

А. Г. ЯЦУНЕНКО

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики
E-mail: anatoly@ramed.dp.ua

Дата поступления в редакцию
15.07 2005 г.

Оппонент В. И. МАЙ
(НПП "Сатурн", г. Киев)

ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗГОТОВЛЕНИЮ СВЧ-ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

Применение многослойной гальванопластики с разборными матрицами в сочетании с элементами гальванопластического монтажа повышает надежность и технологичность СВЧ-устройств при снижении стоимости изделий.

В качестве основного исходного момента, определяющего разумно необходимую степень интеграции или количества функций, выполняемых конструктивно завершенными СВЧ-модулями, может служить компромисс между стремлением к уменьшению массогабаритных характеристик аппаратуры, удобством и упрощением ее эксплуатации и возможностями технологии ее изготовления, контроля и проверки соответствующих электрических параметров.

Известно, что совершенствование элементной базы, сводящееся лишь к простому объединению различных по функциональному назначению, но изготовленных отдельно СВЧ-узлов, не позволяет существенно улучшить электрические и массогабаритные характеристики аппаратуры, упростить и удешевить технологию ее изготовления и, в конечном счете, повысить эффективность ее использования [1]. В первую очередь этому препятствует большое количество стыковочных узлов. Даже в миллиметровом диапазоне длин волн, из-за того, что существенную долю массы приемопередающей части аппаратуры составляют волноводы, волноводные фланцы и корпуса приборов (с вынужденным применением волноводных фланцев), масса аппаратуры может достигать до 70—80 кг [2].

Разрешение возникшей дилеммы возможно за счет создания многофункциональных модулей, конструкция которых приспособлена для серийного производства. Однако ориентация только на гибридно-интегральную технологию изготовления печатных плат с имплантированными активными элементами не всегда является экономически привлекательной — из-за их неремонтопригодности, а также более низкого, по сравнению с волноводами, допустимого уровня передаваемой мощности.

Альтернативой этой технологии может быть принципиально новая волноводно-интегральная технология, базирующаяся на основе многослойной гальванопластики с элементами гальванопластического монтажа [3, 4]. Помимо существенного выигрыша в мас-

се и габаритах изделий, здесь коренным образом снижаются затраты на регулирование и настройку, т. к. применение метода многослойной гальванопластики обеспечивает не только высокую точность изготовления, но и повторяемость геометрических параметров и электрических характеристик СВЧ-узлов.

Опыт работы в течение ряда лет над решением рассматриваемой сложной, но актуальной проблемы показывает, что тщательно отработанная конструкция матриц многократного использования (матрица — это конструктивно оформленный копир, на котором методом электролитического осаждения формируется соответствующее изделие) в сочетании с технологической оснасткой, обеспечивающей вращивание как металлических, так и неметаллических деталей, позволяет производить практически квазимонолитные СВЧ-модули с достаточно обширным спектром функциональных возможностей. Обеспечивается также легко выполняемая замена полупроводниковых приборов (генераторных, детекторных и смесительных диодов). При этом стремление к унификации конструктива усилительных и генераторных узлов приводит не только (и не столько) к однотипности матриц многократного использования, но и к легкости преобразования усилительного узла в генераторный и наоборот. А это создает оперативный простор, позволяющий реализовать различные схемотехнические решения при разработке квазимонолитных приемопередающих модулей.

При разработке матриц многократного использования и технологической оснастки для изготовления элементов и узлов аппаратуры связи и навигации (в том числе и спутниковой) по предлагаемой технологии необходимо прежде всего определиться: производство каких из них является приоритетным. Безусловно, таковыми являются генераторный и усилительный модули, а также развязывающие устройства — вентили и циркуляторы.

Относительно генераторного модуля следует отметить, что для обеспечения чистоты спектра генерируемых колебаний, а также стабильности частоты и снижения уровня частотных шумов, в нем должна быть предусмотрена система стабилизации частоты. Наиболее просто эта задача решается путем параметрической стабилизации частоты с помощью внешнего высокочастотного резонатора. Основными требованиями, которым должен удовлетворять стабилизирующий резонатор, это высокая добротность и не-

критичность его электрических параметров к отклонениям от номинальных значений при изготовлении (к примеру, отклонений от перпендикулярности продольной оси резонатора относительно торцевых поверхностей). Как известно [5], таким требованиям удовлетворяют биконические резонаторы (к тому же форма оправки для их изготовления органически вписывается в конструктив матрицы многоразового использования, предназначенной для изготовления стабилизированного по частоте, практически монолитного, генераторного модуля).

В некоторых случаях при варьировании нагрузки генератора стабильность его частоты, обеспечиваемая параметрической стабилизацией, может оказаться недостаточной. В этой ситуации для исключения влияния изменения нагрузки на частоту генерируемых колебаний обычно применяют ферритовые развязывающие устройства, разновидностью которых являются волноводные циркуляторы.

Различают симметричные (Y) и несимметричные (T) циркуляторы. Исторически сложилось так, что хотя конструкция T-циркуляторов и проще, Y-циркуляторам посвящено большее количество работ, что связано, скорее всего, с более простым расчетом их электродинамических параметров. Если рассматривать единичные развязывающие элементы (Y- или T-циркуляторы), то оказывается, что путем соответствующего выбора формы и размеров ферритового вкладыша и диэлектрической втулки можно добиться примерно одинаковых электродинамических параметров рассматриваемых элементов, причем система "ферритовый вкладыш — диэлектрическая втулка" для T-циркуляторов по сравнению с Y-циркуляторами оказывается, как правило, сложнее. При одинаковых ферритовых вкладышах T-циркуляторы имеют более узкую полосу частот.

Естественно, что матрица для изготовления T-циркуляторов значительно проще, чем матрица для Y-циркуляторов, но это обстоятельство не является единственно привлекательным при использовании T-циркуляторов. Так, для нескольких каскадно-соединенных циркуляторов в случае реализации такой цепочки посредством Y-циркуляторов возникают отдельные участки сборной матрицы, которые оказываются "замурованными", что делает практически невозможным реализацию матрицы многоразового использования. Вообще создается впечатление, что если на "стержневой" волновод как бы "нанизывать" функциональные узлы, то можно добиться реализации многофункционального устройства как единого целого, используя сборную матрицу многоразового использования, причем главное условие при этом сводится к тому, чтобы каждый отдельно функционирующий узел был электродинамически связан со "стержневым" волноводом через его боковые поверхности.

Для иллюстрации возможностей предлагаемой технологии изготовления элементной базы аппаратуры связи и навигации на рис. 1 представлены некоторые СВЧ-элементы и многофункциональные узлы на их основе, выполненные методом гальванопластики и гальванопластического монтажа. При создании этого демонстрационного набора СВЧ-устройств авто-

К рис. 1.

1. Излучающий модуль с рупорной антенной и ферритовой развязкой генератора.
2. Диэлектрическая линза.
3. Излучающий модуль с рупорной антенной и генератором, стабилизированным по частоте биконическим резонатором.
4. Излучающий модуль с рупорной антенной, ферритовым Y-циркулятором и смесительной камерой.
5. КВЧ-генератор на диоде Ганна с двухкаскадным усилителем мощности на ливонно-пролетном диоде (ЛПД).
6. Излучающий модуль со стабилизированным по частоте генератором, ферритовой развязкой и направленным ответвителем для контроля мощности генератора.
7. Излучающий модуль с ферритовой развязкой и направленным ответвителем.
8. Крестообразный направленный ответвитель.
9. Стабилизирующий биконический резонатор в разобранном виде.
10. Цепочка Y-циркуляторов.
11. Y-циркулятор.
12. T-циркулятор.
13. Генераторы для КВЧ-терапии (с узкой и широкой полосой перестройки).
14. Параболический отражатель.

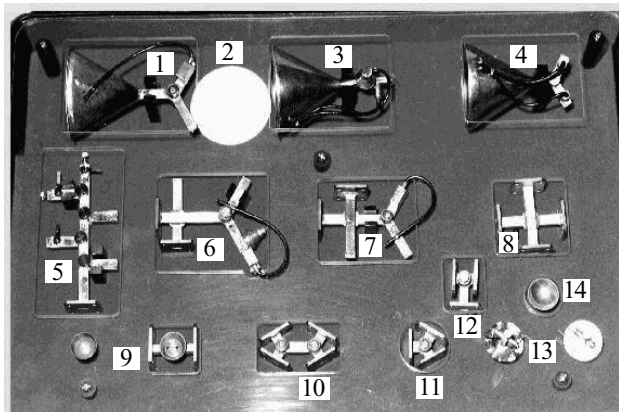


Рис. 1. Демонстрационный набор элементов и узлов аппаратуры связи и навигации КВЧ-диапазона

ром преследовалась цель не только показать потенциальные возможности предложенной технологии, но и проиллюстрировать, что разработанные элементы и узлы аппаратуры связи и навигации превосходят существующие не только по массогабаритным, но и по электродинамическим показателям (или, по крайней мере, они не хуже известных аналогов).

Относительно некоторых электрических параметров изготовленных изделий можно сказать следующее.

Так, сравнительная оценка долговременной нестабильности стандартного генератора СВЧ Г4-141 и генератора на диоде Ганна, изготовленного методом гальванопластики (рис. 2, а), которая проводилась с помощью анализатора спектра С4-60 в режиме запоминания по ширине заштрихованной (сигналами сравниваемых генераторов) области на экране электронно-лучевой трубки, показала, что стабильность частоты изготовленного генератора с применением стабилизирующего биконического резонатора (рис. 2, б) оказывается на порядок выше, чем у серийно выпускаемого Г4-141. На рис. 2, в представлен автодинный преобразователь частоты КВЧ-диапазона на дио-

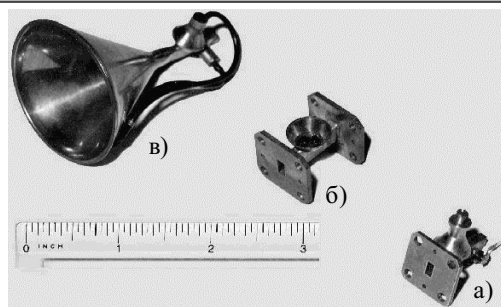


Рис. 2. Элементы и узлы КВЧ-диапазона: *a* — генератор на диоде Ганна со стабилизирующим биконическим резонатором; *b* — биконический резонатор в разобранном виде; *c* — автодинный преобразователь частоты на диоде Ганна с рупорной антенной

де Ганна. Стабилизация частоты автодинного преобразователя осуществляется с помощью электрически перестраиваемого биконического резонатора.

Следует отметить, что на основе отработанной матрицы Т-циркулятора была изготовлена более сложная матрица многоразового использования, предназначенная для изготовления многофункционального устройства, которое представляет собой генератор на диоде Ганна с двухкаскадным усилителем мощности на ЛПД. При этом в качестве развязывающих элементов использовались уже упомянутые Т-циркуляторы. Общий вид этого устройства показан на рис. 3. Представленное устройство может быть легко трансформировано (за счет конструктивных изменений матрицы) в передающий модуль, содержащий генератор на диоде Ганна (со стабилизацией частоты с помощью электрически перестраиваемого биконического резонатора), в упомянутые усилители и рупорную антенну. Аналогичным образом может быть изготовлен приемный модуль, содержащий рупорную антенну, малощумящий усилитель и автодинный преобразователь частоты на диоде Ганна. Приемный и передающий модули выполнены как конструктивно завершенные монолитные изделия, которые не содержат ни единого фланцевого соединения.

Нельзя не упомянуть еще об одном важнейшем достоинстве описываемых здесь технологических решений при изготовлении СВЧ-элементов и узлов — их высоконадежной герметичности. Это достигается благодаря отсутствию фланцевых соединений в

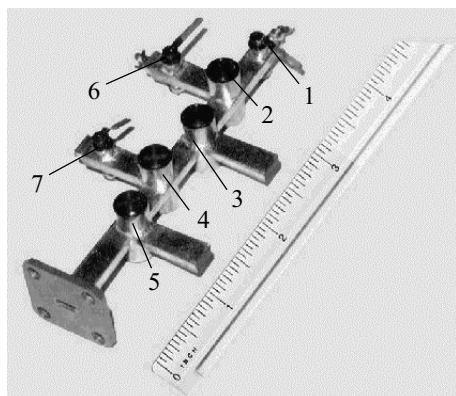


Рис. 3. КВЧ-генератор с двухкаскадным усилителем мощности: *1* — генератор на диоде Ганна; *2—5* — Т-циркуляторы; *6, 7* — усилители мощности на ЛПД

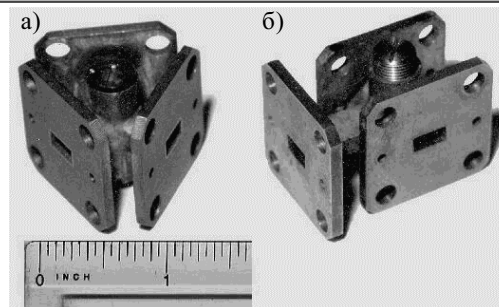


Рис. 4. Волноводные Y-циркулятор (*a*) и Т-циркулятор (*b*) КВЧ-диапазона длин волн

монолитной конструкции, содержащей металлостеклянные гермовводы сигналов управления и вакуумноплотные СВЧ-вводы, вмонтированные в конструкцию при гальванопластическом монтаже. Такое решение гарантирует долговременную работу системы в целом с сохранением заданных технических характеристик, а также позволяет не герметизировать корпуса активных полупроводниковых элементов (что само по себе сложнейшая проблема, особенно в верхнем участке КВЧ-диапазона).

На рис. 4 крупным планом и в несколько ином ракурсе, чем на рис. 1, показаны Y- и Т-циркуляторы, изготовленные методом гальванопластического монтажа.

Выводы

Результаты проведенной практической работы подтверждают, что изделия, изготовленные по предлагаемой технологии с применением тщательно отработанных матриц многоразового использования в сочетании с технологической оснасткой, не только обладают положительными качествами традиционных полосковых линий и металлических полых волноводных систем, но и превосходят их по своим техническим, эксплуатационным и другим характеристикам, не имея при этом присущих им недостатков.

Установлено, что эта технология позволяет повысить качество, надежность и технологичность изделий, уменьшить их массу в 10—100 раз, а габариты — в 2—4 раза.

Кроме того, применение многослойной гальванопластики с разборными матрицами многоразового использования в сочетании с элементами гальванопластического монтажа позволит существенно снизить стоимость готовых изделий при серийном производстве.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гассанов Л. Г., Липатов А. А., Марков В. В. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Алыбин В. Г. Пути построения современных СВЧ-устройств для радиорелейных линий и спутниковых средств связи / 5-я Крымская конференция и выставка "СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии". — Севастополь. — 1995. — С. 11.
3. Яценко А. Г., Привалов Е. Н. Новая волноводно-интегральная технология для бортовой аппаратуры мм-диапазона / 2-я Междунар. конф. "Спутниковая связь". Т. II. — Москва. — 1996. — С. 145.
4. Yatsunenkov A. G., Privalov E. N., Prokhorov E. F. Solid-state millimeter-wave devices based on waveguide integration technology, proceedings / 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. — Kiev (Ukraine). — 1995. — P. 154—158.
5. Привалов Е. Н. О собственной добротности биконического резонатора / В кн.: Электродинамика и физика СВЧ. — Днепропетровск: ДГУ, 1983. — С. 45—48.