

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

621.396.6

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОБЪЕМНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ И КВЧ***Б.И. Гвоздев, Г.А. Кузаев, Е.И. Нефедов,
А.А. Яшин*(Московский институт электронного машиностроения, Институт радиотехники
и электроники РАН)**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Введение	129
2. Фундаментальные принципы объемных интегральных схем (ОИС) СВЧ и КВЧ ...	131
2.1. Феномен ОИС. 2.2. Определение ОИС. Общие принципы ОИС. 2.3. Линии передачи для ОИС СВЧ и КВЧ.	
3. Физическая модель структур ОИС и основы проектирования	135
4. Математическое моделирование ОИС СВЧ	140
5. Топологический подход в проектировании ОИС СВЧ	146
6. Базовые элементы, функциональные узлы, устройства обработки и информационные датчики ОИС СВЧ	149
6.1. Неоднородности. 6.2. Мостовые схемы. 6.3. Устройства обработки СВЧ сигнала. 6.4. Информационные датчики.	
7. Физико-технологические аспекты создания ОИС	156
8. Заключение	158
Список литературы	159

"Еще очень мало областей в науке, в которых мы занимаем ведущее место;... число областей, где у нас нет лидерства, сейчас увеличивается."

*П.Л. Капица***1. Введение**

Динамику временного развития микроэлектроники можно представить в виде некоторой восходящей ступенчатой кривой. Начало ее относится к периоду второй мировой войны: создание металлокерамических электронных ламп и применение печатного монтажа — для головок наведения зенитных снарядов. Первые ступеньки кривой определялись заметными открытиями в радиофизике и физике твердого тела; транзисторы и полосковые линии передачи (ЛП), далее акустоэлектронные, магнитостатические устройства и т.п. [1,3]. Последние же ступеньки связаны с новейшими достижениями технологии, например, тонко- и толсто пленочной гибридной, монокристаллической (полупроводниковой) и их разновидностей [4 — 6], а также новыми подходами к системам обработки информации [7 — 10] вплоть до нелинейных волн и со-

литонов [11, 12]. Ныне эти разнородные, казалось бы, направления объединяются в общую систему быстрой и сверхбыстрой обработки информации (ССОИ) [13— 16].

Ныне для микроэлектроники наступил звездный час (в прямом смысле этого слова), ибо освоение и использование космоса (и микрокосмоса) возможно только при существенном прогрессе науки и техники в области передачи сигналов на сверхбольшие и сверхмалые расстояния и обработки огромных потоков информации, в том числе и в реальном масштабе времени [4 — 8, 14]. Именно здесь к микроэлектронике предъявляются требования по достижению предельно возможных физических параметров: сверхширокая полоса рабочих частот при цифровой обработке сигналов, высокая несущая (тактовая) частота, многофункциональность, минимальные массы и габаритные размеры. Все эти параметры коррелируют друг с другом, но контролируются ограничительным условием максимального КПД при низком уровне энергопотребления. Кроме того, развитая элементная база современной микроэлектроники, построенная на основе гибридной и монокристаллической технологий, имеет фундаментальные ограничения, связанные не столько с физическими свойствами каждого базового элемента, сколько с природой электромагнитного поля при формировании больших систем [15], в частности, с требованием наличия конечного объема для канализации (передачи) энергии высокочастотного электромагнитного поля [16].

Возникает естественный вопрос: нельзя ли воспользоваться примером Природы в виде биологической структуры, например, головного мозга, где обработка информационного сигнала выполняется на уровне биополей? Сейчас, конечно, в полной мере нельзя, поскольку мы еще не подошли к такому уровню технологии. Но сама идея объемного формирования структур из базовых элементов, связанных слабыми электромагнитными полями, нашла свое место в высокочастотной микроэлектронике. Рассмотрим подробнее подходы к решению этой задачи с технической стороны.

Скорость обработки информационного сигнала определяется тактовой частотой, которая смещается в сверх- и крайне высокие частоты (СВЧ и КВЧ) [17]. По оценкам разных специалистов потребное на сегодня быстродействие ССОИ составляет величину порядка 10^{12} — 10^{15} бит/с. Техническая реализация устройств микроэлектроники с такими возможностями и в этих диапазонах возможна только с использованием технологии интегральных схем (ИС), в которых базовые элементы неразрывно связаны, т.е. объединением в плоскости подложки конструктивно, технологически и электрически [13, 18]. По способу объединения базовых элементов ИС подразделяются на монокристаллические и гибридные.

Интегральные схемы (ИС) генеалогически прошли путь от одномерных (конец 40-х годов) до двумерных или плоскостных интегральных технологий (начало 80-х годов). К теперешнему времени со всей очевидностью понятно, что плоскостные ИС технологически достигли фундаментальных пределов, в основном по надежности и проблемам межсоединений, а также массогабаритным параметрам [19], но самое главное — по полосе рабочих частот, которая в принципе определяет скорость обработки информации [1, 2]. Решение этой проблемы в последние десятилетия достигалось многослойными, многоэтажными, гибридными и другими конструктивно-технологическими решениями в виде БИС и СБИС [4, 6]. Перенос идей и принципов низкочастотной микроэлектроники в СВЧ диапазон привнес незначительное расширение полосы рабочих частот и улучшение массогабаритных показателей, что поставило разработчиков в растерянность, а исследователей привело к необходимости поиска принципиально новых решений.

Открытие и детальное математическое моделирование большого ассортимента новых типов СВЧ ЛП: щелевые, копланарные, реберно-диэлектрические, диэлектрические, полупроводниковые [13, 20 — 25], линий с акусти-

ческой и магнитостатической волнами [24] и разработки монолитной технологии с низкочастотной стороны [19] позволили нетрадиционно взглянуть на проектирование устройств СВЧ микроэлектроники. Историческое развитие ИС СВЧ и сама природа формирования информационных биологических систем подсказывает оптимальный вариант — использование третьей координаты в топологии ИС СВЧ [13 — 17, 26], т.е. переход к ОИС СВЧ и КВЧ [17, 27, 28].

Возникает вопрос: логичен ли этот переход? Электромагнитные поля по своей сущности являются трехмерными. Искусственное сведение их к двумерным структурам диктуется необходимостью упрощения математических моделей для возможности решения соответствующих краевых задач на ЭВМ [29 — 36]. В плоскостных ИС над двумерной ИС располагаются экраны для исключения излучения во внешнее пространство и во избежание паразитных влияний из него. Реализация избирательных свойств достигается также сочетанием плоскостной ИС с металлическими экранами, расположенными в вертикальной и (или) горизонтальной плоскостях. Таким образом даже в плоскостных ИС подспудно третья координата выполняет свои (полезные) функции. Именно поэтому переход к ОИС является логичным, что подтверждается, в частности, и исследованиями биологических структур, где полностью отсутствует понятие плоскостного распределения функциональных узлов [37]. Следовательно, ОИС позволяет производить обработку сигнала не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскостях. Как будет показано ниже, это обеспечивает уменьшение массы и габаритных размеров на один-два порядка и ведет к значительному увеличению рабочих частот и быстродействию обработки сигнала. Переходя к следующему разделу, отметим, что если не оговорено особо, мы под ОИС будем понимать ОИС СВЧ и КВЧ.

2. Фундаментальные принципы объемных интегральных схем (ОИС) СВЧ и КВЧ

2.1. Феномен ОИС. Выше мы уже отметили логичность и непротиворечивость перехода ССОИ, функционирующих на СВЧ и КВЧ, а в недалеком будущем — и к оптическому диапазону. Вместе с тем, ОИС СВЧ (КВЧ) являются альтернативой огромному научно-техническому направлению БИС и СБИС, функционирующих на постоянном токе или низких частотах и имеющими в подавляющем числе случаев планарную конструкцию [4, 6]. В деле освоения БИС и СБИС отечественная наука и техника существенно, к сожалению, отстала от уровня передовых западных стран и необходимы идеи и методы, которые позволили бы это отставание, если и не ликвидировать, то уже во всяком случае резко сократить. Это тем более важно еще и потому, что разработанные и освоенные к настоящему времени БИС и СБИС (на низких частотах и плоскостном (планарном) монтаже) практически исчерпали свои возможности, подошли к своему фундаментальному пределу [15, 19]. Большими функциональными возможностями обладают ССОИ лито на основе ОИС, либо СБИС с резким увеличением тактовой частоты, что в конечном итоге ведет к использованию сверхширокополосных сигналов, т.е. по существу к диапазону КВЧ, а в дальнейшем и к оптическому диапазону. Таким образом, природа проявляет диалектическое единство противоположных, подходов к проблеме построения ССОИ.

Отметим и еще одну поучительную, на наш взгляд, аналогию. В самом деле, переход к построению ССОИ СВЧ и КВЧ на ОИС феноменологически сходен с известным переводом радиотехнических ССОИ с аналоговых на цифровые сигналы и схемы, на которых удается получить новые качественные результаты на "старой" элементной базе, разработанной для аналоговых систем. Аналогично и переход к ССОИ на ОИС в существенном опирается на широкое использование уже имеющейся технологии плоскостных (планар-

ных) ИС, а также элементной базы, освоенных промышленностью. Таким образом, переход ССОИ на ОИС СВЧ и КВЧ представляется и естественным и исторически обусловленным.

2.2. Определение ОИС. Общие принципы ОИС. Под ОИС СВЧ и (или) КВЧ структурой принято понимать многослойный (многоэтажный) модуль, каждый из этажей которого выполнен по плоскостной технологии, связь между базовыми элементами (БЭ) в пределах каждого этажа, как правило, гальваническая, а между БЭ, расположенными на разных этажах, электромагнитная. БЭ ОИС выполнены в разнотипных линиях передачи.

Это определение в значительной мере отражает уровень современной технологии ИС, по мере ее развития и совершенствования ОИС КВЧ будут выполняться в рамках единого технологического цикла, подобно тому, как реализуются БИС и СБИС, функционирующие на относительно низких (тактовых) частотах. Следует иметь в виду, что развитие методов вертикально-инжекционной логики и трековых методов имплантации проводящих каналов в толщу металлодиэлектрического заполнения этажа ОИС позволит существенно расширить возможности создания технологии общего цикла реализации ОИС (ср. [4, 39, 40]). Эти же технологиям позволяют в значительной мере сочетать идеи ОИС и волноводной техники СВЧ, чрезвычайная развитость элементной базы которой во многом будут способствовать реализации ОИС. С другой стороны, создание вертикальных каналов позволит реализовать сверхширокополосные элементы (межэтажные переходы, фильтры, резонаторы, делители (сумматоры) мощности или каналов и многое другое), в коих столь нуждается техника ССОИ, ориентированная на высокое быстродействие. Аналогичные проблемы возникают и при реализации ССОИ на основе монолитной (в том числе и субмикронной, и далекой (особенно от нас) наномикронной) и полупроводниковой технологий. И дело не только, а возможно, и не столько в реализации каналов связи между БЭ, что чрезвычайно важно ("проблема проводников"), но и в создании избирательных (резонансных, полосковых и т.п.) структур, излучающих систем и многое другое.

Теперь несколько слов об общих принципах ОИС. Создатели ОИС придают им особое значение, ибо только осмыслив общие концепции того или иного раздела науки и техники, можно с успехом двигаться дальше. Итак, ОИС основаны на двух фундаментальных принципах: *принципе оптимальности БЭ и принципе конструкционного соответствия* [13]. Идеологическую основу ОИС составляет принцип: *конструкционного соответствия*, согласно которому ОИС есть такой метод (подход, способ, конструкция построения СВЧ и КВЧ модуля ССОИ), когда в модуль могут быть (логически, конструктивно, технологически) включены БЭ не только созданные специально для ОИС, но и традиционно используемые в плоскостных ИС, "стандартной" СВЧ технике, устройствах квазиоптики, оптике, акустоэлектронике, БЭ на магнитостатических волнах и многие другие элементы. Таким образом, существенным отличием и преимуществом ОИС перед другими конструкциями СВЧ модулей ССОИ является возможность использования в нем практически всего огромного арсенала как уже известных БЭ и функциональных узлов, так и того, что будет создано в процессе развития микроэлектроники и смежных областей науки и техники. В равной мере, подчеркнем, это относится и к технике, и к технологии. Возможно, в большей мере это касается технологии, в которой мы наиболее серьезно отстаем от зарубежных конкурентов и которые, похоже, ни под каким соусом с нами этими достижениями "делиться" не собираются. Поэтому-то и важно иметь идеологию и технику такие, которые воспринимали бы любые технологии и позволяли бы на них

реализовать ССОИ, близкие по качествам к своим фундаментальным пределам [39, 40].

Отметим, что принцип конструкционного соответствия по своему смыслу и, возможно, значению, близок к широко известному в физике принципу соответствия (Н. Бор), согласно которому любая новая физическая теория должна включать в себя предыдущие теории и результаты в виде неких частных случаев.

Другим фундаментальным принципом ОИС является *принцип оптимальности БЭ*. Дело в том, что уже к моменту "рождения" ОИС в технике СВЧ, КВЧ, квазиоптике и оптике было предложено, разработано и применялось большое число различных типов ЛП. Стало очевидно, что необходим некий новый общий подход к конструированию СВЧ модуля с тем, чтобы оптимальным образом использовать в нем преимущества БЭ, выполненных на различных типах ЛП. Родилось требование: "каждому БЭ — оптимальную для него ЛП", что и составило в итоге существо принципа оптимальности БЭ. При этом, верно, остается открытым вопрос о реализации переходов между соседними БЭ, выполненными на различных типах ЛП. Известно, что такие переходы являются одними из наиболее сложных и громоздких устройств техники СВЧ. Естественным, что создание ССОИ в плоскостном варианте является утопией и сказано это не красного словца ради. В самом деле утопия плоскостных ИС, БЭ которых построены на разных типах ЛП, легко усматриваются в двух, по крайней мере, обстоятельствах. Во-первых, невозможно выполнить огромное число переходов между полосково-щелевыми линиями, оставаясь в рамках концепции плоскостной ИС. Этот факт является очевидным и подтверждается всей историей создания традиционной волноводной техники. Отсюда непосредственно следует и второе решающее обстоятельство — плоскостная ИС требует перехода к объемности конструкции и весь вопрос в том, можно ли такой переход сделать естественным. Идея ОИС как раз и является таким конструктивным предложением.

И последнее замечание. Завершая настоящий пункт, подчеркнем еще раз, что идея ОИС пригодна для любой (существующей и тем более будущей) технологии. Разумеется, гибридная интегральная технология ОИС не является естественной в силу навесного монтажа активных, нелинейных и других приборов, при этом варианте приходится устраивать навесные панели или отводить для них более высокие "потолки" в специальных этажах ОИС и т.д. Повсеместное освоение и использование, например, монолитных полупроводниковых ИС откроет перед ССОИ на ОИС огромные перспективы для уменьшений массогабаритных параметров, увеличения быстродействия повышения надежности и т.п. Особенно наглядно это видно на упоминавшихся выше примерах БИС и СБИС [41]. И наконец, трудно не согласиться с утверждением, что "дальнейшее" повышение степени интеграции микроэлектронных устройств СВЧ возможно при переходе от плоскостных к ОИС СВЧ, в которых базовые элементы размещены между слоями диэлектрических и магнетодиэлектрических подложек. На основе ОИС могут быть созданы, в частности, диаграммообразующие матрицы антенн СВЧ, а также аналоговые и цифровые ССОИ [38].

2.3. Линии передачи для ОИС СВЧ и КВЧ. Высказанные общие соображения об ОИС свидетельствуют, что в ОИС используется большое число различных типов ЛП. Из них только канонических типов насчитывается порядка 100, а с учетом их модификаций — по крайней мере на порядок больше [13, 36]. Более того, само возникновение ОИС в значительной степени обязано наличию большого разнообразия типов в ЛП, ибо необходима была

"удобная" общая идея конструкции СВЧ модуля, способная вместить в себя БЭ на различных типах ЛП без присутствия специальных переходных устройств [1].

Здесь мы остановимся, естественно, только на ограниченном числе типов ЛП. Некоторые примеры ЛП, используемых в ОИС, показаны, например, на рис. 1. В ОИС применяются также структуры с анизотропным заполнением этажа ОИС или сечения ЛП [31], диэлектрические и периодические ЛП в [30, 36, 42] и многое другое. Мы рассмотрим, во-первых, наиболее часто используемые в ОИС ЛП и, во-вторых, оригинальные и перспективные ЛП [1]. Из волноводной техники СВЧ, например, видно сколь сложным в реализации непременно объемной! являются переходы между волноводами разных типов [42—45].

Одним из основных параметров регулярной ЛП (и БЭ на ее основе) яв-

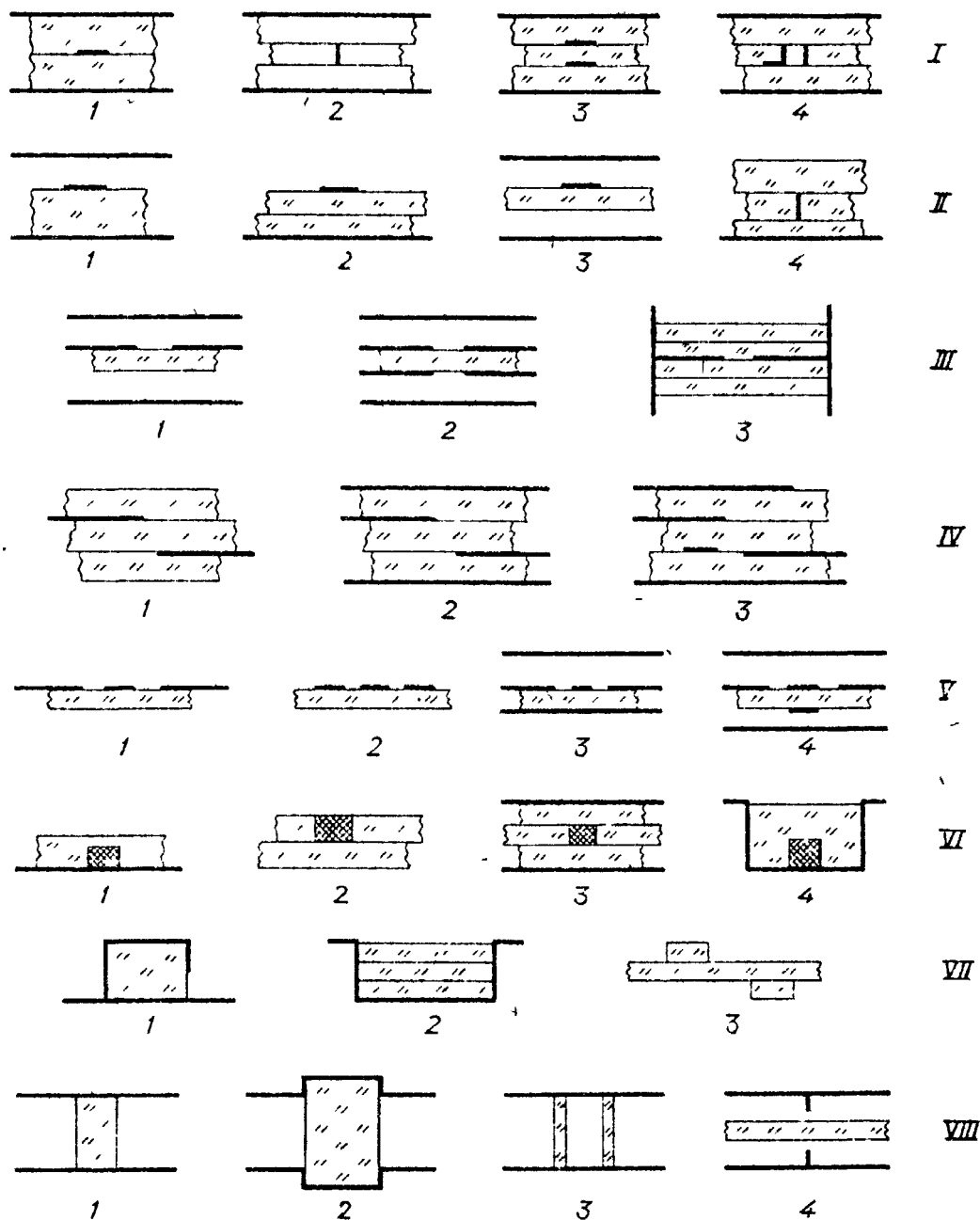


Рис. 1 Основные классы линий передачи, используемые в ОИС СВЧ и КВЧ

ляется величина погонных потерь, которая складывается (в подавляющем числе случаев аддитивно) из потерь на нагревание (металла и диэлектрика) и излучение. В БЭ, являющихся соединениями регулярных и нерегулярных участков базовых ЛП, к этим потерям добавляются потери на преобразование в вытекающие волны, потери за счет несанкционированных связей между БЭ (одного или разных этажей ОИС) на основной или паразитных волнах и т.п. Сравнительные оценки потерь разных типов ЛП приведены в [48].

Данные по потерям в различных ЛП дают богатую пищу для размышлений. Они существенно зависят от картины электрического поля в поперечном сечении ЛП. К сожалению, плохо изучены свойства по потерям одной из основных и естественных для ОИС СВЧ линий — *несимметричной щелевой линии* (НЩЛ). Хотя она достаточно хорошо изучена и теоретически и экспериментально (см., например, [13, 46, 47, 69, 70] и тем не менее проблема достаточно корректного учета потерь в НЩЛ остается. По приближенным оценкам потери в НЩЛ слегка превышают потери в симметричной ЩЛ (СЩЛ). В равной, а может быть и большей степени это относится к системам связанных НЩЛ, на основе которых строятся основные классы БЭ ОИС СВЧ [13, 42, 43, 45 — 47].

Достаточно долго считалось, что наиболее удобным типом ЛП для КВЧ диапазона является изолированный прямоугольный диэлектрический волновод (ДВ). Однако уже при реализации самых простых устройств, к примеру, направленного ответвителя на двух связанных ДВ выяснилось, что к влиянию, например, механических нагрузок такая структура весьма чувствительна, требует систем фиксации положения обоих ДВ и т.п. Родилась идея зеркального ДВ, имеющего металлическое или более сложное, например, многослойное основание; позднее стали использоваться двухсторонние структуры: "зеркальные" ДВ на различных металлических или диэлектрических подложках [13 — 23, 42 — 54].

ОИС КВЧ в основном реализуются на основе одной из двух базовых моделей — экранированной и неэкранированной (рис. 2). Разумеется, возможен и комбинированный вариант ОИС, в котором между некоторыми этажами ОИС имеется металлический экран (рис. 2,б), а между другими (рис. 2,а) его нет. В неэкранированном варианте ОИС модуля для организации электромагнитной и, возможно, гальванической связи (например, с помощью РДЛ [21, 23, 36, 42, 55, 56]) между БЭ, расположенными на разных этажах в определенных местах межэтажных экранов, устраиваются окна или системы окон (отверстий). С их помощью реализуется необходимая степень связи между БЭ. При этом обычно такой межэтажный переход выполняет и некоторые дополнительные функции, например, полосового и(или) поляризационного фильтра, ответвителя и т.п. В неэкранированной схеме ОИС КВЧ поддерживающие поверхностную волну слои магнетодиэлектрика обеспечивают достаточно малую протяженность поля по вертикальной координате и, как следствие, отсутствие несанкционированной связи между этажами. Весь-

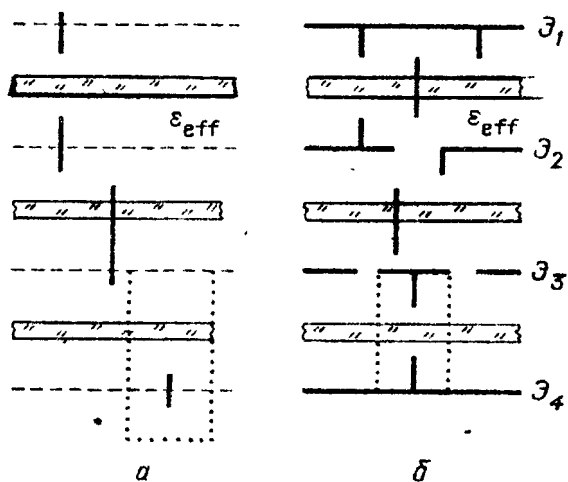


Рис. 2. Конструктивное воплощение двух основных концепций построения СВЧ и КВЧ модулей на ОИС. а — Межэтажные экраны отсутствуют. б — Межэтажные экраны присутствуют

ма условно можно экранированный вариант ОИС отнести к сантиметровому и миллиметровому, а неэкранированный — к субмиллиметровому диапазонам. Поддерживающие волну слои могут чередоваться со слоями с существенно меньшими проницаемостями. Такая конструкция придает ОИС структуре дополнительную жесткость (разумеется, за счет некоторого увеличения диэлектрических потерь).

ОИС структуры КВЧ могут быть построены на основе зеркального ДВ (с конечными поперечными размерами), однако с общих конструктивно-технологических позиций предпочтительными оказываются схемы, которые формируются на некотором едином (металлическом, диэлектрическом или "импедансном") основании (рис. 3,а). Другое дело, что в такую конструкцию могут быть (в духе принципа конструкционного соответствия) включены иные "надстройки" типа конечных магнитодиэлектрических или импедансных накладок, ведущих металлических сплошных или "решетчатых" образований и т.п. Вообще нужно отметить, что периодические (импедансные) и анизотропные структуры приобретают все большее значение в ОИС КВЧ [13, 31, 34, 36, 48, 53, 54]. С их помощью реализуются волноведущие структуры, излучающие элементы (с необходимой объемной схемой обеспечения), межэтажные переходы с функциями полосовых и (или) поляризационных фильтров и т.п., примеры периодических структур СВЧ и КВЧ приведены в [53]. Простейшей, очевидно, является периодическая решетка конечной ширины на магнитодиэлектрическом слое, на обратной стороне которого непосредственно или на некотором расстоянии от него может быть расположен металлический или импедансный экран. Решетка может быть двойной, т.е. располагаться на обеих сторонах слоя. Возможны комбинированные структуры, используя периодические структуры типа обобщенной копланарной линии.

Проведенный обзор ни в коей мере не является полным. Для краткого изложения известных результатов по ЛП для ОИС СВЧ и КВЧ необходима книга и мы отсылаем читателя к списку литературы.

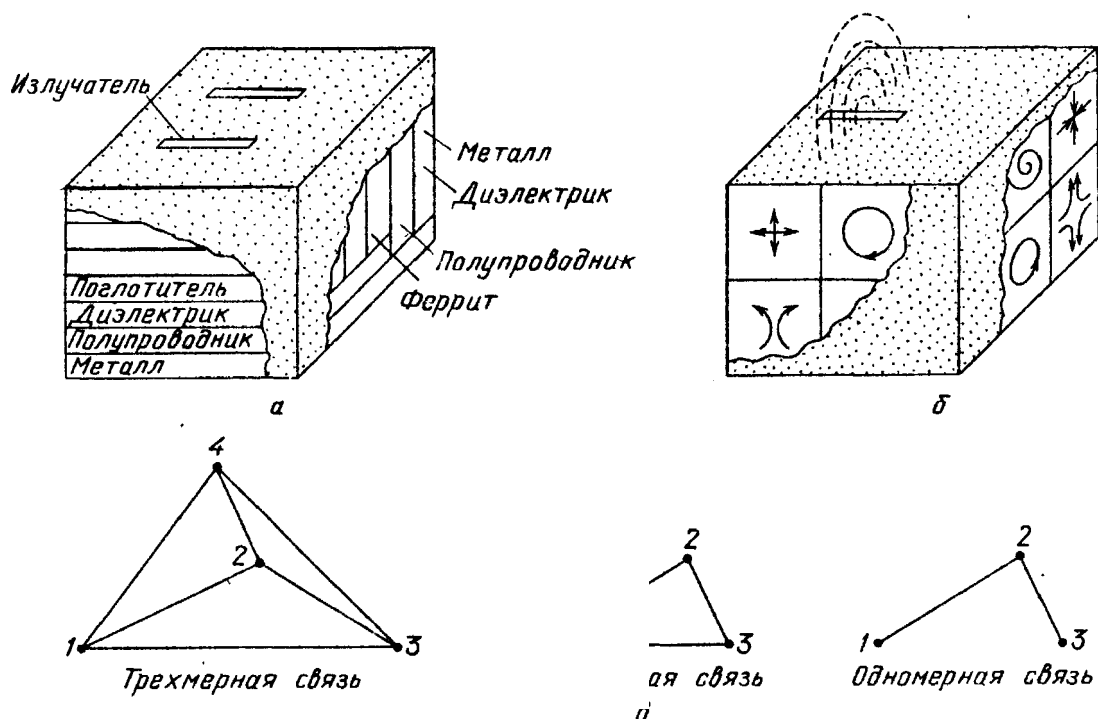


Рис. 3. Объемная интегральная схема СВЧ. а — Расположение слоев. б — Ключевые структуры полей. в — Виды связей между базовыми элементами

3. Физическая модель структур ОИС и основы проектирования

Радиотехнический комплекс содержит, как правило, источники питания, включая вторичные источники, низкочастотную (цифровую) и высокочастотную цифровую и аналоговую части, а также внешние исполнительные устройства, включая излучатели, которые выполняются в виде отдельных функциональных модулей [36, 38, 42, 53]. При переходе к трехмерной структуре осуществляется конструктивное объединение этих моделей, причем мы не должны терять их заданные функциональные свойства и связи между ними. Таким образом, это объединение должно выполняться по определенным законам моделирования и принципам проектирования многофункциональных ОИС [13, 40]. Но прежде чем перейти к их рассмотрению, необходимо разобраться в физической модели ОИС СВЧ.

В данном обзоре мы основное внимание уделим рассмотрению топологического подхода к ОИС. Этот подход является относительно новым и в общей электродинамике, а тем более в проектировании ИС и ОИС не используется каждый день. Вместе с тем он позволяет находить не только структуру поля, но зачастую показывает конструкцию БЭ. Разумеется, определение матрицы рассеяния БЭ и их композиции потребует использования и "традиционной" электродинамики СВЧ—КВЧ структур (см., например, [13, 35, 42 — 55]). Обзор этих подходов содержится в лекциях [54]. Отметим только, что во главу угла ставятся, во-первых, "стандартная" процедура: система интегральных уравнений — метод Бубнова—Галеркина—система линейных алгебраических уравнений с ее последующей редукцией. Во-вторых, это весь комплекс наработанных приемов, начиная от эвристических подходов до строгих численных, численно-аналитических и аналитических методов. Их число огромно, но основные, по-видимому, все же содержатся в [13, 25, 29 — 36, 42 — 57] и в сносках в них.

Нам бы хотелось только подчеркнуть одну мысль, которая, возможно и покажется тривиальной, но по многолетнему опыту работы мы знаем, что ни один из упомянутых методов и подходов не сработает до тех пор, пока не будет понята физика работы ЛП, БЭ и т.д. Когда такая ясность физики достигнута, можно приступать к проектированию. И на этом пути топологический подход может быть весьма полезным.

Другую часть составляют волноведущие ЛП, токнесущие проводники которых расположены между слоями активных и пассивных включений ОИС СВЧ. В зависимости от физических свойств БЭ и топологии проводников ОИС формируется сложная структура электромагнитного поля, сводящаяся к совокупности сепаратрис силовых линий, узлов, центров и седел (см. рис. 3,б). Простейшие комбинации из них присущи полям волноводным, коаксиальным, диэлектрическим, симметричным и несимметричным полосковым (СПЛ и НПЛ)), а также щелевым (СЩЛ и НЩЛ) ЛП. Последние особенно хорошо зарекомендовали себя в плоскостных ИС СВЧ [29, 45, 53, 54]. Однако в ОИС их функциональных возможностей недостаточно, что и стимулировало исследование и применение реберно-щелевых ЛП и представителей нового класса базовых элементов с трехмерной топологией [20 — 23, 26, 40, 46, 58]. С ними хорошо согласуются все перечисленные выше ЛП, включая и ЛП на поверхностных акустических и магнитостатических волнах.

Наконец, последней ключевой позицией в определении ОИС является трехмерная связь по полю между БЭ, которая, помимо основной роли, несет дополнительную функциональную нагрузку. Например, осуществляется связь с уменьшением амплитуды поля — свойство аттенюатора, сдвигом фазы — свойство фазовращателя, изменением фазы и амплитуды одновременно — свойство направленного ответвителя, фильтра и т.п.

Таким образом, можно выделить статический вид связи, в котором при переносе электромагнитной энергии по координате r в вертикальную плоскость, параметры сигнала—фаза v , частота f и амплитуда H_0 — остаются постоянными величинами: $dv/dr = df/dr = dH_0/dr = 0$ и функциональный вид связи, где любой из параметров сигнала либо их комбинации меняются при пространственном переходе из одной точки в другую, имеет вид: $dF(v, f, H_0)/dr \neq 0$.

Направленное распределение связей можно представить в виде ориентированного графа между БЭ (см. рис. 3,б). Простейшей фигурой его является тетраэдр — симплекс сложной трехмерной связи. В вершинах расположены БЭ, а ребра составлены из векторов связи. Тетраэдр связи может быть выполнен и в плоскостных схемах, что сопряжено с проблемами реализации пересечений проводников. Поэтому симплекс плоскостных схем — треугольник или отрезок (см. рис. 3,б), а в ОИС — естественен тетраэдр.

Введение трехмерных функциональных связей между БЭ приводит к унификации функциональных узлов ОИС и значительно расширяет границы использования системного радиотехнического подхода. Таким образом рождается новое понятие — архитектура ОИС, как наука о взаимодействии электромагнитных связей и их количественных соотношений между базовыми элементами объемной конструктивной системы [16]. По своей электромагнитной природе санкционированную роль связи в ОИС могут выполнять основные волны и волны высшего типа, волны поверхностного и объемного типов, а также акустические и магнитостатические волны, т.е. даже те волны, которые в плоскостных ИС СВЧ являлись не санкционированными (паразитными).

Произведенный анализ определения ОИС позволяет перейти к рассмотрению вопросов проектирования, которые предполагают на первом этапе сопоставление заданным характеристикам определенной структуры связи между БЭ. Выбор их предполагает глубокое знание и умение решать сложнейшие трехмерные задачи анализа и синтеза. Многогранность последней проблемы делает актуальным привлечение не только сверхбыстродействующих ЭВМ, но и разработку основополагающих принципов проектирования ОИС с учетом технологических факторов.

Сделаем еще несколько замечаний об основных принципах ОИС: принципе конструкционного соответствия и принципе оптимальности БЭ. Подтверждение о высокоразвитой структуре ОИС с точки зрения принципа конструкционного соответствия прослеживается на рис. 4, где выделены основные достижения существующих схем в ОИС: технология, элементная база, связи между БЭ и т.п.

Оптимальность построения ОИС предполагает использование комбинации типов ЛП в одном БЭ или в их связке. При этом в ЛП существенно различаются структуры полей. Одновременно в конструкции участвуют активные элементы (АЭ), имеющие отличие не только по конструктивным признакам [59, 60], но и поляризациям полей на входах и выходах. Возникает типичная ситуация в необходимости объединения двух или нескольких ЛП с различными топологиями полей рабочих волн, требующих наличия соответствующих БЭ согласования, которые сужают, как правило, полосы частот и увеличивают массогабаритные параметры. Этого можно избежать, если ЛП и (или) БЭ расположить в пространстве ОИС таким образом, чтобы в плоскости соединения совпадали картины электрического и магнитного полей. Оптимальным, например, будет ортогональное расположение в слоях диэлектрика ЩЛ и ПЛ со связью по магнитному полю либо соосное расположение ЩЛ и копланарной линий (КЛ) со связью по электрическому полю.

Несколько сложнее обстоит дело с АЭ, ибо выбор их ограничен, а требования по согласованию очень высоки. Введение БЭ согласования приводит

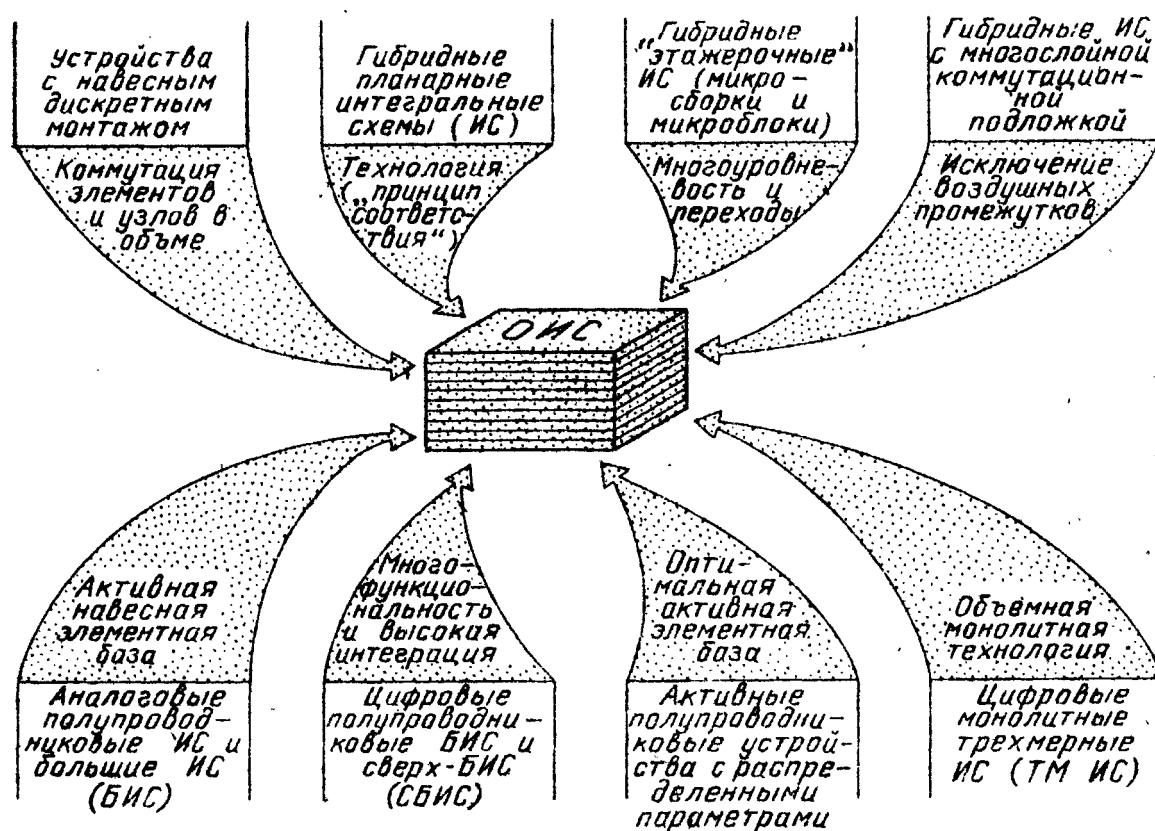


Рис. 4. Схема включения промышленно развитых технологических и конструктивных решений в ОИС СВЧ

к отмеченным выше недостаткам и зачастую заметно снижает функциональные возможности активного элемента. Выходом из создавшейся ситуации является подбор оптимального типа ЛП для АЭ, поляризация электрических полей которых совпадает в плоскости сочленения. В этом разговоре под БЭ подразумеваются активные и пассивные элементы: диоды и транзисторы, резисторы и емкости, индуктивности и отрезки ЛП и т.п. Например, для последовательного включения диода требуется ПЛ, для параллельного — ШЛ, для транзистора — КЛ, и т.д.

Разумеется, принцип оптимальности БЭ теряет силу как средство формализации проектирования при переходе от ОИС к плоскостным ИС, поскольку они реализуются, как правило, на одном (базовом) типе ЛП.

Трехмерность структуры модуля на ОИС и ее отдельных функциональных узлов стимулирует разработчика на самое широкое использование критериев целесообразности и красоты, приближая тем самым процедуру компоновки к процессу разумного архитектурного ансамбля из БЭ [13, 30, 31, 34, 60]. В этом отношении принято считать, что проектирование ОИС является искусством в гораздо большей степени, нежели проектирование плоскостных ИС [13, 40].

4. Математическое моделирование ОИС СВЧ

Развивая несколько общие принципы подхода к проблемам моделирования ОИС, на которых мы задержали внимание читателя в предыдущем разделе, отметим все же некоторые подробности этого процесса. Прежде всего целью моделирования ОИС является исследование электродинамических характеристик по заданной внутренней структуре физической модели. Основ-

ным ее параметром принято считать полную матрицу рассеяния S , имеющую смысл отношений мощности сигнала, падающего к мощностям прошедшего или отраженного. Матрица рассеяния дает полную информацию о физике работы БЭ или в целом прибора. Однако, в связи с усложнением внутренней структуры ОИС и опосредованным характером сведений, заключающихся в S -матрице, в последнее время на первый план стали выступать геометрические характеристики электромагнитного поля, отличающиеся своего рода физико-математической "наглядностью" [20, 25, 71, 72].

Разработка определенного математического формализма по описанию структуры электромагнитного поля дает в руки исследователя мощный аппарат для выяснения физики работы БЭ ОИС.

Задачам моделирования ОИС присущи многие проблемы, характерные и для планарной микроэлектроники СВЧ, но только "отягощенные злом" большей размерности задачи. Сложности решения их, формально связанные с трехмерностью области определения систем уравнений в частных производных, требуют не только использования современных высокопроизводительных ЭВМ, но и хорошего "физического" аппарата и интуиции исследователя и разработчика.

В решении этих проблем можно условно выделить два подхода. Первый из них имеет дело с точной формулировкой задачи, например, уравнениями Максвелла или их аналогами в интегральной форме, либо, наконец, записью уравнений Максвелла в нетрадиционном для электродинамики виде дифференциальных форм (внешней алгебры [61]). Затем в процессе решения точный оператор может быть заменен приближенным, но асимптотически близким к исходному. Типичными примерами могут служить методы Галеркина для интегральных уравнений, сингулярных интегральных уравнений, конечных элементов и разностей, малых автономных блоков и т.п. [29 — 35, 61 — 67].

Использование приближенных методов для решения задач электродинамики ОИС, несмотря на формально точный исходный аппарат, требует использования целой системы физических критериев для отсева возможных ложных решений, порождаемых аппроксимацией оператора, или решения задачи. Имеются различные алгоритмы этого плана: от введения в алгоритм специальных слагаемых, компенсирующих, например, дискретную природу аппроксимации, до контроля картин силовых линий получаемых решений для собственных волн.

Для создания конкретного образа математической модели ОИС приведем один из алгоритмов этого плана [13, 46, 47, 68 — 70].

Сложная многоуровневая ЛП для ОИС разбивается на ряд элементарных слоев, границы которых естественным образом совпадают с поверхностями раздела диэлектриков и металлических проводников (см. рис. 3,а). В каждой из областей записываются ряды Фурье для продольных компонент электрического E_z и магнитного H_z полей

$$E_z^{(i)} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n^{(i)} v_n^{(i)}(x, y) e^{-jk_z z}, \quad (1)$$

$$H_z^{(i)} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n^{(i)} u_n^{(i)}(x, y) e^{-jk_z z}. \quad (2)$$

В (1), (2) через A_n , B_n обозначены неизвестные коэффициенты, k_z — продольное волновое число, v_n и u_n — ортонормированные функции, удовлетворяющие граничным условиям всюду, за исключением поверхностей выделен-

ных i -ых слоев, на которых задают поверхностные электрические поля $e_i^{(i,i+1)}$ и $e_i^{(i,i-1)}$. Далее, используя ортогональность функций $v_n^{(i)}$ и $u_n^{(i)}$, коэффициенты $A_n^{(i)}$ и $B_n^{(i)}$ выражают через фурье-коэффициенты тангенциальных полей $e_i^{(i,i+1)}$ и $e_i^{(i,i-1)}$. Вновь полученные формулы для полей типа (1), (2) согласованы в смысле непрерывности тангенциальных электрических полей, но имеют разрыв своих магнитных полей даже в отсутствие электрических проводников. Формально требуя отсутствия этого разрыва в значениях тангенциальных магнитных полей на щелях, получим интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода

$$\sum_{n=0}^{\infty} \int_S e_i(x') \hat{g}(x, x') dx' = i(x). \quad (3)$$

В (3) $\hat{g}(x, x')$ — тензор Грина, $i(x)$ — электрический ток, равный нулю вне проводников. Отметим, что (3) является точной моделью направляющей структуры ОИС, если $e_i(x')$ принадлежат к множеству полей собственных волн. Практически же строится приближенное распределение полей в виде конечной суммы базисных функций и неизвестных коэффициентов при них:

$$e_i = \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^M a_{mi} e_{mi} x_i, \quad (4)$$

где k и m — номера орт в евклидовом и функциональном пространствах соответственно.

Применяя метод Галеркина к (3), подставим выражение (4) и потребуем минимума невязки интегрального уравнения ортогонализацией его системе базисных функций из (4). Полученная система линейных алгебраических уравнений имеет смысл лишь при равенстве нулю ее определителя. Последнее соотношение и будет дисперсионным уравнением относительно искомого продольного волнового числа k_z . Следует отметить, что несмотря на внешнюю жесткость алгоритма, имеется большое разнообразие в способах его реализации, особенно, в плане выбора типов базисных функций. Не приводя фантастически обширной библиографии на эту тему, можно рекомендовать кусочно-определенные базисные функции, хотя бы из соображений большей их гибкости в практическом плане, хорошей сходимости для ряда конфигураций направляющих структур. Примеры применения их содержатся в [13, 46, 47, 68 — 70]; там же дана электродинамическая теория собственных волн экранированной НЩЛ и ее модификаций.

Изучение системы собственных волн является необходимой, но далеко не достаточной задачей моделирования ОИС. Следующий этап заключается в разработке моделей неоднородностей в ЛП [29, 30, 35]. Один из методов расчета S -матриц этих БЭ ОИС заключается в разложении поля слева и справа от неоднородности типа скачка геометрии проводников в ряд по собственным волнам, приравнивании тангенциальных полей в плоскости скачка и минимизации невязки этой разности методом Галеркина [35, 36, 38, 47]. К числу недостатков следует отнести медленную сходимость алгоритма, зачастую дающего ложные решения. В последнее время моделирование ряда неоднородностей типа открытого конца микрополосковой линии производится с помощью двумерных интегральных уравнений, позволяющих учесть особенности токов на ребрах проводников сложной конфигурации [72, 73]. Заметим, что учет сложной конфигурации особенно эффективен при сочетании строгих электродинамических методов с конформными преобразованиями [36, 40, 42 — 44].

Несомненно, электродинамические модели и сведения, полученные с их помощью, определяют многое в качестве конструктивного решения ОИС, однако громоздкость вычислений, отсутствие наглядности настораживают многих разработчиков. Вот почему, несмотря на очевидный успех техники и методов вычислений, в радиофизике СВЧ и по настоящее время наиболее популярны подходы, условно названные как методы подобия или аналогий. Первые попытки в этом плане следует отнести еще к XIX в; они связаны с именами основоположников теории электромагнетизма М. Фарадеем и Дж. Максвеллом. Последнему принадлежит и наиболее ясное определение метода аналогий: "подобие, которое является основой аналогии, существует не между самими явлениями, но между математическими соотношениями, описывающими эти явления" ([44], с. 263). Отметим, что в рассуждениях Максвелла немало важную роль сыграли аналогии картин силовых линий с линиями тока движущей жидкости.

Плодотворность метода подобия, таким образом, "освящена" классиками электромагнетизма. Коротко сущность его можно выразить как замену оператора задачи Φ на близкий ему F и дающий решения x_F в определенной области изменения параметров, так что $x_F \sim x_\Phi$. Причем близость операторов Φ и F понимается именно в смысле $|x_F - x_\Phi| \ll 1$. На практике при построении модели объекта применяется иногда целая серия подобий. Типичный пример — квазистатические модели ОИС. В них, во-первых, пренебрегается гибридным характером поля (e, h) реальной волноведущей структуры и сопоставляется плоское поле $(E^{\sim}, H^{\sim})$. Во-вторых, гармонически изменяющееся поле идентифицируется с полем постоянным (E^-, H^-) , токи которого, однако, текут только лишь на поверхностях проводников. Наконец, проводят аналогию между статическими токами и зарядами на проводниках ($i \rightarrow q$), что позволяет применить к исследованию ряда БЭ методы конформных преобразований и теории цепей [23 — 26, 29, 30, 33, 36, 40, 44].

Итак, диаграмма подобий между краевыми задачами для уравнений Гельмгольца и Лапласа (Пуассона) выглядит следующим образом:

$$(e^{\sim}, h^{\sim}) \rightarrow (E^{\sim}, H^{\sim}) \rightarrow (E^-, H^-), \quad (5)$$

$i \rightarrow q$

$$\nabla^2 + k^2 \rightarrow \nabla^2.$$

Возникает вопрос о соответствии таких моделей своим объектам — трехмерным ОИС. Ответ на него даст лишь сравнение с точными теоретическими или достоверными экспериментальными результатами.

Широко применяющейся разновидностью метода подобия является метод Олинера, разработанный в начале 50-х годов для расчета параметров БЭ на полосковых ЛП. Сущность его заключается в замене открытой ЛП эквивалентным прямоугольным волноводом, теория которого развита была в аналитическом виде. Здесь имеет место замена одних краевых условий другими при "аккуратности" задания оператора уравнений Максвелла. Для того чтобы модель Олинера соответствовала физической модели, на нее накладывают ряд условий из физических соображений: равенство волновых сопротивлений для объекта и модели, сосредоточение передаваемой мощности в сечении, ограниченном "магнитными" стенками, заполнение объема эффективной средой так, что $e_r \rightarrow e_{\text{eff}}$. Разработанный в этом плане алгоритм получил название обобщенного метода Олинера [29, 30]. Существенным моментом при этом оказывается, что результатом строгого решения ключевой задачи о падении волны на край полубесконечной структуры является точное знание необходимого метода расположения "магнитной" стенки [30]. Таким образом, допущение одноволнового режима работы в исследуемой ЛП позволяет свести трехмерный анализ к двумерному. Рассмотрим подробнее "эффект" метода Олинера [30]. Физическую основу эвристического подхода Олинера составляет предполо-

жение о том, что энергия рабочей волны ПЛ сконцентрирована вблизи плоского проводника или вблизи неоднородности ЛП. Эквивалентная волноводная или коаксиальная структура формируется для каждой конкретной ЛП. Для эквивалентной структуры — модели Олинера — ищется решение электродинамической модельной задачи. При формировании модели Олинера учитываются специфические особенности физико-топологической модели [44] каждой конкретной исследуемой ЛП, причем адекватность модели тем выше, чем более "закрытый" характер имеет ЛП, что вытекает из самого эвристического характера метода: в реальной физико-топологической модели открытой ЛП наблюдается примат локальных энергетических характеристик основного рабочего типа волны над топологическими параметрами в сечении ЛП. Таким образом, в комбинированном по своей технике методе "квазистатическое отображение объекта на модель — решение электродинамической модельной задачи" первый из них сохраняет "суммарную" информацию об энергетическом базисе исследуемой ЛП и достаточно полную информацию о топологических ее параметрах. Второй же электродинамический метод использует конструкцию собственных типов волн, отличающихся от реально наблюдаемых в исследуемой ЛП, но сходящихся с ними в энергетическом базисе. Это объясняет эффект применения, например, в задачах синтеза ОИС и их БЭ — оптимизации параметров, строгого электродинамического метода к структурам, аппроксимированным одноволновым режимом работы посредством носителя физико-топологической информации — обобщенной модели Олинера, которая формируется в квазистатическом приближении с использованием конформных преобразований. Подобная трактовка позволяет более четко очертить область использования как собственно метода Олинера, так и его обобщенного варианта [30].

Рассмотренный вопрос позволил развить электродинамическую теорию СПЛ и НПЛ, а также БЭ на их основе [13, 30, 36].

Следующим шагом в развитии метода подобия явилось введение третьего условия: равенство частот отсечки эквивалентного волновода и исследуемой ЛП [13]. Это позволило разработать целый класс неоднородностей на ЛП с продольными составляющими электрического или магнитного полей [14].

Накопленный опыт моделирования ОИС методами подобия позволяет сформулировать ряд общих принципов построения таких моделей применительно к разнообразным БЭ. Один из них заключается в гомеоморфизме структуры электромагнитного поля объекта (T_0) и его олинеровской модели T_m так, что $T_0 \leftrightarrow T_m$. Ниже под структурой электромагнитного поля будем понимать его топологическую схему, что тесно связано с основными принципами симметрии: теорема Нетер и теорема Биркгофа, закон компенсации симметрии, принцип дисимметризации и т.п. Для последующих рассуждений важен принцип Неймана—Миннигероде—Кюри (НМК), гласящий, что "необходимым условием симметрии физического явления относительно некоторой группы преобразований (f_T) является симметрия, в данном случае структуры поля, относительно этих же преобразований" [76]. Докажем необходимую справедливость принципа инвариантности топологии поля в методе подобия.

Теорема. Необходимым условием реализации подобия физических свойств базового элемента и его модели является гомеоморфизм структур их полей:

$$T_0 \leftrightarrow T_m.$$

Доказательство. Пусть объект имеет P_0 существенных физических принципов, а модель — P_m . Выясним, является ли гомеоморфизм $f_T: T_0 \leftrightarrow T_m$ необходимым условием инвариантности физических свойств P :

$$P_0 \leftrightarrow P_m (f_T: T_0 \leftrightarrow T_m).$$

Задача сводится к выяснению симметрии физических свойств P относительно гомеоморфизма f_T . Для доказательства обратимся к принципу НМК, в соответствии с которым имеем необходимостью инвариантность по крайней мере части физических свойств в случае гомеоморфизма $f_T: T_0 \leftrightarrow T_m$. Теорема доказана.

Сводя выводы теоремы с предыдущими рассуждениями, отметим, что там и здесь отмечается как обязательный элемент приближенность соответствия объекта и модели (Олинера). Это не противоречит самому принципу НМК: условия симметрии в силу своей абстрактной природы только необходимы, но недостаточны для реализации явлений [76]. Таким образом, формальный анализ условий симметрии не освобождает от необходимости тщательного изучения самих физических явлений.

Справедливость действия данной теоремы иллюстрируется приведенными выше примерами. Так, ПЛ ставится в соответствие прямоугольный волновод с магнитными стенками, основная волна которого есть Т-волна, имеющая отсечки по частоте. Модифицированный метод Олинера для СЩЛ требует согласования не только типа волны в модели, так чтобы в рабочей области частот не имело места несоответствия структур полей. Достаточность в подобии объектов и моделей достигается согласованием и других параметров, например, отнесением магнитных стенок модели полосковой линии на некоторое эффективное расстояние, соответствующее степени запасения реактивной мощности [30]. Отметим, что точность приближенных моделей удовлетворительна для большого числа практических примеров лишь в диапазоне до 10 ГГц. Однако сделанное выше замечание о строгом решении для ключевой структуры в значительной степени снимает это ограничение.

Рассмотрев основные подходы к моделированию ОИС, остановимся на их роли в современном и перспективном проектировании радиоэлектронной аппаратуры СВЧ. Известно, что проектирование предполагает создание внутренней структуры объекта по заданным его волновым характеристикам, например, амплитудно-частотным. В этом плане метод подобия СВЧ структур с эквивалентными низкочастотными цепями имеет неоспоримое преимущество, так как заданной частотной характеристике становится в соответствие низкочастотная схема, а по ней восстанавливается и СВЧ устройство. Причем этап качественного (прототипного) синтеза не требует значительных затрат машинного времени, а математический и физический аппарат его более понятен инженеру-проектировщику, нежели электродинамика ОИС. Тем не менее, использование низкочастотных аналогий на данном этапе синтеза проектируемого устройства сразу же ограничивает класс возможных решений: отсекается богатство электродинамических эффектов, способных дать новое, более оптимальное решение. В замыкании на определенном классе решений и заключается принципиальная ограниченность методов подобия. Для выхода из него требуется, по меньшей мере, электродинамический уровень мышления разработчика, четкое и ясное понимание физики ОИС.

Дает ли классический электродинамический подход средства к тому? В ответе следует сказать лишь о потенциальной способности его. Дело в том, что выходной характеристикой модели долгое время считалась лишь матрица рассеяния S . С привлечением электродинамических моделей возникла необходимость анализа многомодовых матриц, так что число характеристик возросло многократно. Разработчик при переходе к электродинамическим моделям зачастую теряет замкнутый и физически ясный образ, модель устройства, поэтому вновь и вновь приходится возвращаться к качественному синтезу на основе эквивалентных цепей. Круг замыкается и не дает явных, глобальных преимуществ за исключением, пожалуй, большей точности решения, полученного ценой "астрономических" затрат машинного времени.

Таким образом, трехмерные схемы СВЧ, их физика требуют новых подходов, способных представить четкие, ясные физические модели и новую электродинамическую стратегию проектирования. Одним из таких подходов является интенсивное использование топологических схем электромагнитных полей в теории и практике ОИС.

5. Топологический подход в проектировании ОИС СВЧ

ОИС относится к числу сложнейших объектов с точки зрения математического моделирования и синтеза разнообразных структур. Это заставляет с математической стороны отойти от точных моделей, не нарушая при этом физики. Эти подходы имеют свои области применения, но ни один из них не опирается на электродинамический аппарат. Например, квазистатические модели пренебрегают реальной дисперсией фазовых скоростей. Модели Олинера в существенной степени неточны в области высоких частот, тем более для сравнительно сложных ЛП, а использование строгих решений требует от проектировщика "электродинамического" уровня мышления. Отсюда вытекает острая необходимость в разработке теории и моделей ОИС, опирающихся на строгий электродинамический аппарат, но обладающих большой степенью наглядности с точки зрения физики процессов. Из истории современной физической науки ясно, что такая строгая теория внутренне сложных объектов, какими являются ОИС, должна все же абстрагироваться от ряда каких-либо деталей. Однако степень абстракции не должна касаться и отсекал существенные особенности физики ОИС, как это имеет место в квазистатических или простых олинеровских моделях. В качестве такого подхода предлагается теория, опирающаяся на аппарат топологии, в которой объектами являются схемы электромагнитного поля [20, 71, 75, 77 — 79].

По определению, топологическая схема — это совокупность сепаратрис и положений равновесия фазового объема уравнений силовых линий:

$$\frac{dr_e}{dt} = e, \quad \frac{dr_h}{dt} = h, \quad (6)$$

где e и h — электрическое и магнитное поля, а r_e и r_h — векторы их силовых линий.

Поскольку формула (6) описывает автономные динамические системы, то к ним в полной мере применима качественная теория обыкновенных дифференциальных уравнений [80], имеющих свою специфику, обусловленную электродинамической природой ЛП. Это требует разработки специального математического аппарата на базе уравнений Максвелла в топологической форме. Локальные топологии полей вблизи общих точек равновесия имеют вид: $e = h = 0$. Методика их получения заключается в разложении полей e, h в ряд Тейлора и последующей подстановке в уравнения типа $f(l_e, l_h) = 0$, где l_e, l_h — характеристические числа положений равновесия электрического и магнитного полей соответственно. Здесь важно отметить, что выбор общей точки равновесия $e(r_0) = h(r_0) = 0$ обуславливает инвариантность полученных связей относительно общей группы Лоренца. Уравнения Максвелла в топологической форме выглядят следующим образом:

$$\det[\hat{A}(l_e, h) - l_{h,e} \hat{E}] = 0; \quad (7)$$

здесь $\hat{A}, \hat{E}$ — общая и единичная матрицы соответственно. Уравнение (7) носит локальный характер и определяется лишь в строго определенных местах электромагнитного поля. Для физического анализа необходимо связать и интег-

ральные топологические характеристики ячеек электрического и магнитного полей. Сформулируем два положения, выражающих тополого-интегральные максвелловские связи для схем электрического e и магнитного h полей:

1. Сепаратрисы ячеек схем полей e и h ортогональны друг другу в точках пересечения.

2. Сепаратрисы замкнутого контура какого-либо поля (e или h) так взаимонаправлены с пересекающими их сепаратрисами другого поля (h или e), что для совокупности точек пересечения выполняется следующее равенство;

$$\sum_{i=1}^N \text{sign}(y_i h_i) \text{sign}(x_i e_i) = 0, \quad (8)$$

где y_i, x_i — орты декартовой системы координат в i -й точке пересечения.

В качестве примера рассмотрим топологические схемы полей волны E_{11} прямоугольного волновода. В середине поперечного сечения его находится положение равновесия магнитного поля типа центр, а по углам размещаются седла динамической системы. Сепаратрисы поля совпадают с гранями экрана. В точках центральной оси волновода $k_z z = (2n + 1)p/2$ находятся трехмерные седла электрического поля ($p = 3,141592\dots$). Сепаратриса, соединяющая эти седла, находится в центре волновода. В указанных выше плоскостях также имеется четыре сепаратрисы поля e , соединяющие трехмерные седла с углами, и четыре полусепаратрисы — с серединами металлических стенок волновода.

Обходя любые замкнутые контура сепаратрис полей e, h , легко убедиться в справедливости максвелловского тополого-интегрального соотношения (8), представляющего с математической точки зрения особую форму счисления индекса ячейки топологической схемы для динамической системы (6).

Рассмотрим применение схем полей для физического анализа сложных направляющих структур ОИС [20]. Топологический подход, основы которого были приведены выше, дал ключ для оперативной физической оценки ОИС. В силу своей природы топологические схемы полей оказались грубыми по отношению к вариации ряда параметров из достаточно широкой области их изменения. В сложных направляющих структурах ОИС (рис. 5) выделим ключевые элементы. Предположим заданность значений тангенциальных электрических полей e_t (магнитных токов на апертурах щелей S). Динамическая система (6) с использованием тензорной функции Грина $\hat{g}$ примет вид

$$\frac{dr_e}{dt} = e = \int_S e_t \hat{g} dS'. \quad (9)$$

Исследования систем (9) показали следующее: если e_t принадлежит к определенному классу, например, к функциям, не меняющим своего знака на апертуре, то топологическая схема поля T_e инвариантна до числа имеющих положений равновесия по отношению к изменениям de_t . Следовательно, получение топологической схемы приближенного расчета картины силовых линий вовсе не требует полного решения сложной электродинамической краевой задачи. Достаточно задания из физических соображений качественного распределения поля e_t и постоянной распространения собственной волны k_z . За счет этого достигается радикальное сокращение затрат времени на машинное моделирование с целью исследования основных физических свойств собственных волн некоторых типов реберно-щелевых линий передачи для ОИС. Поперечные сечения этих линий с объемным расположением проводников приведены в левой части рис. 5. В ЛП с ребрами, направленными на-

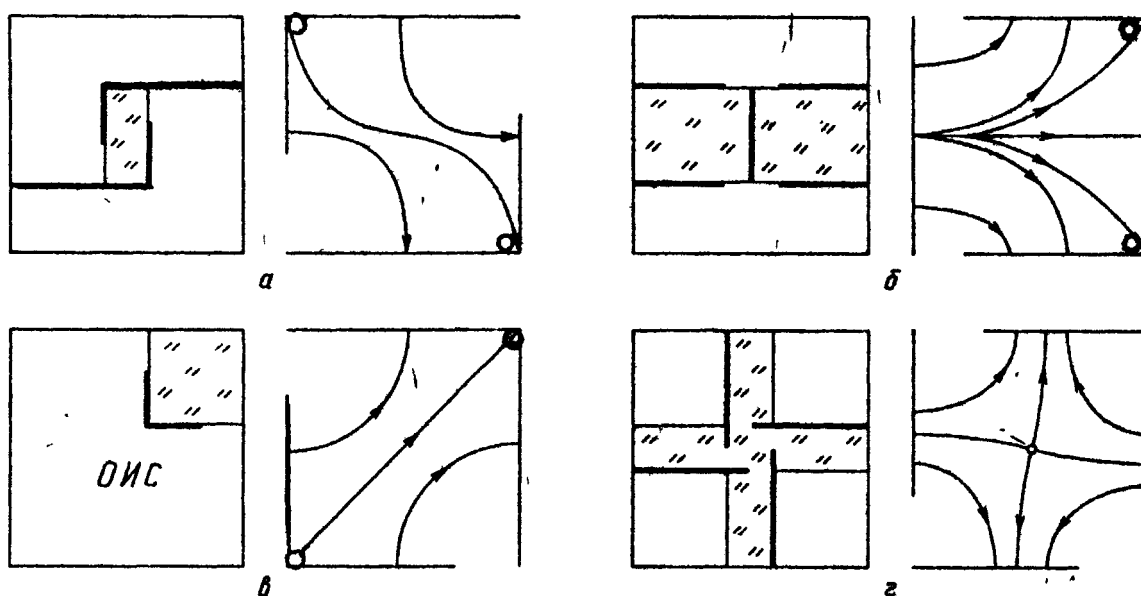


Рис. 5. Поперечное сечение и структура электрического поля объемных линий передачи. *а* — Реберно-щелевая линия. *б* — Щелевая линия с поперечным ребром. *в* — Реберно-угловая линия. *г* — Линия с крестообразным расположением проводников

встречу друг другу, достигнуто уменьшение потерь на излучение (рис. 5,а); с поперечным ребром в щелевой линии создана возможность включения транзисторных монокристаллических схем (рис. 5,б); с ребрами на углах модуля ОИС реализовано включение мощных диодных схем вблизи корпуса для удобства отвода тепла и настройки (рис. 5,в). Многие положительные качества вбирает в себя линия с крестообразным расположением проводников (рис. 5,г), а именно: широкая полоса рабочих частот (даже в миллиметровом диапазоне) и способность распределять СВЧ мощность в двух ортогональных плоскостях. Функциональные возможности перечисленных линий могут быть существенно расширены при глубоком теоретическом анализе и построении наглядных электродинамических моделей, содержащих в себе основную часть физической информации. С этой целью в исследуемых линиях передачи выбраны ключевые элементы с максимальными сосредоточениями энергии основного типа волны (см. рис. 5; в правой части). В зависимости от расположения щелей и ребер меняется топологическая схема поля. При расположении щелей на противоположных гранях со сдвигом, сепаратриса (показана штриховой линией) соединяет два положения равновесия типа седло (показано кружком на рис. 5,а). Смежное расположение щелей дает совпадение плоскости симметрии с сепаратрисой (рис. 5,б). Размещение щелей друг против друга характеризуется наличием двух полусепаратрис, расположенных по разные стороны плоскости симметрии (рис. 5,в). Наличие щелей на всех гранях определяет существование четырех полусепаратрис и положение равновесия в центре (рис. 5,г). Из анализа ключевых структур следует, что определение элементов топологической схемы (точка равновесия и сепаратриса) достаточно для описания основных физических свойств волны вплоть до качественного распределения поля [20, 58, 75].

Следующим этапом развития топологической теории может быть установление закономерностей формирования топологической схемы в зависимости от геометро-топологических особенностей граничных условий. Эти закономерности позволили бы сделать шаг к качественному решению задач на собственных волнах, придав тем самым самой сложной электродинамике СВЧ былую "чувственную" наглядность [79]. ("Я хочу, чтобы мои читатели усвоили, что истинная математическая структура этих понятий станет ясной только теперь

подобно ландшафту в горах, когда туманная завеса поднимается вверх" (А. Зоммерфельд [61].)

6. Базовые элементы, функциональные узлы, устройства обработки и информационные датчики ОИС СВЧ

До сих пор мы преимущественно обсуждали проблемы описания ЛП, получения их адекватных моделей и т.п. Однако наиболее интересно и нужно для практики проектирования, но и, *saï la vie*, наиболее сложно разобраться с физикой и электродинамикой БЭ, т.е. в конечном счете тех кирпичиков, из которых должно в итоге выстроить здание ОИС — модуля. И здесь вновь приходится отметить, что "не зная броду — не суйся в воду", т.е. не разобравшись с физикой работы отдельного БЭ, соединения их в функциональный узел или модуль, невозможно "малой кровью" построить процесс проектирования, а в итоге — систему автоматизированного проектирования (САПР) ОИС. И пускаясь в это нелегкое плавание будем помнить замечательные слова В.А. Фока: "Всякая физическая теория имеет своей целью получение такой картины явления, которая воспроизводила бы количественным и качественным образом все существенные его черты. Эта цель может считаться достигнутой только в том случае, когда полученное решение имеет достаточно простой вид. Если же аналитическая форма строгого решения отличается сложностью, то его можно рассматривать только как первый шаг в действительном решении задачи; следующий шаг должен состоять в выводе формул, пригодных для численных расчетов" [32].

Анализ ОИС-структуры в большинстве случаев основываются на декомпозиционном подходе, т.е. на расчленении ее на отдельные (но большие части БЭ) элементы, которые могут быть достаточно просто рассмотрены (найден матрица рассеяния S_i). Нахождение общей матрицы рассеяния S по матрицам отдельных БЭ S_i осуществляется стандартным образом и в каждой САПР имеются соответствующие средства (см., например, [13, 30, 35]). Далее осуществляется расчет частотных характеристик по заданной топологии (многовариантный анализ) либо, напротив по заданным выходным характеристикам выполняется расчет топологии (параметрический синтез), в зависимости от требований к разработке.

Рассмотрим некоторые характерные для ОИС БЭ и функциональные узлы. Большинство из них являются оригинальными устройствами, предложенными и разработанными у нас в стране в процессе реализации СОИ на ОИС.

6.1. Неоднородности представляют собой соединение двух ЛП, которые могут быть либо одинаковыми, либо разными по своим физическим свойствам и геометрии. Случай соединения двух одинаковых ЛП через скачок ширины проводника, разрыв линий и другие виды неоднородностей относятся к типу плоскостных ИС, хотя они и являются составной частью элементной базы ОИС [30, 31], но достаточно хорошо изучены и мы ими заниматься не будем.

Соединения разнотипных ЛП, проводники которых расположены в различных слоях диэлектрика, являются сложными электродинамическими структурами (рис. 6), поскольку в плоскости соединения может происходить трансформация волны одного вида в другой. Для более детального их рассмотрения остановимся на объемных шестиполусных Т-соединениях, которые выполняют функции деления мощности СВЧ сигнала с входа на два выхода. Входная НПЛ с квази-Т-волной синфазно возбуждает H -волну в ортогонально расположенных на противоположной стороне слоя диэлектрика НЩЛ (рис. 6,а) и СЩЛ (рис. 6,б), а также Т-волну в КЛ (рис. 6,в) [42, 81]. В неоднородностях этого типа происходит перенос СВЧ-сигнала через слой диэлектрика.

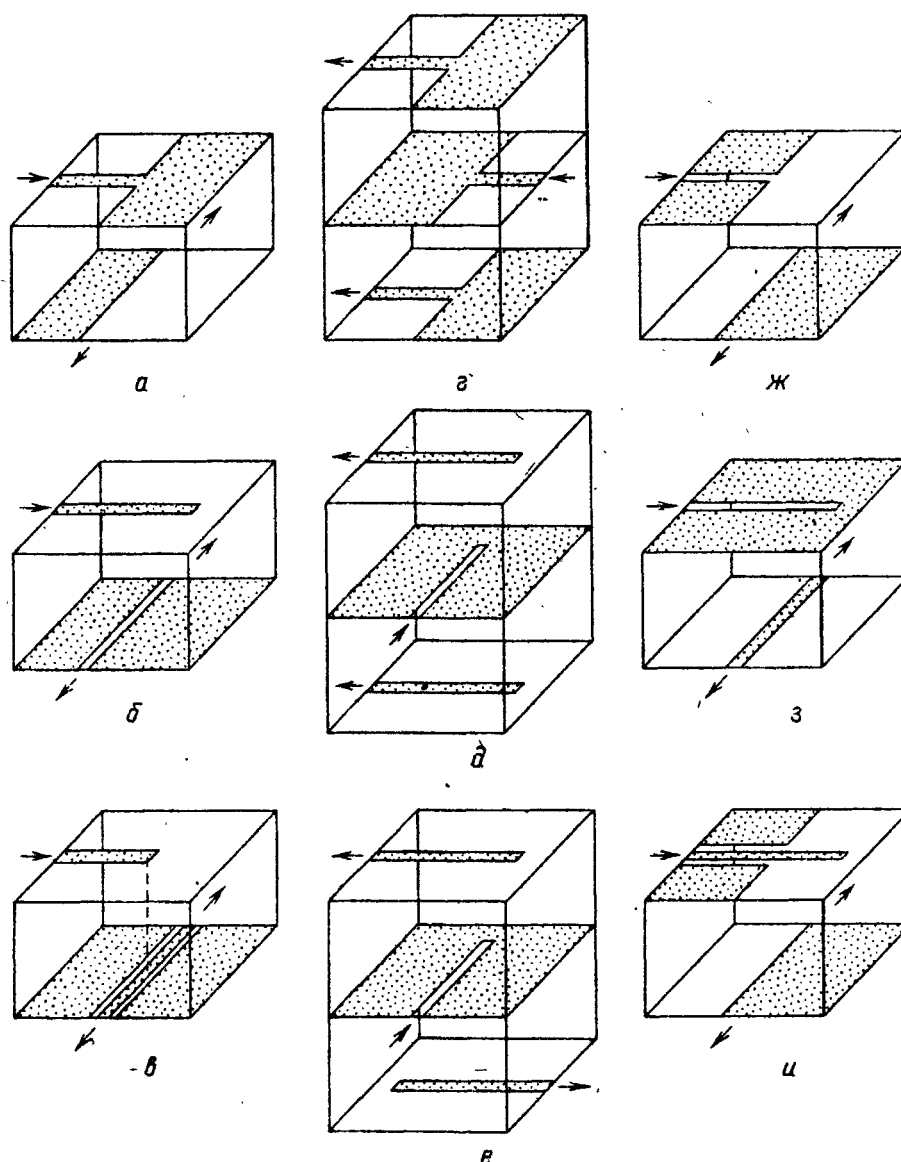


Рис. 6. Объемные Т-соединения. *a* — НПЛ $\leftrightarrow$ НЩЛ. *б* — НПЛ $\leftrightarrow$ СЩЛ. *в* — НПЛ $\leftrightarrow$ копланарная линия. *г* — НПЛ $\leftrightarrow$ НПЛ. *д, е* — СЩЛ $\leftrightarrow$ НПЛ. *ж* — СЩЛ $\leftrightarrow$ НЩЛ. *з* — СЩЛ $\leftrightarrow$ НПЛ. *и* — Копланарная линия $\leftrightarrow$ НЩЛ

При необходимости перенос сигнала можно организовать в различные слои диэлектрика [82]. Например, СПЛ с Т-волной синфазно возбуждает НПЛ, соосно разнесенные через слои диэлектрика (рис. 6,г). Выходные НПЛ можно возбудить и СЩЛ, расположенной между ними, но здесь имеется следующая особенность. При совпадении направления НПЛ возбуждение осуществляется синфазно (рис. 6,д), а при встречном направлении — противофазно (рис. 6,е).

Аналогичны виды соединения СЩЛ с НЩЛ (рис. 6,ж) и НПЛ (рис. 6,з), а также КЛ с НЩЛ (рис. 6,и). Для наилучшего согласования за областью пересечения входные ЛП заканчиваются четвертьволновыми разомкнутыми либо закороченными отрезками (рис. 6,б, д, е, з, и). Отличительной особенностью объемных Т-соединений является перенос СВЧ сигнала в вертикальной плоскости, как правило, без нарушения целостности слоев диэлектрика, что значительно упрощает технологию изготовления.

Волновые матрицы рассеяния Т-соединений с учетом неоднородностей в референсной плоскости определяются методом электродинамического моделирования с помощью различных вариантов метода Олинера [82]. После получения моделей различных БЭ можно перейти к формированию функциональных узлов ОИС СВЧ.

6.2. Мостовые схемы относятся к объемным направленным структурам, использующим в основе своей принцип сопряженных плеч для получения на двух выходных плечах взаиморазвязанных сигналов с равными амплитудами [83]. По конструкции и физическим свойствам эти схемы обладают большим разнообразием. Основным отличием является сдвиг фазы сигнала между выходными плечами. По структуре мостовая схема является восьми-

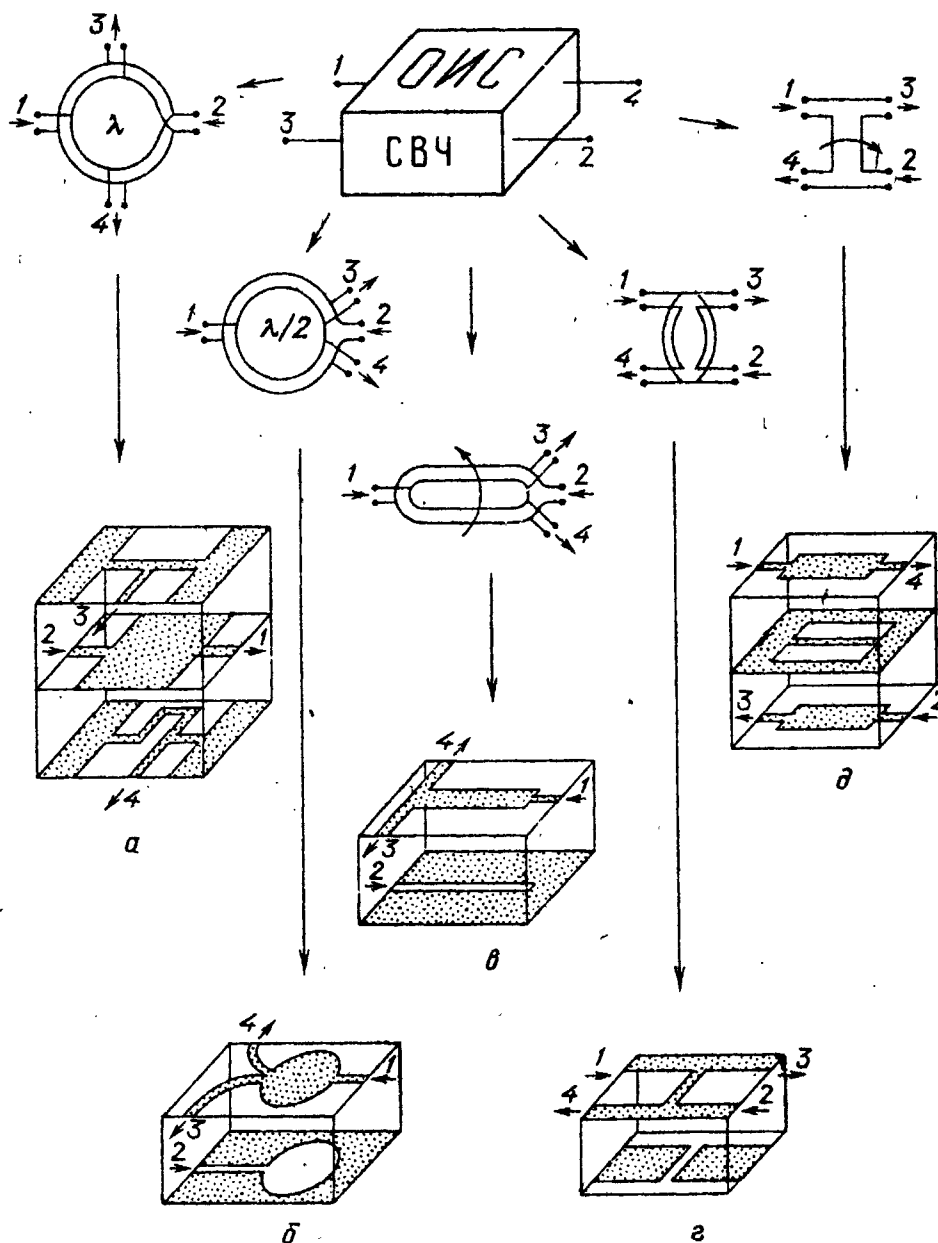


Рис. 7. Эквивалентные схемы и топологии ОИС СВЧ. *а* — Кольцевой мост длиной l . *б* — Кольцевой мост длиной $l/2$. *в* — "Магическое" Т-соединение. *г* — Шлейфный направленный ответвитель. *д* — Ответвитель на связанных линиях передачи

полосником, плечи которого коммутируются четвертьволновыми отрезками ЛП (рис. 7). Коммутирующие отрезки ЛП могут соединяться по кольцевой схеме (кольцевой мост длиной λ или $\lambda/2$) либо прямолинейными отрезками ЛП с распределенной связью по электромагнитному полю (направленный ответвитель).

Кольцевой мост длиной λ реализуется на четвертьволновых отрезках НПЛ (рис. 7,а). Входные плечи расположены между слоями диэлектрика, а выходные плечи разнесены на внешние стороны [84]. Сигнал, поступающий на одно входное плечо, делится синфазно в выходные плечи, а на другое — противофазно. Величина сдвига фазы сигнала на выходных плечах не зависит от частоты, что определяет высокую направленность (развязка входных плеч достигает 40 дБ). Кольцевой мост длиной $\lambda/2$ имеет аналогичный принцип работы, но коммутирующие отрезки ЛП выполнены на НЩЛ (рис. 7,б) [85]. Здесь достигнуто уменьшение габаритных размеров, но при этом направленность становится частотнозависимой (в октавной полосе достигает 20 дБ). Потери в кольцевых мостах составляют не более $\pm 0,2$ дБ.

Иной вид имеет мостовая схема со связанными ЛП на четвертьволновом отрезке. Используя комбинацию НПЛ и СЩЛ (рис. 7,в), можно получить синфазно-противофазное деление сигнала — "магическое Т-соединение" [86]. По физическим свойствам он полностью эквивалентен кольцевому мосту длиной $\lambda/2$.

Деление сигнала со сдвигом фазы 90° достигается комбинацией включения четвертьволновых шлейфов на НЩЛ (квадратурный шлейфный ответвитель (рис. 7,г [87])). Аналогичный сдвиг фазы получается при разнесении выходных (входных) плеч в разные слои диэлектрика (рис. 7,д) [13]. Четвертьволновая область связи при этом реализуется на НПЛ с проводниками ограниченной ширины, в которой возбуждаются волны четного и нечетного типов. При равенстве фазовых скоростей этих волн достигается максимальная направленность.

Основные частотные характеристики рассмотренных мостовых схем определяются коэффициентами волновой матрицы рассеяния, расчет которых осуществляется путем рекомбинации БЭ, описанных выше. Таким образом, знание волновых матриц рассеяния БЭ и функциональных узлов позволяет перейти к рассмотрению модулей ОИС с пассивными и активными БЭ.

6.3. Устройства обработки СВЧ сигнала являются основной частью радиофизических комплексов. К ним относятся пассивные устройства фильтрации сигнала и его многоканального деления с заданными фазовыми соотношениями на выходе. К активным устройствам можно отнести перестраиваемые фазовращатели и преобразователи СВЧ сигнала [88, 89].

Фильтрующие устройства формируются из наборов резонаторов, связанных по электромагнитному полю. Приближение характеристик фильтра к идеальным — частотная характеристика имеет вид эллиптической функции — достигается при реализации полной комбинации связей между всеми резонаторами (рис. 8 [90]). Этот подход в целом не осуществим в плоскостных ИС. Для этого необходимо исключить в фильтре коммутирующие отрезки линий связи и перейти к объемным видам связи как по электрическому полю — разрыв между проводниками НПЛ, так и по магнитному — торцевое соединение СЩЛ с НПЛ. Из топологии (рис. 8,а) видно, что для достижения этих связей выбраны оптимальные типы ЛП, т.е. последовательно выполняется принцип оптимальности БЭ.

Устройствами для запитки антенных решеток являются многоканальные делители мощности — диаграммообразующие матрицы (ДОМ). Основным требованием к ним является развязка выходных плеч с заданным распределением

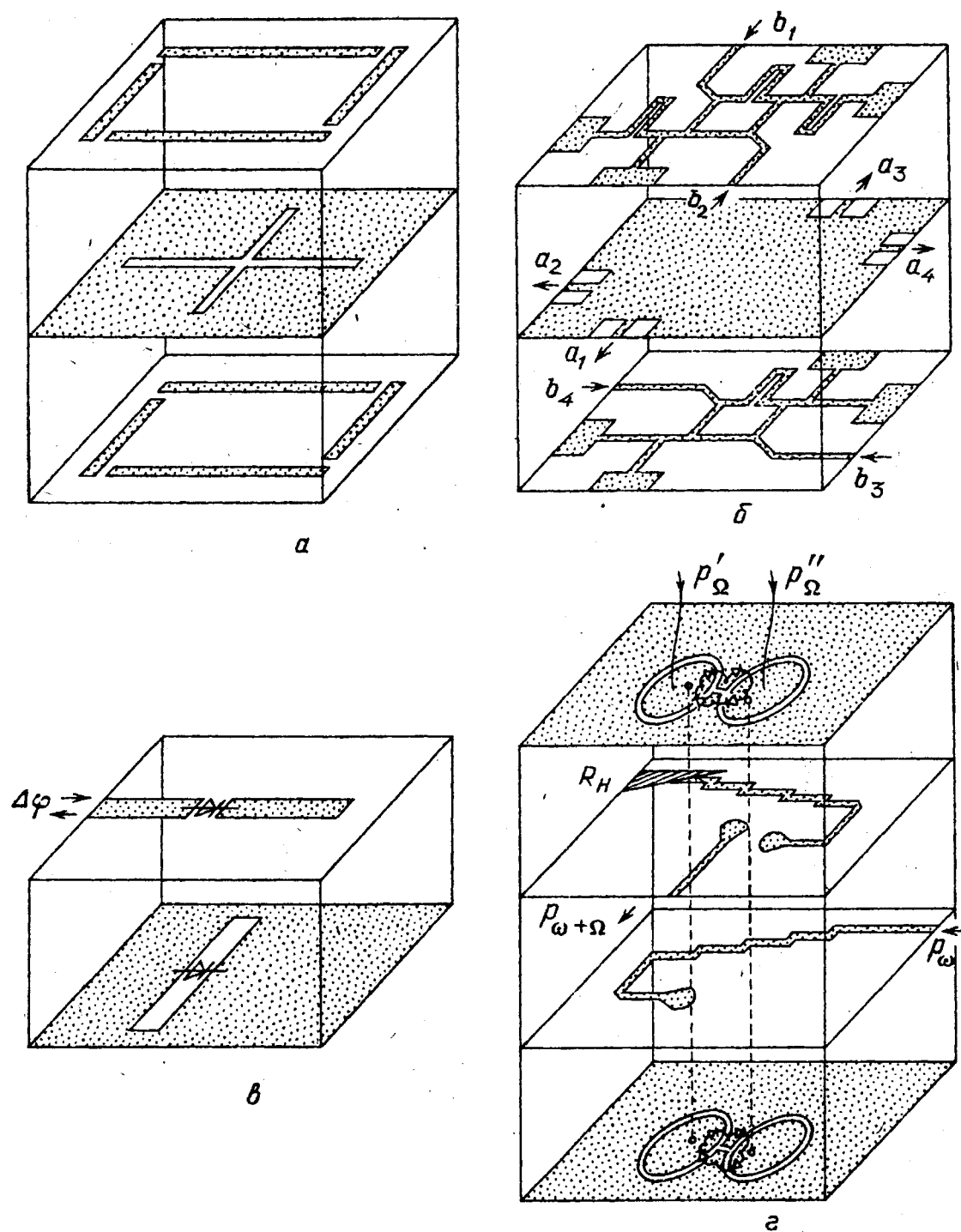


Рис. 8. Топология функциональных узлов ОИС СВЧ. *а* — Девятирезонаторный полосовой фильтр. *б* — Диагнормообразующая матрица. *в* — 360-градусный фазовращатель с плавной перестройкой. *г* — Преобразователь СВЧ сигнала

фазовых соотношений. Схемных решений данных матриц известно достаточно много: матрицы Пейджа, Бласса, Батлера и т.п. Для примера остановимся на рассмотрении матрицы Пейджа с числом плеч 4×4 , которая выполняется путем коммутации синфазно-противофазных мостов (рис. 8,б) [91]. В этой схеме, как и в других матрицах, необходимо обеспечить пересечение коммутирующих отрезков ЛП с высокой степенью развязки. Это возможно только в

ОИС. В топологии матрицы Пейджа (рис. 8,б), например, легко достигается электрическая симметрия коммутирующих отрезков ЛП, расположенная в разных плоскостях слоев диэлектрика, что приводит к малым разбалам фазы сигнала ($0,180 \pm 1^\circ$), деление мощности ($6 \pm 0,2$ дБ) и развязки плеч выше 30 дБ. Схемно-конструктивный вариант такой матрицы, в которой снижение потерь и двух-трехкратное расширение полосы частот достигается введением конструктивных (полосковых) элементов с плавноизменяющимися топологическими параметрами предложен в [36].

Уникальные характеристики по линейной перестройке фазы СВЧ сигнала имеют фазовращатели отражательного типа на ОИС. Это достигается включением варакторных диодов в референсную плоскость без коммутирующих отрезков линий (рис. 8,а). Топология схемы выполнена по принципу оптимальности БЭ. Для последовательного включения диода используется НПЛ, а для параллельного — СЩЛ. Длина четвертьволновых закороченных — СЩЛ и разомкнутого — НПЛ шлейфов определяет рабочую частоту фазовращателя.

Однополосный преобразователь СВЧ сигнала предназначен для управления фазой (фазовый манипулятор), амплитудой (аттенуатор) и частотой (сдвигатель частоты) [14]. Преобразователь состоит из двух балансных модуляторов и двух направленных структур (синфазно-противофазного и квадратурного направленных ответвителей), включенных на входе и выходе [92]. Управляющий сигнал подается с 90-градусным сдвигом фазы на входы балансных модуляторов, сигнал несущей частоты — на вход синфазно-противофазного ответвителя, а обработанный сигнал снимается с выходов квадратурного ответвителя (рис. 8,з). Перечисленные функциональные узлы реализуются в объемной топологии. Четверки диодов включены в СЩЛ с симметричной топологией на внешних слоях диэлектрика, а топология пассивных направлений ответвителей реализована во внутренних слоях диэлектрика. Широкие полосы рабочих частот (до октавы), подавление несущей выше 35 дБ и одной боковой — выше 25 дБ — достигнуты благодаря исключению отрезков ЛП, коммутирующих диоды, которые включены в референсной плоскости. Потери преобразования составляют в полосе частот менее 5 дБ.

Объемный модуль однополосного устройства управления сигналом в общем случае может выполнять целый ряд различных функций, например, амплитудную и фазовую модуляцию, удвоение частоты, смесителя частоты, а также амплитудного, фазового и частотного детектора [93, 94]. При этом для перестройки функции достаточно, не затрагивая самой конструкции модуля, менять лишь форму сигналов, подаваемых на входы и выходы. По своим физическим свойствам преобразователь позволяет осуществлять дискретизацию параметров сигнала, что очень важно для цифровой обработки.

6.4. Информационные датчики в индивидуальном режиме выполняют измерительные функции, а в системе автоматизации производства функции 100-процентного контроля выхода годных изделий ОИС и ее элементной базы. К перспективным относятся измерительные датчики, использующие неразрушающие методы исследуемых образцов, где реализация и архитектура объемных связей по электромагнитному полю между датчиком и измеряемым образцом возможны на основе ОИС. На рис. 9 представлены информационные датчики для измерения комплексных сопротивлений (а), дисперсионных характеристик акустических и магнитостатических волн (б), диэлектрической проницаемости (в). Рассмотрим вкратце их объемные конструкции и принципы работы [13, 14].

Измеритель комплексных сопротивлений СВЧ схем выполнен на НПЛ, в слое металлизации которой вырезаны зонды в виде НЩЛ. Поочередное их включение с детектором осуществляется через pin-диоды (рис. 9,а). Малая

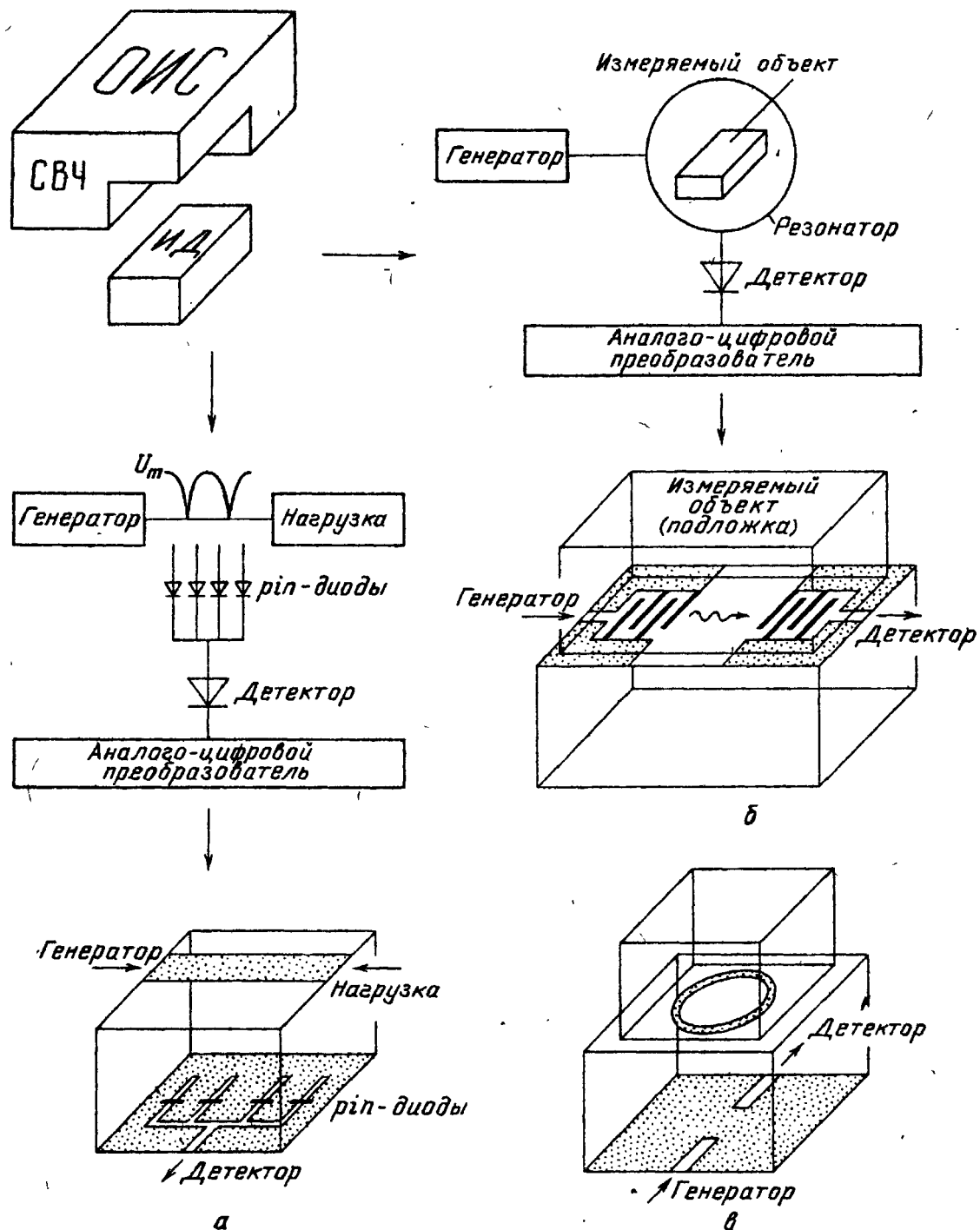


Рис. 9. Эквивалентные схемы и топологии информационных датчиков ОИС СВЧ. *а* — Измеритель комплексных сопротивлений. *б* — Устройство для измерений физических свойств подложек при возбуждении акустических либо магнитостатических волн. *в* — Устройство для измерения диэлектрической проницаемости подложек

ширина щелей зонда (десятки микронов) и практически частотнонезависимая связь зондов с НПЛ (порядка 15 — 20 дБ) значительно увеличивают точность измерения по сравнению с датчиками на плоскостных ИС. Конечным итогом измерения является фиксация напряжения тюля отраженной волны и дальнейшая их аппроксимация для определения фазы и коэффициента стоячей волны по напряжению. Сигнал управления p-n диодами и информационный

сигнал после детектора проходят через аналогово-цифровой преобразователь и подаются для обработки на микропроцессор.

Исследование физических свойств подложек при возбуждении акустическими и магнитостатическими волнами можно проводить на датчиках, построенных по основным принципам проектирования ОИС (рис. 9,б). В основу положен резонансный метод. Сам резонатор выполняется на одной стороне диэлектрической подложки в виде двух штыревых преобразователей электромагнитной волны, направленных навстречу друг другу и разнесенных на некоторое расстояние. Входом и выходом преобразователей являются СЩЛ. При исследовании акустических волн на резонатор накладывается подложка, например, из ниобата лития, а магнитостатических волн — железо-иттриевого граната.

Для исследования диэлектрических свойств подложек используется также резонансный метод, где резонатор выполнен на одной стороне подложки в виде НПЛ, свернутой в кольцо длиной $n\lambda$ (рис. 9,в). Резонатор возбуждается СЩЛ, расположенной на противоположной стороне. Измеряемая подложка накладывается на резонатор. Определение электрофизических параметров исследуемых подложек осуществляется путем измерения сдвига резонансной частоты, фиксируемой после детектора.

Подводя итог разделу, можно сказать, что ОИС успешно внедрились в разработки широкого класса СВЧ устройств. Особенно они эффективны там, где формируется большое число входных и выходных каналов и где необходимо достижение уникальных характеристик электрофизических параметров. Это достигается благодаря исключению большого числа переходных соединений и коммутирующих линий за счет трехмерного распределения БЭ. На основе такого подхода в дальнейшем можно создавать высокоорганизованные структуры ОИС с достаточно малым уровнем мощности информационного сигнала. Следующим этапом развития идеи ОИС является исследование и разработка многофункциональных ОИС преимущественно широкополосным ЛП и узлами обработки информационных сигналов. Создание таких систем ориентировано на модульные устройства и устройства для сверхскоростной обработки информации, включая КВЧ и радиооптический диапазоны [40, 60]. Широкополосность же линий и узлов может быть обеспечена разработанной гаммой квазирегулярных БЭ (переходов и функциональных узлов), изготавливаемых по гибридной, монокристаллической и комбинированной технологиям [36, 40, 42, 44, 75, 93–97].

7. Физико-технологические аспекты ОИС

Одним из существенных преимуществ в ОИС явилась возможность при их создании ориентироваться на хорошо освоенные промышленностью технологии. Таким образом, ОИС дают возможность реализовать, если допустима такая аналогия, известный принцип гильерсовской Сухаревки: "На грош — пятаков!", т.е. получить на "старой" элементной базе новое качество. Примеры таких скачков в технике, а тем более в радиотехнике весьма редки и напоминают, например, переход к идее и технике цифровых ССОИ, ибо элементная база аналоговой обработки по стоимости пришла к своему фундаментальному пределу [6 — 10]. Разумеется, все новые технологии вписываются и пригодны для будущих ССОИ на ОИС. В последнее время на Западе начали появляться ОИС (пока по преимуществу СВЧ), в которых реализована технология получения структур с 20 — 40 слоями в едином технологическом цикле. И вновь наша техника, может статься (что уж многократно бывало, к сожалению), окажется в роли догоняющего, хотя сама идеология ОИС, математическое моделирование, САПР, первые образцы ССОИ несомненно сделаны были у нас [13].

Для больших многофункциональных ОИС пока наиболее подходит (по

нашим меркам) гибридная технология [13, 31, 36, 40, 42]. Однако и здесь возникает круг дополнительных технологических задач, специфических для ОИС. Для их уяснения представим себе сборку многослойной ОИС из нескольких слоев — подложек, на каждой из которых по тонкопленочной технологии выполнены топологические рисунки, в объемной компоновке составляющие пассивную часть функционального узла. Собираются эти подложки в объемную структуру склеиванием, пайкой или дополнительным механическим скреплением.

При любом способе сборки за счет конечной толщины тонконесущих полосковых проводников между подложками образуются зазоры, которые заполняются либо клеем, либо воздухом. Величины зазоров трудно контролируются, а их изменения сильно влияют на электрические характеристики. Одновременно на большой площади соединяемых поверхностей практически невозможно избавиться от воздушных пузырьков в клее (компаунде). Исклучить эти пузырьки можно при склеивании или пайке в вакуумных камерах. А воздушные зазоры необходимо учитывать при проектировании ОИС, поскольку с их "помощью" может произойти несанкционированная трансформация рабочей волны в волну любого типа, в излучение и т.п.

Вторая особенность технологического изготовления ОИС заключается в необходимости высокой точности совмещения слоев относительно друг друга. Здесь возникает противоречие. С одной стороны, качественные показатели ОИС экспоненциально возрастают с увеличением числа слоев, а с другой, возрастает опасность рассогласования между БЭ разных этажей. Это противоречие несколько снимается, если предусмотреть специальные технологические операции по обеспечению высокой точности совмещения. Но тем не менее при гибридной технологии остается физическое ограничение на число слоев ОИС.

К третьей особенности технологического изготовления ОИС следует отнести способ размещения и закрепления дискретных АЭ: диодов, транзисторов, бескорпусных полупроводниковых ИС и т.д. Согласно принципу оптимальности БЭ, ЛП с АЭ выполняются на одной стороне подложек, представляющих собой крайние слои диэлектрика, что обеспечивает удобство охлаждения, экранирования, регулировки и ремонта (последнее, впрочем, возможно и характерно, к сожалению, только у нас). В этой ситуации возникает фундаментальное физическое ограничение на предельно достижимые массогабаритные характеристики [16]. Это ограничение ослабится при полном или частичном отказе от использования сосредоточенных АЭ в пользу распределенных активных элементов, "не выступающих" за уровни слоев, типа усилителя бегущей волны на основе эффекта отрицательной дифференциальной проводимости в GaAs-подложке. Ряд конструктивно-технологических решений размещения АЭ в ОИС рассмотрен в [36, 40].

Перечисленные дополнительные технологические особенности снимаются при переходе от гибридной технологии к монолитной. К сожалению, на сегодня монолитная технология для ОИС у нас не разработана до промышленного уровня. Можно использовать ряд общих операций, позаимствовав их, например, из технологии монолитных трехмерных цифровых ИС (с рабочими частотами до 100 МГц) [19], но в целом требуются кардинальные решения. Пока же рекомендуется использовать квазимонолитную технологию [23, 36, 40, 44], при которой функциональный слой с диэлектриком выполняется в едином технологическом цикле. Далее осуществляется послойная сборка. Поскольку стоимость монолитной ОИС пропорциональна размерам площади функционального слоя, то целесообразно использовать между ними диэлектрические слои (подложки) с высокой диэлектрической проницаемостью порядка $\epsilon_r = 40 - 200$. В этом случае геометрические размеры базовых элементов, кратные четверти длины волны, уменьшаются в несколько раз. Конструкции ОИС данного типа рассмотрены в [36].

Опыт более глубокого проникновения в идею ОИС и ее осуществления показывает, что при современных темпах развития интегральных технологий нет непреодолимых препятствий на пути промышленного освоения ОИС СВЧ и КВЧ диапазонов, в том числе multifunctional и выполненных по monolithic (quasimonolithic) технологии, не говоря уже о технологии гибридной. Накопленный опыт теоретических исследований, богатство схемных и конструкторско-технологических решений, лишь часть которых отражена здесь, подсказывает и наглядно убеждает, что имеются все предпосылки для отработки промышленной технологии и серийного выпуска ОИС самого различного назначения. Однако существует некий "отечественный" парадокс: несмотря на явные преимущества ОИС перед плоскостными ИС (повышение надежности, более высокая стойкость к воздействию внешних факторов, резкое снижение массы и габаритных размеров и т.п.), широкомасштабному внедрению ОИС в производство препятствует, как у нас принято говорить, ведомственная разобщенность. Предприятия, которым нужны ОИС, пока не имеют нужной технологии, а организациям, которые имеют соответствующую технологию, "не нужны" ОИС. Немаловажную роль в таком регрессе играют личностные факторы, наложение субъективизма. При всем этом "сопротивление" новой идее естественно, диалектично и может быть обосновано с использованием теории меры нововедения и теоремы Геделя из логики [26, 40]. Это еще один повод для оптимизма, хотя трудно забыть известные рассуждения П.Л. Капицы о проблемах внедрения научных достижений в технику [99].

8. Заключение

Итак, одной из последних — к нам по времени — ступенек развития микроэлектроники являются ОИС. Как и в любой науке новые достижения и открытия признаются революционными, если последующим шагом является цепная реакция по публикациям в отечественной и зарубежной литературе. Нечто подобное случилось и с ОИС. В нашей стране все более распространенным становится мнение: "Для электроники будущего, в частности, для ЭВМ будущих поколений ...ведутся работы над созданием ИС нового типа — ОИС, ...напоминающая слоеный пирог, ...каждый слой которого знакомая нам плоскостная ИС" [100]. Разработанные физические принципы ОИС дают в руки проектировщиков перспективный и апробированный аппарат и его технологические реализации в СВЧ диапазоне, позволяющие за счет электромагнитных межэтажных связей — взамен гальванических — в значительной мере решить проблему межэлементных и межузловых соединений [101 — 104], т.е. в итоге знаменитую "проблему проводников".

В промышленно развитых зарубежных странах уже четко сформулировалось мнение, что плоскостные ИС достигнут предела повышения плотности упаковки в начале 90-х годов, после чего дальнейшее увеличение ее, а также расширение функций будет зависеть от успехов технологии вертикальной интеграции — развития трехмерных ИС. Основой технологом ОИС является создание слоев по технологии "кремний—на—диэлектрике" с последующим их monolithic наложением [19]. "Слоистые полупроводниковые структуры типа изолятор—полупроводник, которые, если удастся изготовить межслойные соединения определенной конфигурации, станут основой действительно трехмерных ОИС СВЧ" [102].

К настоящему времени, вероятно, одним из наиболее ярких проявлений технических преимуществ ОИС были упомянутые выше диаграммообразующие матрицы (ДОМ) для запитки фазированных антенных решеток, те достигнуто уменьшение габаритов и массы на один-два порядка, и устройства дискретизации и управления СВЧ сигнала, в которых достигнуто увеличение полосы рабочих частот в несколько раз [14]. Ввиду высокой эффективности

ОИС в Японии создан Комитет по исследованию трехмерных ИС, возглавляемый MITI [19], а в США не менее десяти лабораторий и фирм заняты созданием моделей распространения электромагнитных волн в сложных трехмерных структурах типа металл—полупроводник—диэлектрик. Их финансируют организации, подчиненные ВМС и ВВС США, а также национальный научный фонд [103].

Заканчивая наши заметки, подчеркнем, что объемные схемы СВЧ требуют нового подхода в плане теории. Особенно остро стоит вопрос дооснащения арсенала исследователей и разработчиков пониманием физики формирования структуры трехмерных векторных полей в сложных средах и связи полевых, топологических характеристик с интегральными параметрами: волновыми числами и матрицами рассеяния [71, 105]. Насколько быстро удастся продвинуться в плане создания топологической электродинамики ОИС, настолько эффективными будут перспективные ОИС, реализованные современными методами технологии для создания ССОИ на СВЧ и КВЧ.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Проблемы современной радиотехники и электроники/Под ред. В.А. Котельникова. — М.: Наука, 1980.
2. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956.
3. Харвей А.Ф. Техника СВЧ. — М.: Сов. радио, 1965.
4. Валиев Р.А. Микроэлектроника: достижения и пути развития. — М.: Наука, 1986.
5. Минц А.Л. Радиоэлектроника. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
6. Нефедов Е.И. Радиоэлектроника наших дней. — М.: Наука, 1986.
7. Хармут Х. Теория секвентного анализа: Основы и применения. — М.: Мир, 1980.
8. Хармут Х. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. — М.: Радио и связь, 1985.
9. Хармут Х. Применение методов теории информации в физике. — М.: Мир, 1989.
10. Применение цифровой обработки сигналов/Под ред. Э. Оппенгейма. — М.: Мир, 1980.
- [11] Нелинейные электромагнитные волны/Под ред. П. Усленги. — М.: Мир, 1983.
12. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. — М.: Мир, 1989.
13. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. — М.: Наука, 1985.
14. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ — элементная база аналоговой и цифровой радиоэлектроники. — М.: Наука, 1987.
15. Гуляев Ю.В., Сандомирский В.Б., Суханов А.А., Ткач Ю.Я./УФН. 1984. Т. 144. С. 475.
16. Гвоздев В.И., Гуляев Ю.В., Нефедов Е.И. Архитектоника объемных интегральных структур СВЧ (принципы проектирования)/Тезисы докладов I научно-технической конференции по интегральной электронике СВЧ. — Новгород: НПИ, 1982. — С. 110.
17. Гвоздев В.И., Гуляев Ю.В., Нефедов Е.И./ДАН СССР. 1986. Т. 290. С. 343.
18. Яшин А.А. Конструирование микроблоков с общей герметизацией. — М.: Радио и связь, 1985.
19. Акасака И./ТИИЭР. 1986. Т. 72, № 12. С. 120.
20. Гвоздев В.И., Кузаев Г.А., Тихонов А.Н./ДАН СССР. 1990. Т. 313. С. 87.
- [21] Арваншвили Н.Н., Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. и др./Ibidem. 1988. Т. 303. С. 97.
22. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Порубов В.В./Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 31. С. 800.
23. Нефедов Е.И., Черникова Т.Ю./Ibidem. 1989. Т. 32. С. 1525.
24. Гуляев Ю.В., Курушин Е.Л., Нефедов Е.И./ДАН СССР. 1981. Т. 257. С. 67.
25. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Рудь Л.А. Резонансное рассеяние волн. — Киев, Наукова думка, 1986.
26. Гвоздев В.И., Скулаков П.Н., Шепетина В.А., Яшин А.А./Зарубеж. радиоэлектрон. 1990. №5. С. 39.
27. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И./Электродинамические основы автоматизированного проектирования ИС СВЧ/Под ред. Е.И. Нефедова. — М.: ИРЭ АН СССР, 1981. — С. 17.
28. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И./ДАН СССР. 1982. Т. 267. С. 360.
29. Нефедов Е.И., Фиалковский А.Т. Полосковые линии передачи: Теория и расчет типичных неоднородностей. — М.: Наука, 1974.
30. Нефедов Е.И., Фиалковский А.Т. Полосковые линии передачи: Электродинамические основы автоматизированного проектирования ИС СВЧ. — М.: Наука, 1980.
- [31] Курушин Е.Л., Нефедов Е.И. Электродинамика анизотропных волноведущих структур. — М.: Наука, 1983.
32. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. — М.: Сор. радио, 1970.
33. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. — М.: Радио и связь, 1988.

34. *Нефедов Е.И.* Дифракция электромагнитных волн на диэлектрических структурах. — М.: Наука, 1979.
35. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ/Под ред. В.В. Никольского. — М.: Радио и связь, 1982.
36. *Афромеев В.И., Привалов В.Н., Яшин А.А.* Согласующие устройства гибридных и полупроводниковых интегральных СВЧ схем/От ред. Е.И. Нефедов. — Киев: Наукова думка, 1989.
37. *Созинов А.А.* Полиморфизм белков и его значение в генетике и селекции. — М.: Наука, 1985.
38. Микроэлектронные устройства СВЧ/Под ред. Г.И. Веселова. — М.: Высшая школа, 1988.
39. Фундаментальные пределы в радиоэлектронике и смежных областях//ТИИЭР. 1981. Т. 69, №2.С 3.
40. *Гвоздев В.И.*// Радиотехн. и электрон. 1982. Т. 27. С. 2110.
- [41] Техника и технологии ИС будущего//ТИИЭР. 1986. Т. 76, № 12. С. 1.
42. *Згурский А.В., Козловский В.В., Нефедов Е.И.* Полосковые излучающие и резонансные устройства. — Киев: Техника, 1990.
43. *Панченко В.А., Нефедов Е.И.* Микрополосковые антенны. — М.: Радио и связь, 1986.
44. *Лаврик В.И., Фильчакова В.П., Яшин А.А.* Конформные отображения физико-топологических моделей. — Киев: Наукова думка, 1990.
45. *Гвоздев В.И., Хитров С.С.*// Зарубеж. радиоэлектрон. 1982. № 5. С. 86.
46. *Гвоздев В.И., Кузаев Г.И., Нефедов Е.И.*//Радиотехн. и электрон. 1985. Т. 30. С. 1050.
47. *Гвоздев В.И., Кузаев Г.А., Нефедов Е.И., Уткин М.И.*//Ibidem. 1989. Т. 34. С. 47.
48. *Bhat B., Koul S.K.* Analysis design and application of fin line.— New Yourk: Artech House, 1987.
49. Проблемы математического моделирования и реализация радиоэлектронных систем СВЧ на ОИС//Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции/Под ред. Е.И. Нефедова, И.Г. Шрамкова. — М.: МИЭМ, 1987.
50. Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных систем СВЧ на ОИС//Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции/Под ред. Е.И. Нефедова. — М.: Радио и связь, 1989.
- [51] Теория и математическое моделирование ОИС СВЧ и КВЧ//Тезисы лекций, докладов, сообщений IV Всесоюзной школы-семинара/Под ред. Е.И. Нефедова. Ч. I, II. — Алма-Ата: Изд-во Казахск. гос. ун-та, 1989.
52. Математическое моделирование, САПР и конструкторско-технологическое проектирование ОИС СВЧ и КВЧ//Тематический курс лекций V Всесоюзной школы-семинара/Под ред. Е.И. Нефедова. — Тула: ТПИ, 1990.
53. *Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.*//Микроэлектроника. 1992. Т. 21. С. 2.
54. *Нефедов Е.И.*// [5 2] — С. 4.
55. *Гвоздев В.И., Нефедов Е.И., Черникова Т.Ю.*//Радиотехника. 1988. № 1. С. 72.
56. *Нефедов Е.И., Филалковский А.Т.* Асимптотическая теория дифракции электромагнитных волн на конечных экранах. — М.: Наука, 1972.
57. *Вайнштейн Л.А.* Теория дифракции и метод факторизации. — М.: Сов. радио, 1966.
58. *Гвоздев В.И., Кузаев Г.А., Шепетина В.А.*// Радиотехн. и электрон. 1990. Т. 35. С. 954.
59. *Вальсевич А.С., Гвоздев В.И., Нефедов Е.И.*// ДАН СССР. 1985. Т. 282. С. 93.
60. *Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.*// [50]. — С. 60.
- [61] *Яшин А.А.*// Зарубеж. радиоэлектрон. 1987. №2. С. 3.
62. *Никольский В.В., Никольская Т.Н.* Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. — М.: Наука, 1983.
63. *Неганов В.А., Нефедов Е.И.*// ДАН СССР. 1988, Т. 299. С. 1124.
64. *Неганов В.А., Нефедов Е.И.*//ЖВММФ. 1988, № 1. С. 1735.
65. *Мей К., Морган М., Шу Кон-Чжан.*//Численные методы теории дифракции. — М.: Мир, 1982. — С. 143.
66. *Миллер У., Поджио А.*//Ibidem. — С. 9.
67. *Миронов А.Б., Платонов Н.И., Шлепнев Ю.О.*//Радиотехн. и электрон. 1990. Т. 35. С. 281.
68. *Кузаев Г.А., Курушин Е.П., Неганов В.А.*// И з в . вузов. Радиофизика. 1981. Т. 23. С. 1041.
69. *Кузаев Г.А.*//Радиотехн. и электрон. 1983. Т. 28. С. 2452.
70. *Кузаев Г.А.*//Тезисы докладов X Всесоюзной научной конференции "Электроника СВЧ". — Минск: МРТИ, 1983. — Т. 2. С. 406.
- [71] *Кузаев Г.А.*// Электродинамика и техника СВЧ КВЧ: Теория, математическое моделирование и САПР ОИС СВЧ. — М. МИЭМ, 1991. — С. 37.
72. *Никольский В.В., Никольская Т.Н.* Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Наука, 1989.
73. *Коваленко А.Н.*//Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. С. 1308.
74. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ./Сост. М. Ван-Дайк. — М.: Мир, 1986.
75. *Кузаев Г.А.*// [52]. — С. 173.
76. *Шубников А.В., Копчик В.А.* Симметрия в науке и искусстве. — М.: Наука, 1972.
77. *Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.*// Лекции школы-семинара по объемным интегральным схемам (ОИС)/Под ред. Е.И. Нефедова. — Тбилиси: Груз, политехн. ин-та, 1988. — С. 67.

78. Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.//Электросвязь. 1991. №6. С. 46.
79. Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.//[51]. — С. 29.
80. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Качественная теория динамических систем второго порядка. — М.: Наука, 1967.
- [81] Бальсевич А.С., Гвоздев В.И., Нефедов Е.И.//Радиотехн. и электрон. 1987. Т. 32. С. 1505.
82. Бальсевич А.С., Гвоздев В.И.//Радиотехника. 1984. Т. 32. С. 67.
83. Гвоздев В.И.// Зарубеж. радиоэлектрон. 1981. № 11. С. 35.
84. Гвоздев В.И., Меланченко Н.К., Чернушенко А.М. Миниатюрные гибридные устройства. — М.: МИЭМ, 1985.
85. Гвоздев В.И., Литвиненко М.Ю., Нефедов Е.И.//Радиотехника. 1982. Т. 37, № 7. С. 83.
86. Гвоздев В.И., Юрьев Б.С., Канониди К.Х.//Радиотехника. 1983. Т. 38, № 8. С. 76.
87. Гвоздев В.И., Макарова Е.В., Нефедов Е.И.//Микроэлектроника. 1983. Т. 12. С. 163.
88. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И., Хитров С.С.// Зарубеж. радиоэлектрон. 1984. № 1. С. 27.
89. Гвоздев В.И., Литвиненко М.Ю.// Ibidem. 1989. № 9. С. 70.
90. Гвоздев В.И., Смирнов С.В., Чернушенко А.М.//Электросвязь. 1985, № 2. С. 47.
- [91] Бальсевич А.С., Гвоздев В.И., Конин Е.К.// Электросвязь. 1987. №5. С. 51.
92. Гвоздев В.И., Литвиненко М.Ю.//Микроэлектроника. 1985. Т. 14. С. 408.
93. Гвоздев В.И., Литвиненко М.Ю., Седлецкий В.Б.//Радиотехника. 1984. Т. 39, № 10. С. 82.
94. Гвоздев В.И., Литвиненко М.Ю., Седлецкий В.Б.// Электросвязь. 1986. № 6. С. 48.
95. Яшин А.А.//Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, С. 640.
96. Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.// Зарубеж. радиоэлектрон. 1990. №7. С. 29.
97. Яшин А.А.//Микроэлектроника. 1989. Т. 18. С. 349.
98. Любченко В.Е., Макеева Г.С., Нефедов Е.И.// Радиотехн. и электрон. 1982. Т. 27. С. 1665.
99. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. — М.: Наука, 1981.
100. Левинштейн М.Е., Семин Г.С. Барьеры от кристалла до интегральной схемы. — М.: Наука, 1987.
- [101] Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металло-диэлектрические волноводы. — М.: Радио и связь, 1988.
102. Полевые транзисторы на арсениде галлия/Под ред. Д.В. Лоренцо, Д.Д. Канделуола. — М.: Радио и связь, 1988.
103. Гилберт Б.К., Куанвэнь Б.// ТИИЭР. 1988. Т. 76, №7. С. 47.
104. Jamal S. Microwave Transition Design. — New York: Artech House, 1988.
105. Гвоздев В.И., Кузаев Г.А.//Интеллектуальные интегрированные САПР РЭА и БИС/Под ред. Б.В. Бункина, В.Н. Гридина. — М.: Наука, 1990. — С. 105

Статья поступила 30.10.90 г.