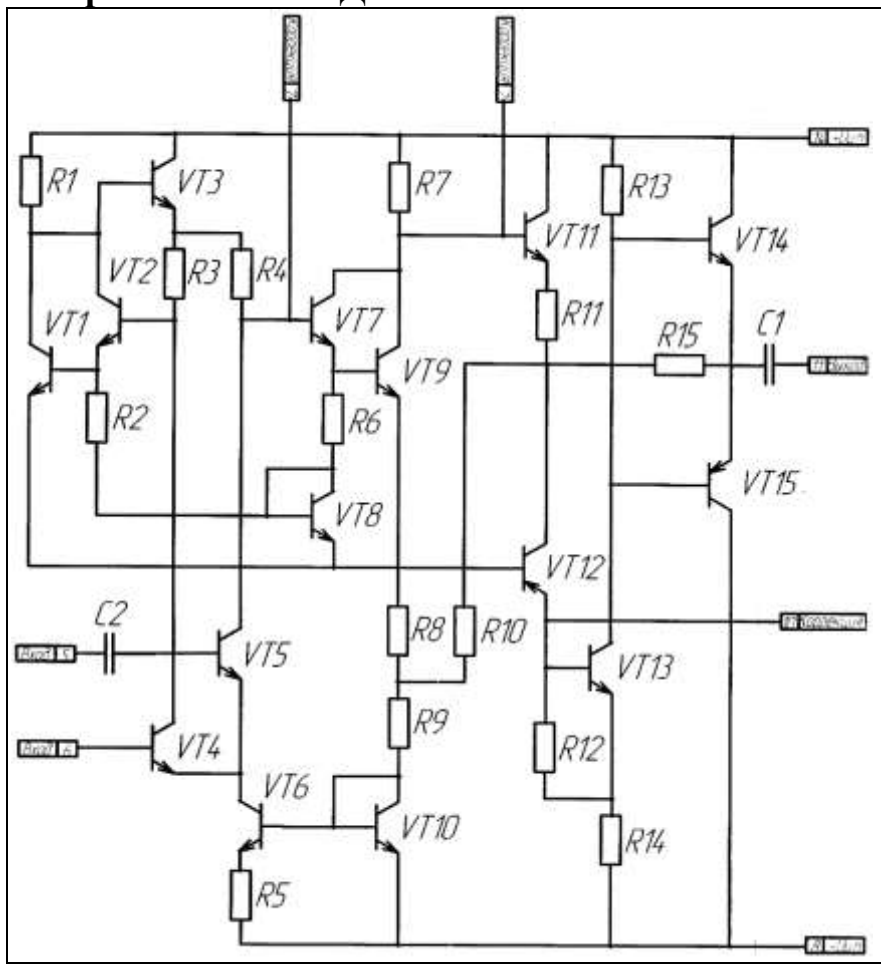
Конденсаторы			
C1	100пФ±15% Up = 12В К10-9-М1500	1	навесной
C2	330пФ±15% Up= 12В	1	плёночный
Резисторы пленочные			
R1	7кОм±10% P=0,01 мВт	1	
R2	24кОм±10% P=0,024мВт	1	
R3	7кОм±10% P=0,01 мВт	1	
R5	10кОм±10% P=0,001 мВт	1	
R4	2,3 кОм±10% P=0,0023мВт	1	
R6	2,4 кОм±10% P=0,0024мВт	1	
R7	10кОм±10% P=0,001 мВт	1	
R8	24 кОм±0.5% P=0,024мВт	1	
R9	7кОм±10% P=0,01 мВт	1	
Транзисторы			
VT1-VT13	КТ324 ЖИ3.365.235.ТУ	5	
Диоды			
VD1	2ДС408А	1	
Unum = +6В			

ЗАДАНИЕ 11
Микросхема К2УС373



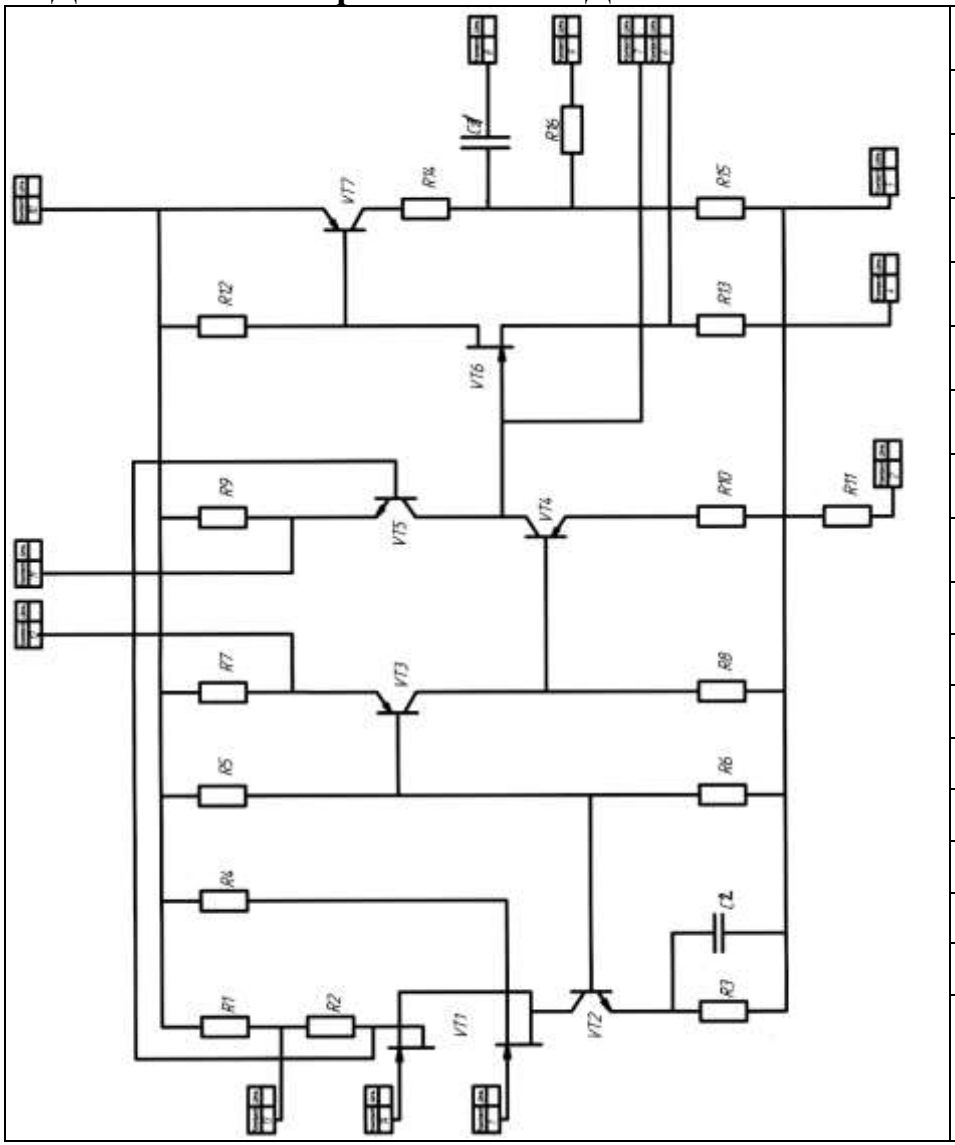
Конденсаторы			
C1	330пФ±15%	1	пленочный
C2	2200пФ±15% К10-17-М 2200	1	навесной
Резисторы пленочные			
R1	1000 Ом±10%	1	
R2	50 кОм±10%	1	
R3	80 кОм±1%	1	
R4	10 кОм±10%	1	
R5	25кОм±10%	1	
R6	100 Ом±10%	1	
R7	40 Ом±10%	1	
R8	2кОм±10%	1	
R9	500 Ом±10%	1	
R10	5 кОм±10%	1	
R11	10 кОм±10%	1	
R12	200 Ом±10%	1	
R13	5 кОм±10%	1	
R14	500 Ом±10%	1	
R15	2 кОм±10%	1	
Транзисторы			
VT1-VT13	КТ307А	6	

ЗАДАНИЕ 12
Микросхема К553УД1



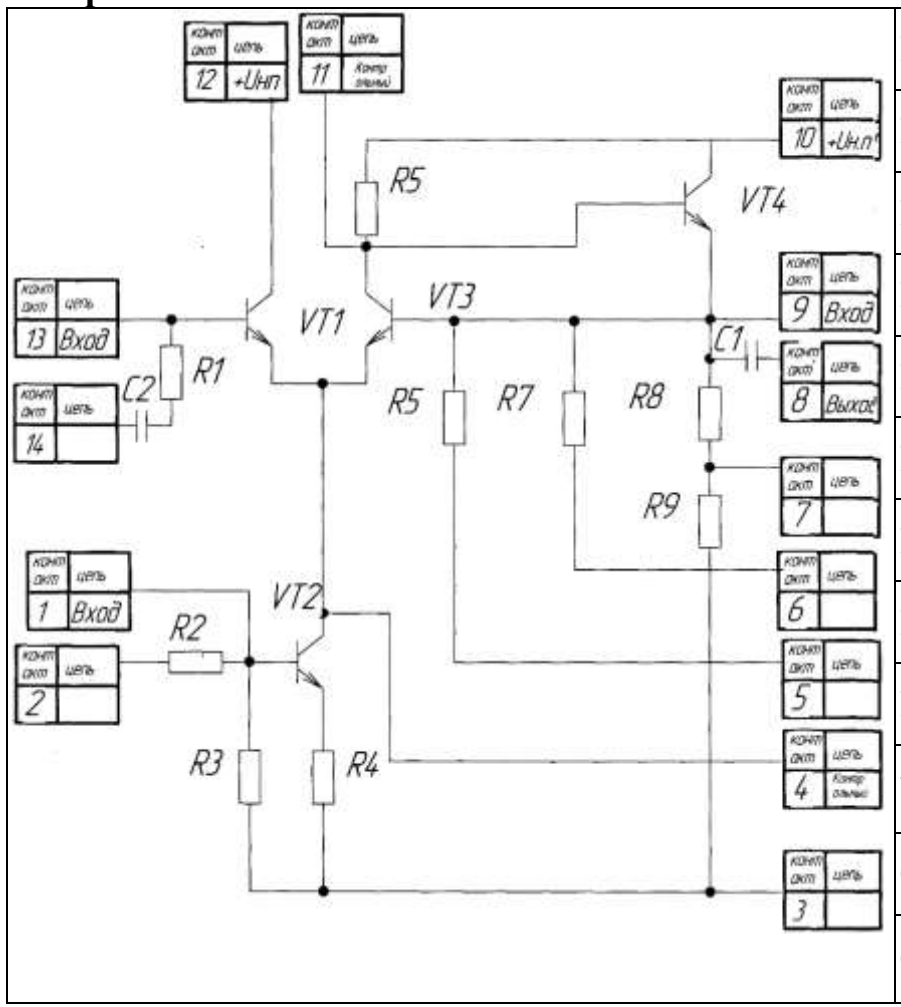
C1	Конденсатор 1500 пФ±10% -25 В К10-9 ОЖО 460.087ТУ	1	
C2	Конденсатор 500 пФ± 15%-15 В	1	Пленочный
R1	Резистор 10 кОм± 10%-50 мВт	1	Пленочный
R2	Резистор 3 кОм± 10%-15,87 мВт	1	Пленочный
R3,R4	Резистор 25 кОм± 10%-16,4 мВт	2	Пленочный
R5	Резистор 2,4 кОм±10%-6,3 мВт	1	Пленочный
R6	Резистор 3 кОм± 10%-15.87 мВт	1	Пленочный
R7	Резистор 10 кОм± 10%-50 мВт	1	Пленочный
R8	Резистор 3,6 кОм± 10%-50 мВт	1	Пленочный
R9	Резистор 18 кОм± 10%-50 мВт	1	Пленочный
R10	Резистор 10 к0м±10%-33.86 мВт	1	Пленочный
R11	Резистор 1 кОм± 10%-18,8 мВт	1	Пленочный
R12	Резистор 10 кОм± 10%-50 мВт	1	Пленочный
R13	Резистор 20 кОм± 10%-12,8 мВт	1	Пленочный
R14	Резистор 0,75 кОм± 10%-2,53 мВт	1	Пленочный
R15	Резистор 30 к0м±0,5%-0,59 мВт	1	Пленочный
VT1,VT11	Транзистор КТ307А	11	СБ0.336. 016 ТУ
VT12	Транзистор КТ202А	1	ЮФЗ.365.020 ТУ
VT13,VT14	Транзистор КТ307А	2	СБО.336.016 ТУ
VT15	Транзистор К Т202А	1	ЮФЗ.365.020 ТУ

ЗАДАНИЕ 13 Микросхема К284УД2



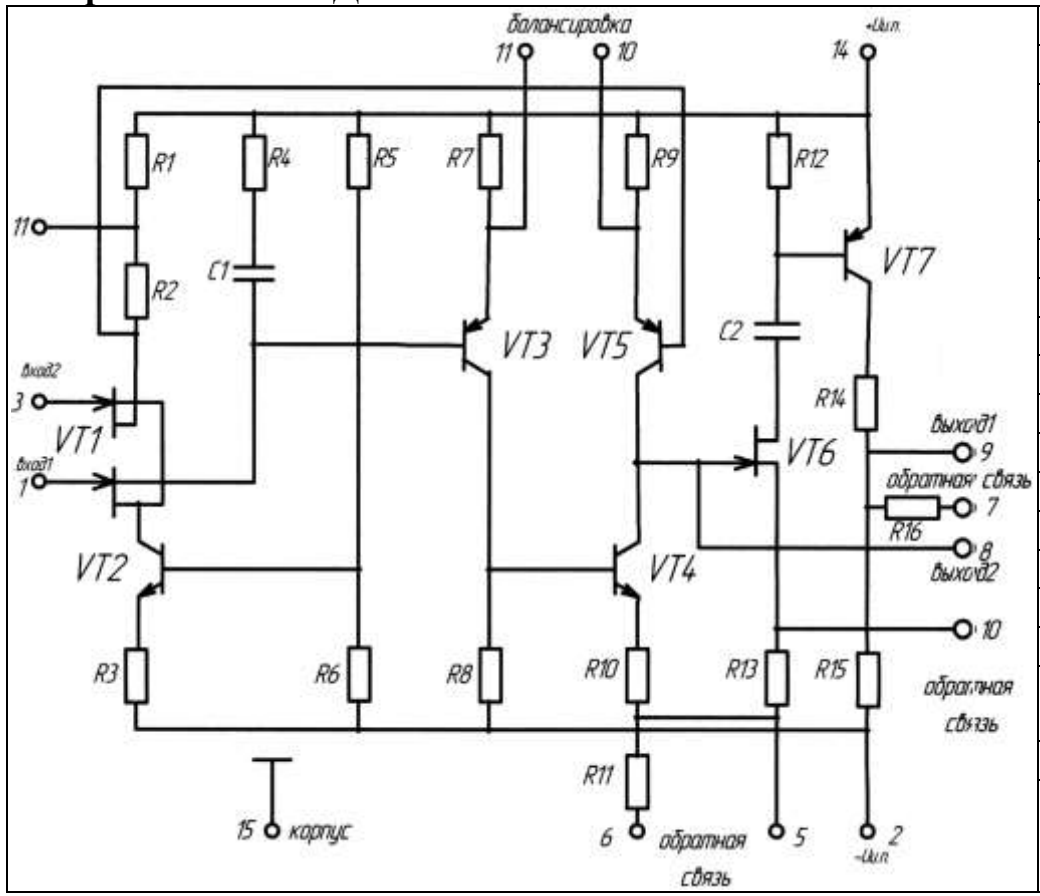
C1	Конденсатор 2200пФ± 15%- 13,2В	1	К10-9
C2	Конденсатор 200пФ±15%-25В	1	Пленочный
R1	Резистор 2.5 к0м+10%-26,45мВт	1	Пленочный
R2	Резистор 5к0м+10%-18,8мВт	1	Пленочный
R3	Резистор 3,56 кОм+10%-39,67мВт	1	Пленочный
R4	Резистор 7,5кОм+10%-49.19мВт	1	Пленочный
R5	Резистор 9,3 к0м+10%-21.16мВт	1	Пленочный
R6	Резистор 4 кОм+10%-21,16мВт	1	Пленочный
R7,R9	Резистор 12к0м+10%-34,68мВт	1	Пленочный
R8	Резистор 9кОм+10%-26мВт	1	Пленочный
R10	Резистор 6кОм+10%-17,34 мВт	1	Пленочный
R11	Резистор 150 Ом+10%-0,43мВт	1	Пленочный
R12	Резистор 1к0м+10%-5,29мВт	1	Пленочный
R13, R15	Резистор 10к0м+10%-52,9мВт	1	Пленочный
R14	Резистор 300 Ом +10%-3,67мВт	1	Пленочный
R16	Резистор 40кОм±0.5%-52,9мВт	1	Пленочный
VT2-VT7	Транзистор КТ331А	5	СБ0.336.021 ТУ
VT1,VT6	Транзистор КП201Е	2	СБ0.336.021 ТУ

ЗАДАНИЕ 14
Микросхема К298УН1



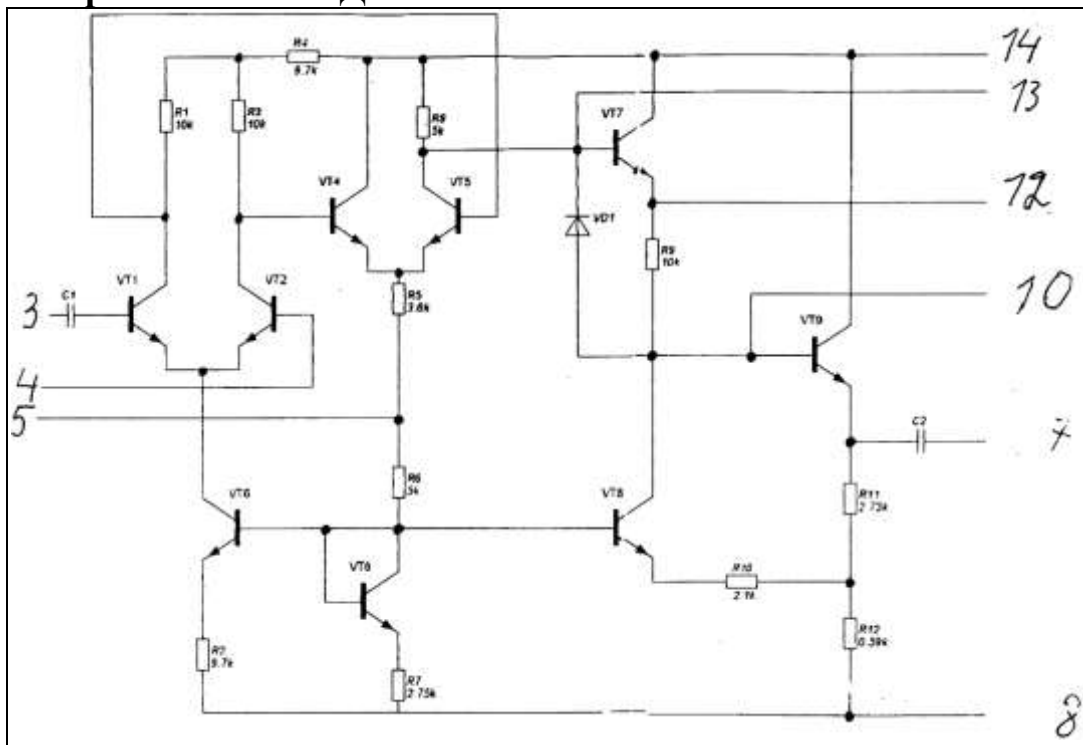
R1	Резистор 12 к0м ±0,35% - 0,006 мВт	1	Прецизионный
R2	Резистор 10 кОм ± 10% -0,007мВт	1	Пленочный
R3	Резистор 8 кОм ± 10% - 0,008 мВт	1	Пленочный
R4	Резистор 0,8кОм ± 10% - 88мВт	1	Пленочный
R5	Резистор 5 к0м ±10 % -64мВт	1	Пленочный
R6	Резистор 12кОм ± 10% -0,006 мВт	1	Пленочный
R7	Резистор 10 кОм ± 10% - 0,007мВт	1	Пленочный
R8	Резистор 0,7 кОм ± 10% -13,6 мВт	1	Пленочный
R9	Резистор 4 кОм ± 10% -77,8 мВт	1	Пленочный
VT1-VT4	Транзистор КТ324-А		СБ0.336.021.ТУ
C1	Конденсатор 100Пф ± 15% Up=8 В	1	Пленочный
C2	Конденсатор К10-17, 1900Пф Up=10 В	1	

ЗАДАНИЕ 15
Микросхема К284УД2



C1	Конденсатор 1500 пФ±10% -25 В	1	К10-9 ОЖ0.460.087 ТУ
C2	Конденсатор 100 пФ± 15%-30 В	1	Пленочный
R1	Резистор 2,5 к0м±10%-7,5 мВт	1	Пленочный
R2	Резистор 5 к0м± 10%-2 мВт	1	Пленочный
R3	Резистор 3,56 к0м±10%-8 мВт	1	Пленочный
R5	Резистор 9.3 к0м± 10%-6,1 мВт	1	Пленочный
R6	Резистор 4 к0м±10%-2,6 мВт	1	Пленочный
R7,R9	Резистор 12 кОм± 10%-3,1 мВт	2	Пленочный
R8	Резистор 9 кОм± 10%-2,3 мВт	1	Пленочный
R10	Резистор 6 к0м±10%-1,2 мВт	1	Пленочный
R11	Резистор 150 Ом±10%-0,3 мВт	1	Пленочный
R12	Резистор 1 к0м±10%-1 мВт	1	Пленочный
R13	Резистор 10 кОм±10%-11 мВт	1	Пленочный
R14	Резистор 300 0м±10%-0,6 мВт	1	Пленочный
R15	Резистор 10 к0м± 10%-20 мВт	1	Пленочный
R16	Резистор 40 к0м± 1%-30 мВт	1	Пленочный
VT1	Транзистор КТ369Г	1	СБО.336.016 ТУ
VT2-VT5	Транзистор КТ332Д	4	ЮФЗ.365.020 ТУ
VT6	Транзистор КТ369Г	1	СБ0.336.016 ТУ
VT7	Транзистор КТ332Д	1	ЮФЗ.365.020 ТУ

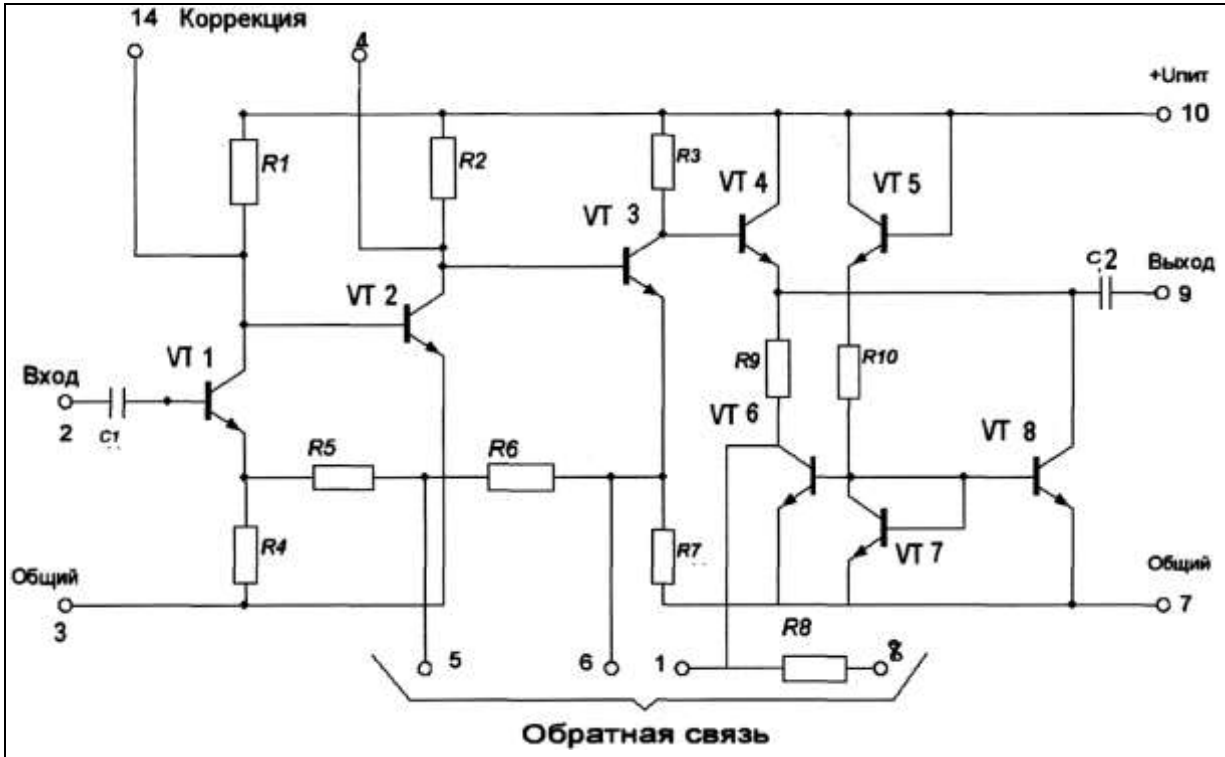
ЗАДАНИЕ 16
Микросхема К240УД1



Резисторы пленочные			
R1	10000 Ом± 10% Р =0,007Вт	1	
R2	9700 Ом± 10% Р = 0,0003Вт	1	
R3	10000 Ом ±10% Р= 0,0009Вт	1	
R4	9700 Ом ±10% Р = 0,00087Вт	1	
R5	3600 Ом± 10% Р = 0,001 Вт	1	
R6	5000 0м± 10% Р = 0,0001 Вт	1	
R7	2750 Ом±10% Р = 0,0014 Вт	1	
R8	5000 0м±2% Р= 0,0014 Вт	1	
R9	10000 Ом± 10% Р =0,0049 Вт	1	
R10	2100 Ом± 10% Р =0,001 Вт	1	
R11	2730 0м±10% Р = 0019 Вт	1	
R12	590 Ом± 10% Р = 0.0042 Вт	1	
Конденсаторы			
C1	К10-9 1500пФ±15% Up=10В 0Ж0.460.068 ТУ	1	Навесной
C2	700пФ±15% Up=15В	1	Пленочный
Транзисторы			
VT1- VT9	КТ331А ХМО.336.000 ТУ	9	Навесной
Диоды			
VD1	КД918А	1	Навесной

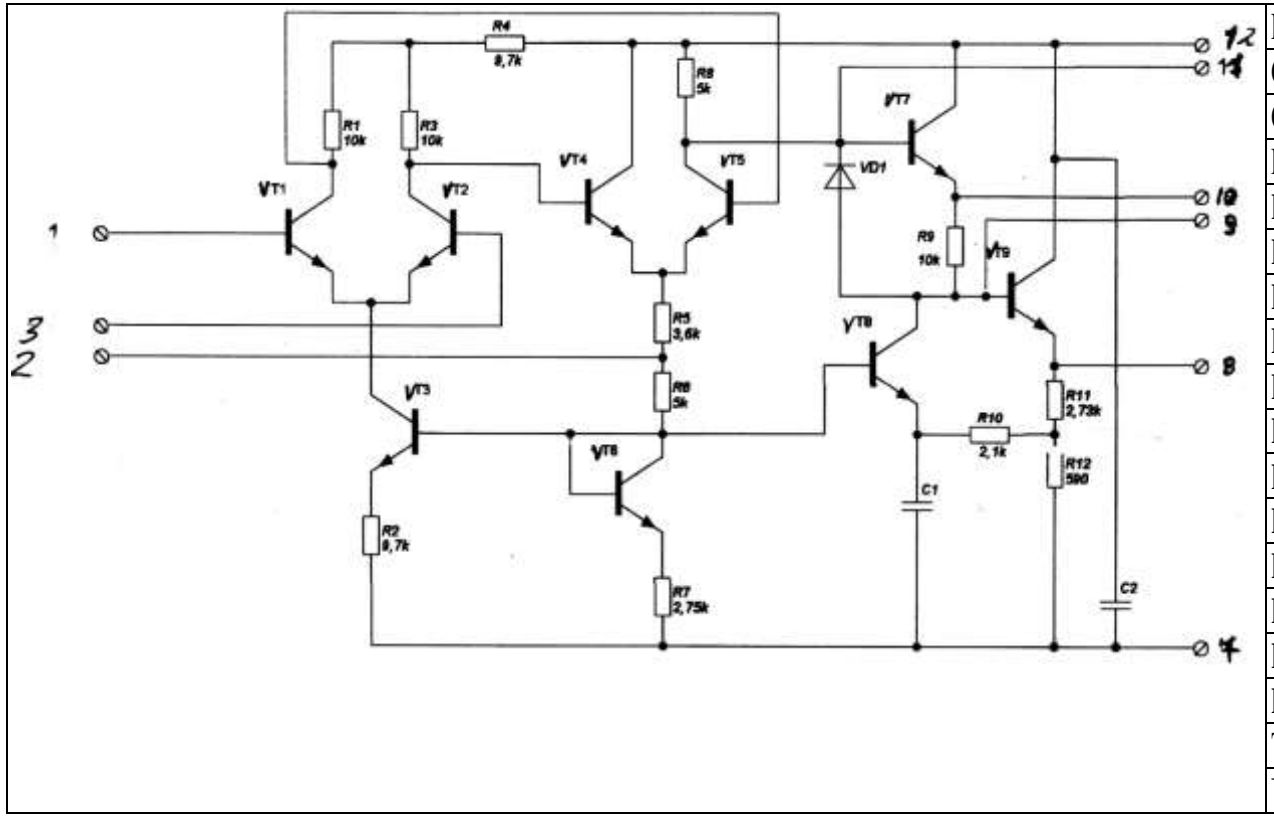
ЗАДАНИЕ 17

Микросхема К223УН1



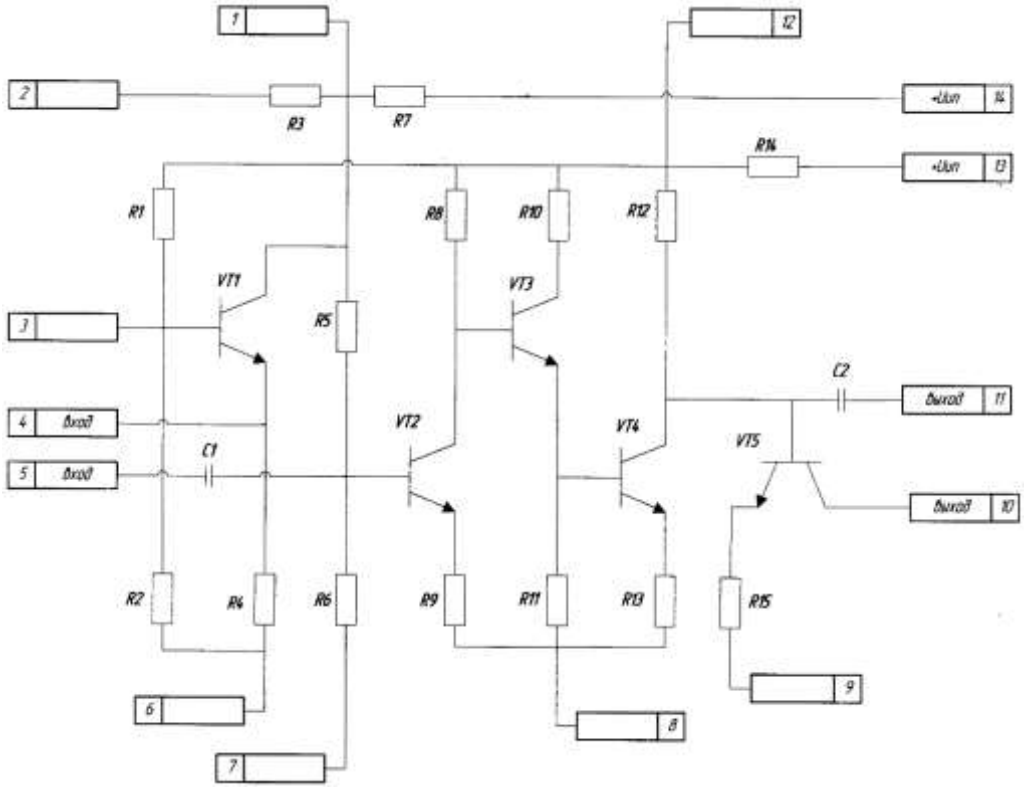
R1	Резистор 9 кОм±10%	1	
R2	Резистор 5 кОм±10%	1	
R3	Резистор 600 Ом±10%	1	
R4	Резистор 100 Ом±10%	1	
R5	Резистор 430 Ом±10%	1	
R6	Резистор 6,3 кОм±10%	1	
R7	Резистор 100 Ом±10%	1	
R8	Резистор 13 кОм±0,6%	1	
R9	Резистор 3 кОм±10%	1	
R10	Резистор 6 кОм±10%	1	
C1	Конденсатор 1900 пф±15%	1	К10-9
C2	Конденсатор 100 пф±15%	1	
T1.. T8	Транзисторы КТ331А, Uкэ =20В	8	

ЗАДАНИЕ 18
Микросхема К240УД1



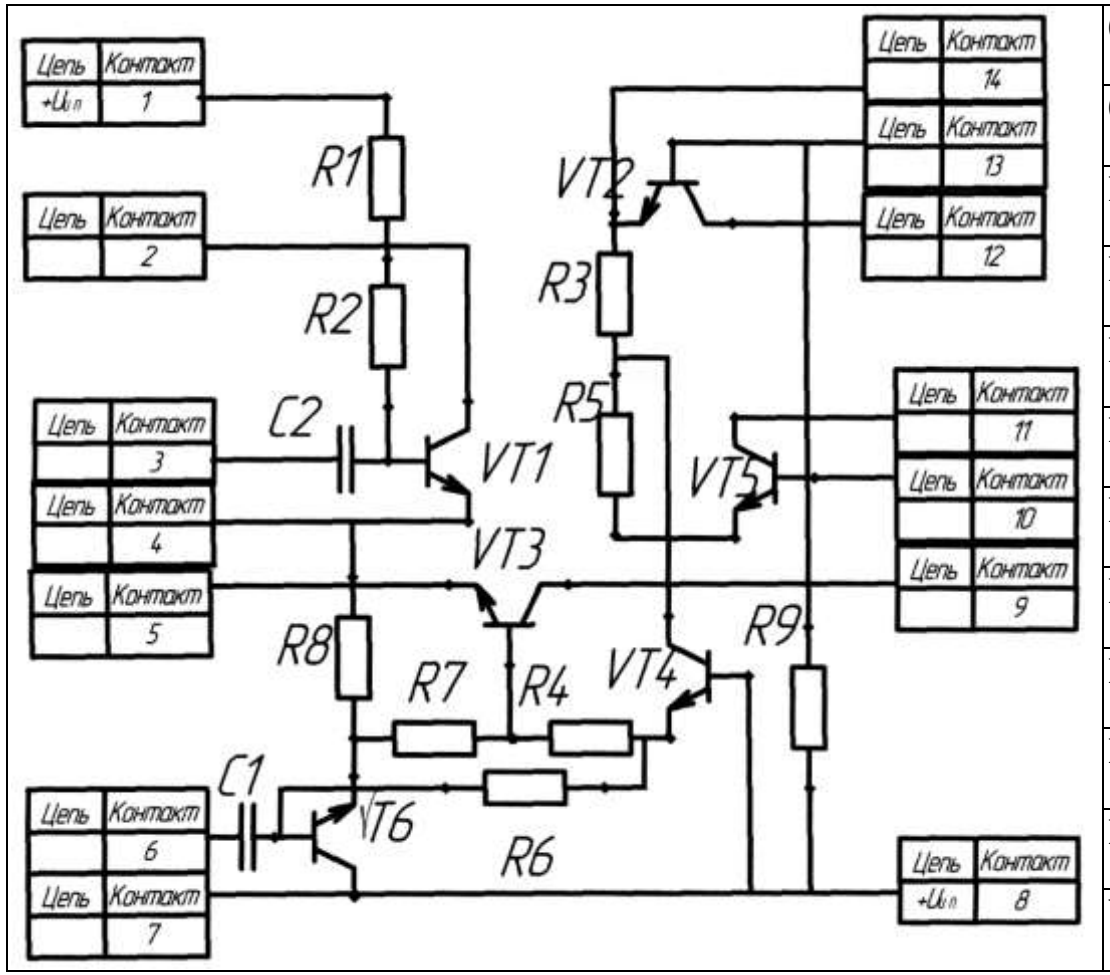
Конденсаторы		
C1	Пленочный 100 пФ± 15%-10В	1
C2	К10-17 1200 пФ ±15%-10В ОЖО.460.107 ТУ	1
Резисторы тонкопленочные		
R1	10 кОм ±10%-3,1мВт	1
R2	9,7 кОм±10%-3 мВт	1
R3	10 кОм ±10%-3,1мВт	1
R4	9,7кОм ±10%-3 мВт	1
R5	3,6 кОм ±10%-22 мВт	1
R6	5кОм ±10%-30 мВт	1
R7	2,75кОм± 10%-10 мВт	1
R8	5 кОм±10%-5 мВт	1
R9	10 кОм +0.5%-17м Вт	1
R10	2,1кОм ±10%-3 мВт	1
R11	2,73 кОм±10%-70 мВт	1
R12	0,59 кОм+10%-24 мВт	1
Транзисторы		
VT1…VT10	КТ324А СБО.361.031 ТУ	10

ЗАДАНИЕ 19
Микросхема К2УС372



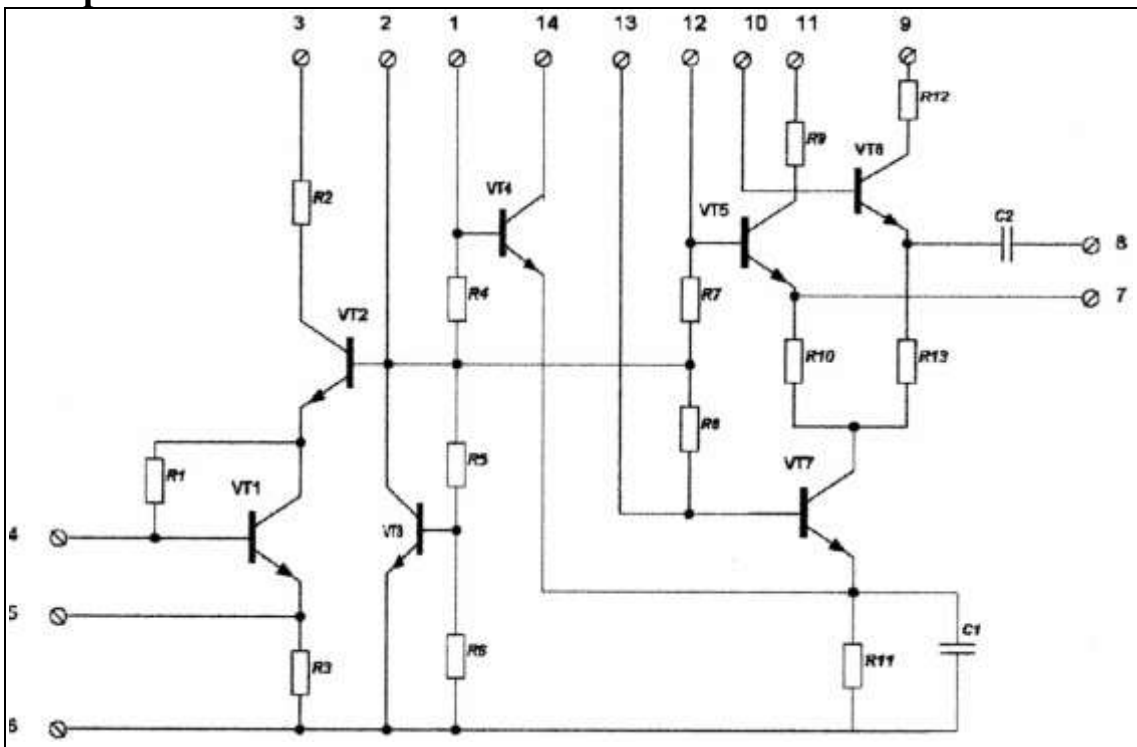
Резисторы пленочные			
R1	15000 Ом±10% P = 1,35 мВт	1	
R2	5000 Ом±10% P = 0,45 мВт	1	
R3	45 Ом±10% P = 12 мВт	1	
R4	850 Ом±10% P = 50 мВт	1	
R5	10000 Ом±10% P = 1,6 мВт	7	
R6	5000 Ом± 10% P = 0,8 мВт	7	
R7	2900Ом±10% P = 5,76мВт	1	
R8	20000 Ом±2% P= 1,8 мВт	1	
R9	100 Ом± 10% P = 0,009 мВт	1	
R10	4000 Ом±10% P = 3,24 мВт	1	
R11	3000 Ом± 10% P = 2,43 мВт	1	
R12	4000 Ом±10% P = 5,76 мВт	1	
R13	25 Ом±10% P = 0,036 мВт	1	
R14	1500 Ом±10% P = 2,16 мВт	1	
R15	25 Ом±10% P = 20 мВт	1	
Конденсаторы			
C1	К10-9 1500пФ+15% Uр=10В ОЖО 460.068 ТУ	1	Навесной
C2	800пФ+15% Uр=15В	1	Пленочный
Транзисторы			
VT1 - VT5	КТ331А ХМО.336.000 ТУ	5	Навесной

ЗАДАНИЕ 20
Микросхема К2ЖА371



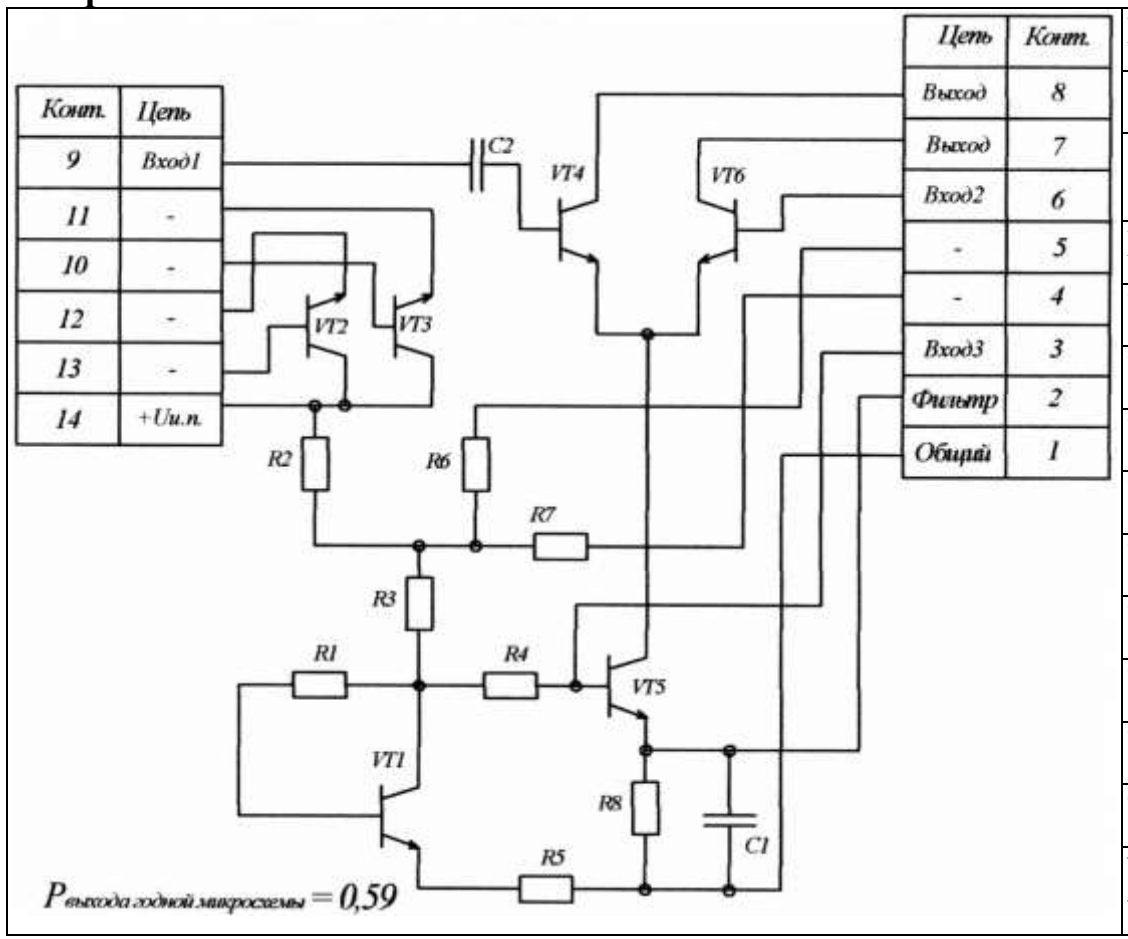
C1	Конденсатор 1500пФ ±15% 25В	1	К10-9
C2	Конденсатор 500пФ ±15% 15В	1	Пленочный
R1	Резистор 8к0м ±10%-0,6272мВт	1	Пленочный
R2	Резистор 3ОкОм ±2%-2,4мВт	1	Пленочный
R3	Резистор 400 0м ±10%-2мВт	1	Пленочный
R4	Резистор 400 0м ±10%-15мВт	1	Пленочный
R5	Резистор 400 0м ±10%-2,5мВт	1	Пленочный
R6	Резистор 6кОм ±10%-30,1мВт	1	Пленочный
R7	Резистор 40 0м ±10% 2мВт	1	Пленочный
R8	Резистор 60 0м ±10%-3мВт	1	Пленочный
R9	Резистор 4кОм ±10%-0,004	1	Пленочный
VT1-VT6	Транзистор КТ307А	6	

ЗАДАНИЕ 21
Микросхема К2ЖА375



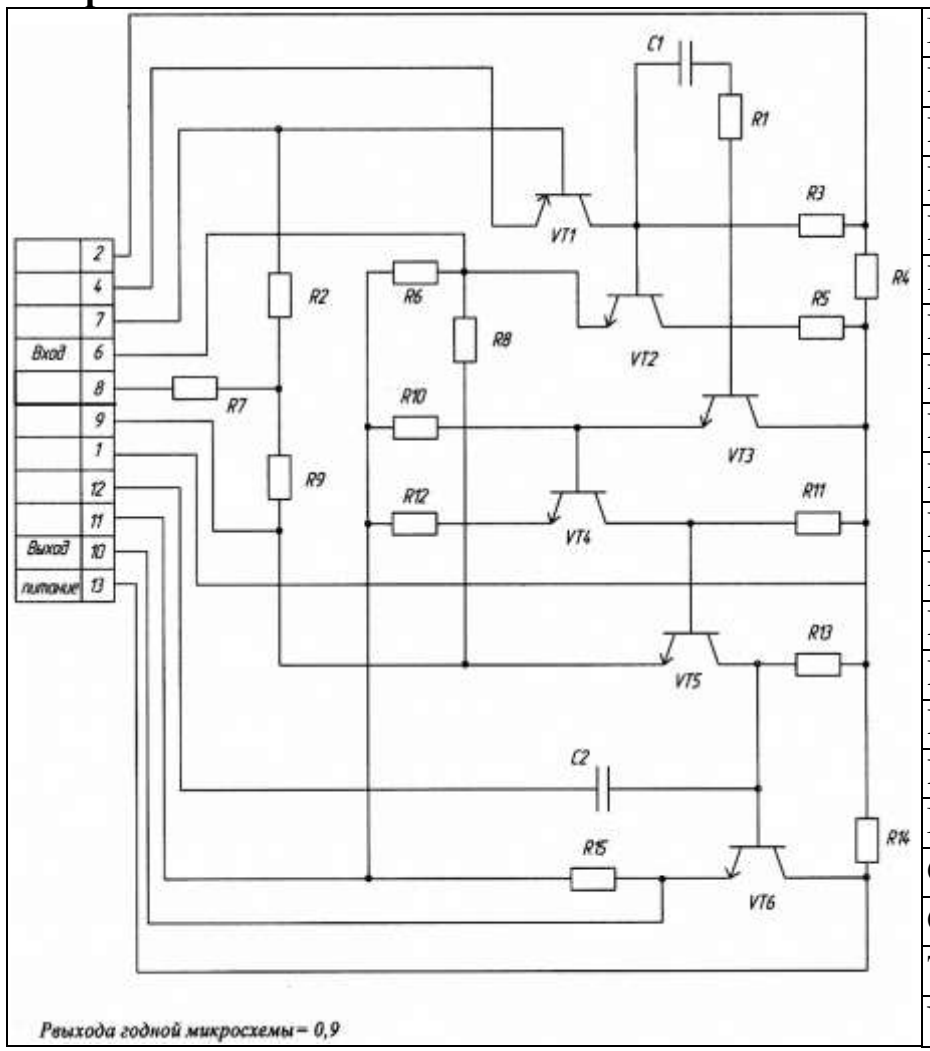
R1	Резистор 2 кОм±10%, 0,005мВт	1	Пленочный
R2	Резистор 100 Ом ±10%, 0,225мВт	1	Пленочный
R3	Резистор 600 Ом ±10%, 1,35мВт	1	Пленочный
R4	Резистор 2 кОм ±10%, 0,005мВт	1	Пленочный
R5	Резистор 4 кОм ±10%, 0,005мВт	1	Пленочный
R6	Резистор 2 кОм ±10%, 0,005мВт	1	Пленочный
R7	Резистор 4 кОм ±0,25%, 0,19мВт	1	Пленочный
R8	Резистор 2 кОм ±10%, 0,085мВт	1	Пленочный
R9	Резистор 100 Ом ±10%, 0,13мВт	1	Пленочный
R10	Резистор 200 Ом ±10%, 1,22мВт	1	Пленочный
R11	Резистор 600 Ом ±10%, 1,88 мВт	1	Пленочный
R12	Резистор 100 Ом ±10%, 0,12мВт	1	Пленочный
R13	Резистор 200 Ом ±10%, 0,23мВт	1	Пленочный
C1	Конденсатор 500 Пф±15%, Up = 8В	1	Пленочный
C2	Конденсатор К10-17 1900 пФ, Up= 10В	1	
VT1... VT7	Транзисторы КТ324А, Uкэ =10В	7	СБ0.336.021 ТУ

ЗАДАНИЕ 22
Микросхема К275УВ2



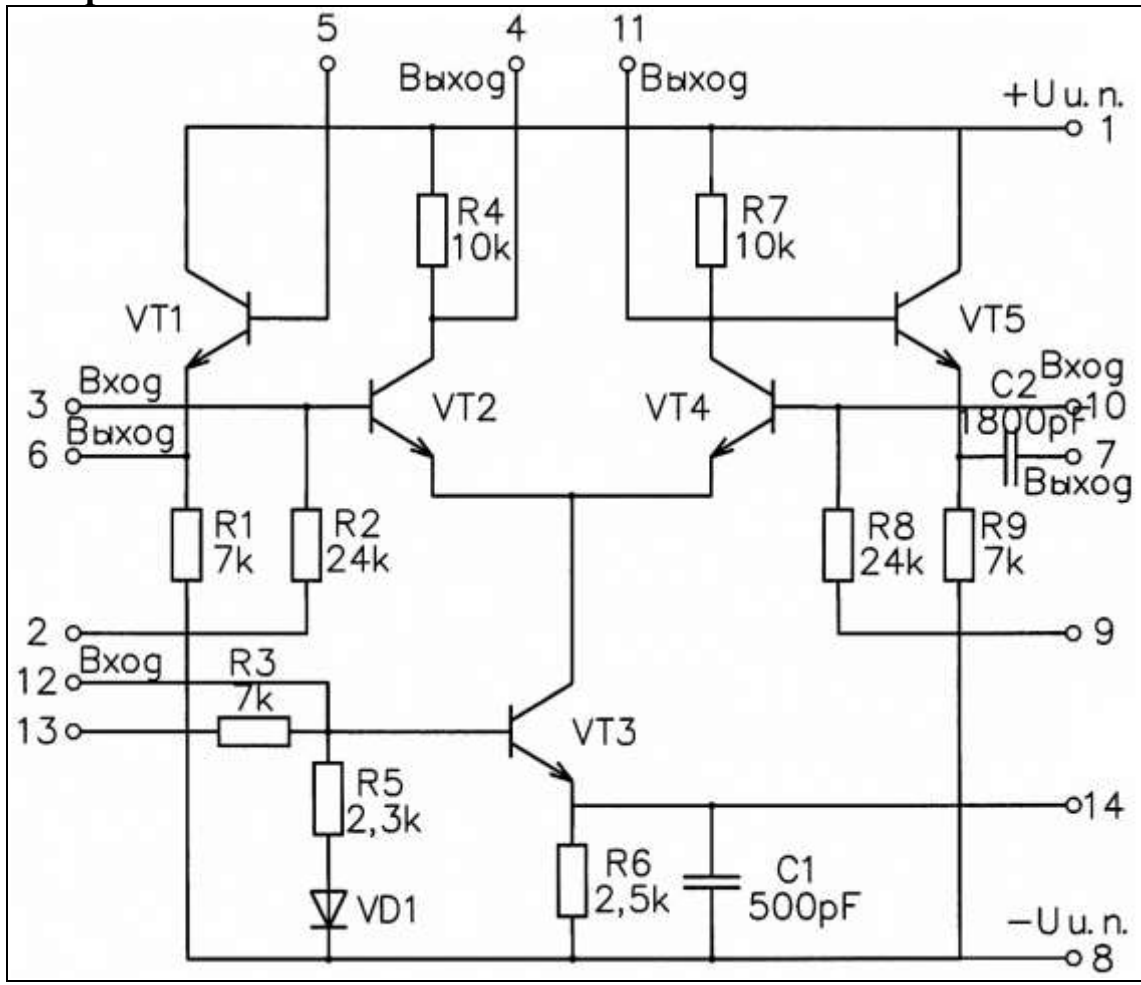
Конденсаторы			
C1	200пФ±15% Up=12В	1	пленочный
C2	К10-9-Н30 2000пФ ОЖО.464.123 ТУ	1	
Резисторы пленочные			
R1	9кОм±10% 3.24мВт	1	
R2	6.6кОм±10% 19мВт	1	
R3	1.7кОм±10% 20мВт	1	
R4	3кОм±10% 14 мВт	1	
R5	0.9кОм±10% 2.5мВт	1	
R6	3кОм±10% 14 мВт	1	
R7	3кОм±10% 14 мВт	1	
R8	9кОм±0.5% 7.22мВт	1	прецизионный
Транзисторы			
VT1-VT6	2Т354А СБО.336.038 ТУ	6	

ЗАДАНИЕ 23
Микросхема К224УН16



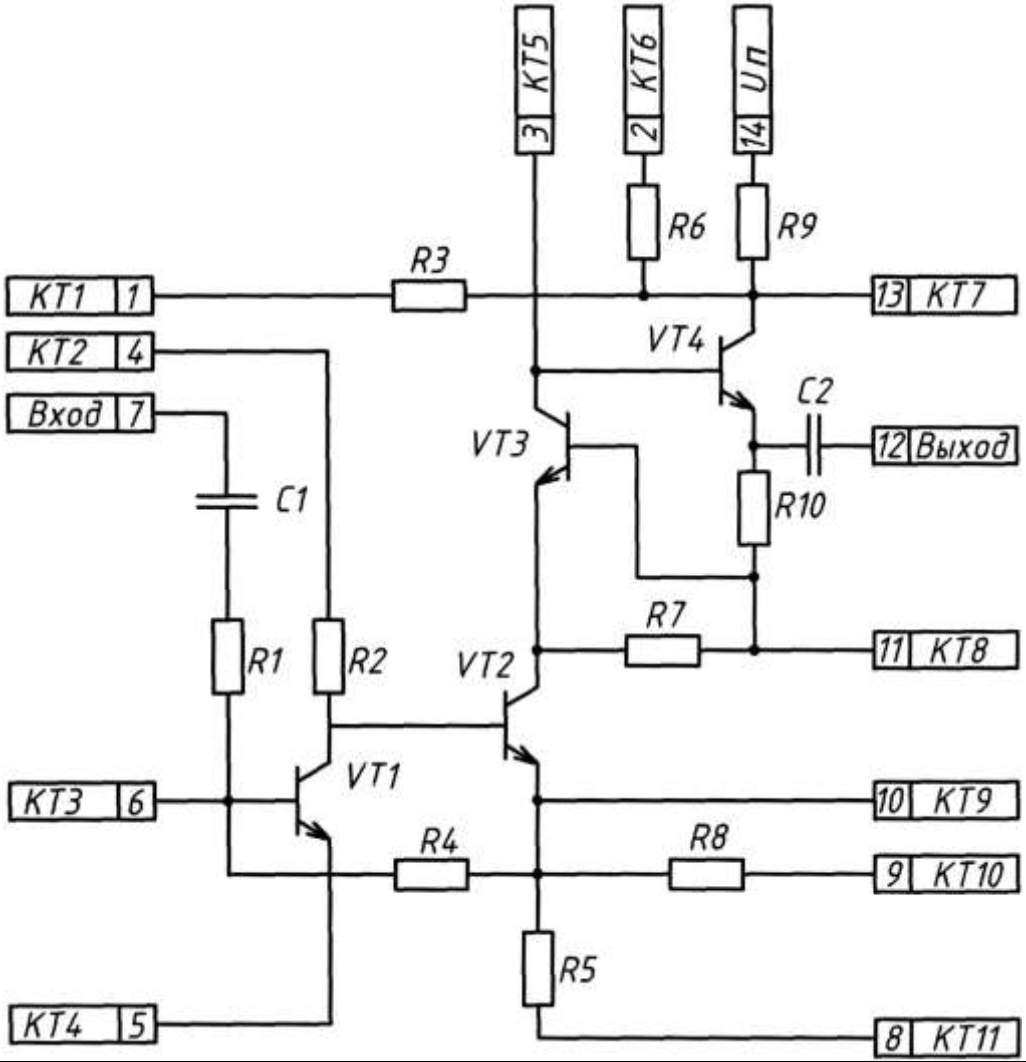
Резисторы пленочные		
R1	1 кОм±10% P=0,1 мВт	1
R2	5 кОм±10% P=0,2 мВт	1
R3	8 кОм±10% P=11 мкВт	1
R4	10 кОм±10% P=14 мкВт	1
R5	25к0м±0.5% P=46 мкВт	1
R6	100 Ом±10% P=1,9 мкВт	1
R7	400 Ом±10% P=0,1мВт	1
R8	2 кОм±10% P=0,1мВт	1
R9	500 Ом±10% P=1,2 мВт	1
R10	5 кОм±10% P=0,1мВт	1
R11	10 кОм±10% P=1,1 мВт	1
R12	400 Ом±10% P=2,4 мВт	1
R13	5 кОм±10% P=8,8 мВт	1
R14	500 Ом±10% P=1,1 мВт	1
R15	2 кОм ±10% P=8,8 мВт	1
Конденсаторы		
C1	К10-9 1500пФ±15% Uр=10В ОЖО.460.068 ТУ	1
C2	700пФ±15% Uр=15В	1
Транзисторы		
VT1-VT6	КТ324А ХМО.336.000 ТУ	6

ЗАДАНИЕ 24
Микросхема К198УТ1



Конденсаторы			
C1	Конд. 500 пФ (+15)%-6,9В	1	пленочный
C2	К10-17-ПЗЗ-1800 пФ (-20+50)%	1	
	ОЖ0.460.107ТУ		
Микросхемы			
VT1-VT2	Микросхема серии К129 (1НТ291А)	1	
VT4-VT5	Микросхема серии К129 (1НТ291А)	1	
VT3-VD1	Микросхема серии К129 (1НТ291А)	1	
Резисторы			
R1	7к0м+10%-17,94мВт		пленочный
R2	24кОм+2%-7 мкВт		пленочный
R3	7кОм+10%-7 мкВт		пленочный
R4	10кОм+10%-8,08 мВт		пленочный
R5	2,3кОм+ 10%-7 мкВт		пленочный
R6	2,5к0м+10%-8,08мВт		пленочный
R7	10кОм+10%-8,08мВт		пленочный
R8	24кОм+ 1 0% - 7 мкВт		пленочный
R9	7кОм+ 10%-17,94мВт		пленочный

ЗАДАНИЕ 25
Микросхема К2УС375



Конденсаторы		
C1	Пленочный 300 пФ±15% 15в	1
C2	К10-17В 600пФ±15% 155 ОЖО.460.107 ТУ	1
Тонкопленочные резисторы		
R1	200 Ом ±10% 1,25 мВт	1
R2	2000 Ом ±10% 1,16 мВт	1
R3	2000 Ом ±10% 1,16 мВт	1
R4	3000 Ом ±0,05% 1,25 мВт	1
R5	500 Ом ±10% 5,9 мВт	1
R6	1000 Ом ±10% 5,25 мВт	1
R7	1500 Ом ±10% 1,97мВт	1
R8	20 Ом ±10% 80 мкВт	1
R9	200 Ом ±10% 3,52 мВт	1
R10	400 Ом ±10% 524 мкВт	1
Транзисторы		
VT1-VT4	2Т364А ЩТ3.365.060 ТУ	4

ГАЙНУЛЛИНА Наталья Романовна

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Учебное пособие

Редактор

Технический редактор С.В.Фокеева

Компьютерная верстка

Подписано в печать:
Формат 60×84 1/16 Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. ... . Тираж 100 экз. Заказ

Издательство Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ-КАИ)420029,
Типография КНИТУ-КАИ.420111, Казань, К.Маркса, 10