

## Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств

В силу того, что в настоящее время устройства и системы выполняются в виде интегральных схем и всего того, что основная тенденция развития радиоэлектронной аппаратуры это повышение функциональной сложности, быстродействия, то понятно, что всё должно быть миниатюрным и с высокой степенью интеграции. Фактически разработка в виде интегральных схем либо на кристалле, либо на поверхности диэлектрика. Таким образом, в единую конструкцию необходимо «вогнать» всю систему «в корпусе» или «на кристалле».

Стоит вопрос, каким образом вас подготовить к вот такого рода деятельности за 8 лекций. Конечно, это невозможно. Понятно дело, мы будем рассматривать более обобщенные вещи, но вы должны быть на стыке двух дисциплин: с одной стороны технология конструкции, с другой стороны система. В не зависимости от того где и кем вы будете работать в дальнейшем вы должны понимать и систему, и конструкцию, и технологию изготовления и её возможности. В противном случае, даже при выполнении лабораторной работы №28, проектируя гибридную интегральную схему, вы увидите как дестабилизирующие факторы, такие как технологические, влияние внешней среды будут влиять на выбор конструкции отдельных элементов. Вам необходимо понимать взаимосвязь параметров и во что это выливается.

Сегодняшняя лекция – «Тенденции и перспективы развития радиоэлектронных средств. Интегральная и функциональная электроника – основы высоконадежных радиоэлектронных средств» (РЭС). Основной тенденцией развития радиоэлектронных средств является постоянное повышение функциональной сложности. Закон Мура : функциональная сложность каждые пять лет повышается на порядок. Повышение функциональной сложности в рамках традиционных принципов построения означает лавинообразный рост активных и пассивных элементов и компонентов.

Рассмотрим пример. Предположим, мы хотим создать некоторое устройство, которое содержит  $N=10^8$  элементов на кристалле. Много это или мало? На данный момент уже освоена степень интеграции  $N=10^7$  элементов на кристалл, что составляет всего 10 корпусов интегральных микросхем. Вернемся на 40 лет назад. Ранее устройства формировались в виде печатных плат на которые устанавливались отдельные дискретные компоненты: транзисторы, диоды, резисторы и т.д.. Каждый дискретный элемент в корпусе составлял порядка  $W=1 \text{ см}^3$ , масса элемента  $m=1 \text{ г}$ . Теперь, если умножить это на  $10^8$ , учитывая элементы соединения (различные кабели, трассировки и т.д.) получится  $W=100 \text{ м}^3$ . Это объем сравнимый с большой аудиторией, которая заполнена исключительно аппаратурой, вместо 10-ти интегральных микросхем. У такой конструкции соответствующий вес и в космос такое не запустить, но проблема состоит в надежности. Величина  $\lambda$  - интенсивность отказов, которая характеризует частоту отказов. Примем её величину как  $\lambda = 10^{-7} \text{ 1/час}$ . Среднее время безотказной работы  $T=1/\lambda=10^7=1000 \text{ лет}$ . Казалось бы, на наш век хватит, но вопрос состоит в том, что количество переходит в качество. Интенсивность отказов всего устройства в целом равно сумме отказов  $\lambda_{\Sigma}=\sum\lambda_i=10^8*10^{-7}=10$ . Среднее время безотказной работы будет равно  $T=0,1 \text{ часа}$ . Это говорит о том, что принципиально такое устройство сделать невозможно, при этом вероятность безотказной работы будет

всего составлять всего 37%, что потом мы с вами докажем. Изделия широкого применения требуют вероятность безотказной работы 0.9. Поэтому срок эксплуатации уменьшается в 10 раз, в результате выходит не 0,1 часа, а 0,01 часа, спец. аппаратура 0,0099 часа. Теперь мы видим, что такое изделие, содержащее  $10^8$  элементов, 40 лет назад было создать принципиально невозможно, потому что оно не обеспечивает требования по надежности.

$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i$  – это есть математическое отражение противоречия между функциональной сложностью и надежностью. если  $\lambda_i = \lambda_j$ , при  $i \neq j$ , то  $\lambda_{\Sigma} = N\lambda_i$  и  $T_{\text{ср}\Sigma} = \frac{1}{N\lambda_i} = \frac{T_{\text{ср}i}}{N}$ . Соответственно, чем больше элементов, тем ниже надежность.

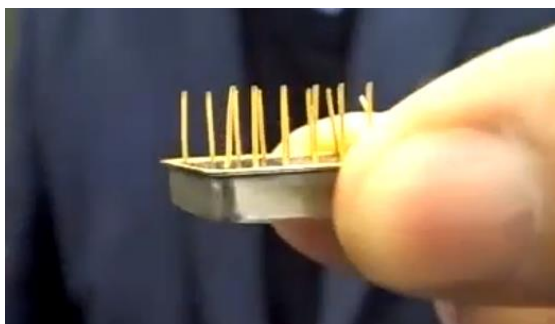
функциональной сложностью и надежностью. Масса, габариты, стоимость в данном случае являются вторичными параметрами, главное было решить проблему надежности.

Микроэлектроника как направление развития электроники обеспечивает разрешение противоречия между функциональной сложностью и надежностью радиоэлектронных средств.

Как это достигается? Брем транзистор с тремя выводами (эмиттер, база, коллектор). Транзистор выполнен в кристалле. Необходимо осуществить сварное соединение к каждому выводу транзистора на контактную площадку кристалла. Далее транзистор помещается в корпус и появляется ещё три контакта на внешние выводы. После этого транзистор устанавливается на саму плату и добавляется ещё три паяных соединения. Таким образом, на один транзистор получается 10 элементов определяющих надежность.

Факторы повышения надежности РЭС за счет повышения степени интеграции ИМС:

1. Существенное уменьшение паяных и сварных соединений.
2. Обеспечение корреляционной взаимосвязи между электрическими и надежностными параметрами элементов ИМС.



На изображении виден корпус с ограниченным количеством внешних выводов. Внутри корпуса находится кристалл, который может иметь  $10^8$  элементов. Внешних выводов всего 14, что по сравнению с количеством элементов пренебрежимо мало. За

счет технологической интеграции элементов в кристалле достигается существенное уменьшение сварных и паяных соединений, что влечет за собой увеличение надежности. Фактически надежность определяется только кристаллом, в данном случае.

За счет чего достигается интеграция? Говорят интегральная микросхема, интегральная электроника и функциональная электроника. В данном случае предполагается технологическая интеграция элементов в кристалле или на подложке. Уменьшение числа  $N$  элементов.

Второй фактор. Все элементы изготавливаются в едином технологическом цикле на кристалле, т.е. на ограниченной площади. Площадь кристалла, например  $1 \times 1$  мм,  $15 \times 15$  мм. Можно предположить, что элементы, изготовленные в едином технологическом цикле, на малой площади будут иметь идентичные параметры как электрические, так и надежность. Т.е. если они будут выходить из строя, то одновременно. В идеале надежность всего устройства стремится к надежности одного элемента.



Возьмем кремниевую пластину. Видимые ячейки это будущие кристаллы интегральной микросхемы. Предположим, что в едином технологическом цикле в одной ячейке будет изготовлен один транзистор, во второй  $10^3$  транзисторов, в третьей  $10^6$  и в четвертой  $10^8$ . Какой из этих будущих кристаллов будет обладать более высокой надежностью? Конечно, первый. Теперь предположим, что попал какой-то дефект или изменилась дислокация пластины в процессе выращивания стержня. Теперь на пластине есть некая локальная неоднородность. Первый кристалл имеет один элемент и если на него попал этот дефект, то он будет подпорчен и будет иметь  $\lambda = 10^{-7}$ . В случае с четвертым кристаллом какая-то часть транзисторов будет иметь надежность  $10^{-7}/\lambda$ , например, 10% (т.е.  $10^7$ ). Такие транзисторы в принципе хорошие, если бы он один был, но их 10 млн. штук в области дефекта. В таком случае,  $\lambda_{\Sigma} = 1/\text{час}$ , а среднее время безотказной работы станет 1 час. Мы видим, что чем больше степень интеграции, тем больше вероятность того, что в дефект попадет большее количество элементов. Это значит, что эта интегральная микросхема откажет или в процессе изготовления или в процессе предварительного прогона. Каждое изделие ставится на прогон в течение трех суток, поэтому эта интегральная микросхема выйдет из строя в течение этих трех суток в силу потенциальной ненадежности данного кристалла в силу того, что в процессе технологии изготовления образовался некоторый дефект на который попало большое количество элементов. Таким образом, чем выше степень интеграции, тем ниже надежность, выше вероятность отказа в процессе изготовления

или предварительного прогона аппаратуры или самого кристалла. К потребителю попадут только те кристаллы, элементы которого высоконадежны. Процент выхода будет низкий (10%, а может и 2%), но зато потребителю попадут интегральные микросхемы высоконадежные, у которых отсутствуют дефекты. Поэтому мы ставим перед собой задачу повышения степени интеграции. Соответственно будет ниже стоимость, меньше габариты и масса. Т.е. основная цель интегральной электроники это повышение степени интеграции.

Вопрос состоит в том, как беспредельно это можно сделать. Это всё определяется особенностями технологии изготовления. Технологии бывают самые различные, которые обеспечивают ту или иную разрешающую способность. 15-20 лет назад была достигнута технология с разрешающей способностью 1 микрон (расстояние между элементами, затем 0.1 микрон, а на данный момент нанoeлектроника. Технологии развиваются и степень интеграции повышается, но не беспредельно. Есть некоторые физические факторы, которые ограничивают возможность дальнейшего повышения степени интеграции.

Интегральная электроника – это раздел электроники, охватывающий исследование и разработку интегральных микросхем (ИМС) и основ их правильного применения. Основной принцип интегральной электроники – технологическая интеграция элементов (статических неоднородностей) в кристалле или на подложке.

Интегральная микросхема – это совокупность взаимосвязанных элементов и компонентов, изготовленных на единой конструктивной основе (подложке) и выполняющая определенную функцию обработки информации. Подложки бывают диэлектрические, полупроводниковые, металлические. На подложке или внутри неё сформированы некоторые структуры элементов в едином технологическом цикле.

Факторы ограничивающие дальнейшее повышение степени интеграции ИМС:

1. С уменьшением геометрических размеров нарушается принцип действия самих активных элементов.
2. Тепловая совместимость. Обеспечение температурного режима элементов интегральных микросхем.
3. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости.
4. Разрешающая способность процесса литографии.

Существует фотолитография, рентгенолитография, электронная литография, ионная литография. Все ради того, чтобы получить субмикронные технологии. Выход из этой ситуации в том, чтобы пересмотреть принципы работы всех активных элементов, создать новые на базе квантовых эффектов. На данный момент это бурно развивается.

Как повысить надежность на данный момент?

Функциональная электроника – направление обеспечивающее разрешение противоречия: функциональная сложность – надежность.

Проблема состоит в том, что необходимо уменьшать объем элемента. Отсюда возникают вышеперечисленные проблемы. Проблема в необходимости формирования самого элемента. Если нет элемента, то нет проблемы. Таким образом, надо исключить элемент, который формируется внутри твердого тела, путем сложной технологии изготовления. Каким же образом в таком случае производить обработку информации.

В интегральной электронике мы имеем дело со статическими неоднородностями. Мы должны их исключить и использовать динамические неоднородности. Вопрос состоит в том какие динамические неоднородности и каким образом мы можем использовать при обработке информации.

Функциональная электроника это раздел электроники охватывающий исследование и разработку устройств на основе непосредственного использования свойств среды для обработки информации. Чаще всего волновых процессов различной физической природы: акустических волн, магнитостатических волн, тепловых волн, эффектов сверхпроводимости, электромагнитных волн, волн оптического диапазона. Функцию динамической неоднородности в данном случае выполняет та или иная волна. Основной принцип функциональной электроники физическая интеграция радиотехнических функций в одном элементе. В результате чего число элементов как параметр теряет смысл, т.к. стремится к одному элементу, следовательно, повышается надежность.

Интегральная электроника - чтобы реализовать усилитель необходимо иметь транзистор и множество резисторов. Чтобы реализовать одну функцию – усиление, необходимо технологически интегрировать несколько элементов. В функциональной в одном элементе реализуется сразу несколько функций. Количество радиотехнических функций ограничено: усиление, отрицание, задержка, вычитание, генерация, сложение -, но систем неограниченное количество. Таким образом, наша задача заключить несколько функций в одном элементе, чтобы увеличить надежность.

Примеры и направления функциональной электроники:

1. Акустоэлектроника.
2. Магнитоэлектроника.

Что нам дает переход от электромагнитных волн к акустике и к механическим колебаниям среды. Истоки акустоэлектроники возникли в момент зарождения радиотехники. Для того, чтобы осуществить генерацию сигнала необходимо обеспечить его высокую стабильность, т.е. нужна некоторая колебательная система обеспечивающая высокую температурную стабильность и временную стабильность. В качестве колебательной системы можно использовать LC-контур, но он имеет низкую собственную добротность и подвержен изменению параметров под воздействием температуры. В СВЧ диапазоне можно в качестве колебательной системы использовать волноводный резонатор и т.д.. У всего этого большие габариты. На заре зарождения радиотехники для обеспечения стабильности частоты был использован кварцевый резонатор. Резонансная частота определялась тем количеством длин волн, которые укладываются в толщину резонатора. Учитывая, что акустическая волна медленная, а длина резонатора равна  $\lambda/4$  или  $\lambda/2$ , то геометрические размеры будут очень маленькие

и составляют микроны или десятки микрон. Т.к. толщину в несколько микрон сделать практически невозможно, то обычно укладывается несколько длин волн. Этот пример является прообразом применения акустических волн, которые дают возможность существенно уменьшить геометрические размеры устройств при обработке информации, а, следовательно, обеспечивать большие задержки сигнала. Задержка – основная радиотехническая функция.

Образ образовался в момент изобретения волн Гуляева. Здесь используются объемные колебания различных типов: изгибные, по толщине, по длине, крутильные. Но нас не интересуют объемные колебания, т.к. в таком случае придется вновь прибегнуть к неоднородностям внутри твердого тела. Нам важно, чтобы волны оставались на поверхности – поверхностные акустические волны. Простой пример – волны на поверхности воды. Волны на поверхности формируются за счет пьезоэффекта – преобразование электромагнитной энергии в акустическую энергию. Для образования этого эффекта должна быть несимметричная кристаллическая структура диэлектрика. Такие диэлектрики называются – пьезоэлектрики ( кварц, ниобат лития и т.д.). На этом принципе легко реализовать задержку сигнала за счет прямого и обратного пьезоэффекта за счет низкой скорости распространения акустических волн.

Функцию задержки можно получить, если на пути распространения волны поставить несколько встречно-штыревых преобразователей. Входной встречно штыревой преобразователь преобразовывает электромагнитную волну в электроакустическую, а второй наоборот. Негативным фактором здесь будет то, что в процессе передачи теряется энергия.

Устройство интегрирует три радиотехнические функции:

1. задержка;
2. взвешивание;
3. суммирование.

Всего три функции, но этого достаточно, чтобы реализовать многие устройства: частотно избирательный фидер, оптимальная обработка ЛЧМ сигнала и т.д.. Функциональная сложность в таком случае определяется не количеством элементов, а формой металлизации. К сожалению ПАВ нельзя использовать при больших напряжениях и в широком диапазоне частот.

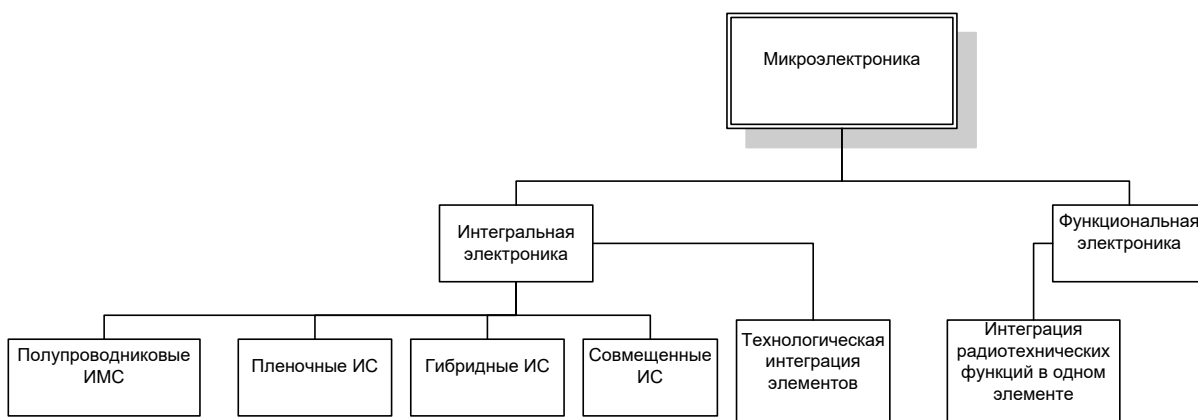
Область применения/ограничения ПАВ:

1. Диапазон рабочих частот от 10 МГц до 10(3?) ГГц.
2. По мощности 0.01 – 0.1 Вт.
3. Значительные потери в полосе пропускания, больше 1 дБ.
4. Вторичные отражения на уровне 30-40 дБ дают низкий уровень затухания в полосе заграждения

Устройства на основе таких приемников дает оптимальную обработку сигнала на рабочей частоте. Но в виду описанных ограничений стоит вопрос в возможности осуществлять обработку на более высоких частотах используя пассивные устройства.

Для того, чтобы обработку сигнала выполнять в этих диапазонах необходимо, чтобы геометрический размер был больше, дабы иметь возможность технической реализации таких элементов. Для этого нужно использовать такую волну, чтобы её длина была больше. Такие волны называются магнитоэлектрические. Эти волны не содержат электрической составляющей поля, только магнитная. Они возбуждаются в магнитоупругих средах. Данное направление называется магнитоэлектроника.

### Классификация изделий микроэлектроники



Конструктивным основанием при создании пленочных ИМС является диэлектрическая подложка. ГИС – является гибридом двух технологий, активные элементы выполняются по технологии полупроводниковых интегральных схем, а пассивные по технологии пленочных ИМС. СИС – конструктивная основа это полупроводниковая подложка, а пассивные элементы формируются на полупроводниковой подложке по тонкопленочной технологии. Выразительным примером СИС являются МИС – монолитные интегральные схемы, где в качестве подложки служит нелегированный арсенид галлия, на этой подложке выращивается эпитаксиальный слой толщиной 1 микрон и уже в этом слое формируется полевой транзистор, а остальные пассивные элементы выполняются на поверхности арсенида галлия по тонкопленочной технологии. Существуют также объемные интегральные схемы (ОИС)

Направления функциональной электроники.(следующая тема)