

В. И. ЮРЧЕНКО, к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН

Россия, г. Томск, НИИ полупроводниковых приборов
E-mail: vot@mail.tomsknet.ru

Дата поступления в редакцию
21.04—19.09 2003 г.

Оппонент д. т. н. К. С. СУНДУЧКОВ
(ГП "Укркосмос", г. Киев)

ГЕНЕРИРУЮЩИЕ СТРУКТУРЫ В ВИДЕ ГИС С ЭЛЕМЕНТАМИ МИКРОМЕХАНИКИ

Продемонстрирована возможность применения микромеханических подстроечных элементов при создании генераторных структур на диодах Ганна.

Твердотельные генераторы на диодах Ганна СВЧ- и КВЧ-диапазонов применяются весьма широко: в качестве гетеродинов бортовых радиолокационных систем, генераторов накачки полупроводниковых параметрических усилителей, источников физиологически активных частот и информационных сигналов в КВЧ-терапии [1], выполненных в виде миниатюрных аппликаторов и автономных устройств. В автодинном режиме [2, 3] они применяются в качестве датчиков присутствия, радиовзрывателей, измерителей параметров и характеристик подвижных объектов, а также в измерительной аппаратуре [4]. К настоящему времени в НИИПП накоплен достаточно богатый опыт создания и практического применения автогенераторов и автодинных генераторов.

Разработка генерирующих структур в виде гибридно-интегральных схем (ГИС) с элементами микромеханики позволяет реализовать такие их преимущества как малая масса, простота изготовления и настройки на заданные электрические параметры. Основными задачами при их создании являются увеличение КПД за счет оптимального согласования активного элемента диода Ганна с полем резонатора и повышение температурной стабильности частоты. Основой для создания ГИС СВЧ- и КВЧ-диапазонов служат диоды Ганна (ДГ), обеспечивающие генерацию и преобразование сигналов, а также разнообразные типы линий передачи.

Конструктивно ГИС состоят из диэлектрической подложки и корпусного или бескорпусного ДГ. На подложке формируется пассивная часть схемы, включающая отрезки микропо-

лосковых линий передач, резонаторы, трансформаторы, выходные линии передач, ФНЧ-цепи питания и контактные площадки. Для настройки на заданные частоту и выходную мощность используют серии шлейфов, расположенных вблизи резонатора и выходной линии передачи, с последующим их подсоединением с помощью механического лепестка, при этом всегда есть возможность возврата к исходному состоянию в случае смены генераторного диода.

На рис. 1 [5, 6] приведены конструкции ГИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн с элементами микромеханики. Корпусный ДГ монтируется через отверстие в подложке в микрополосковый резонатор на металлическое основание-теплоотвод и располагается в пучности электромагнитной волны. Длина резонатора обычно выбирается с учетом реактивности ДГ, равной половине рабочей длины волны, распространяющейся в микрополосковой линии передачи. Это предотвращает возникновение многочастотного режима генерации или перескоков частоты при изменении температуры окружающей сре-

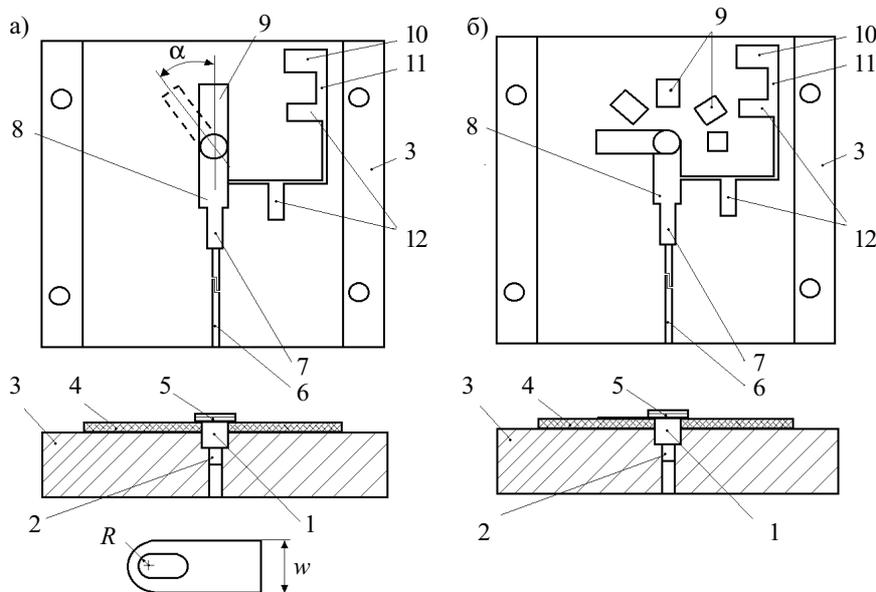


Рис. 1. ГИС СВЧ на корпусном диоде Ганна (сечение со стороны выхода) с плавной (а) и дискретной (б) настройкой по частоте:

1 — диод Ганна; 2 — кристаллодержатель диода; 3 — металлическое основание-теплоотвод; 4 — диэлектрическая подложка; 5 — подвижный контактный лепесток (R — радиус отверстия; w — ширина); 6 — выходная линия передачи; 7, 8 — трансформирующий отрезок МПЛ передачи; 9 — элементы настройки ГИС; 10, 11, 12 — цепь питания ГИС

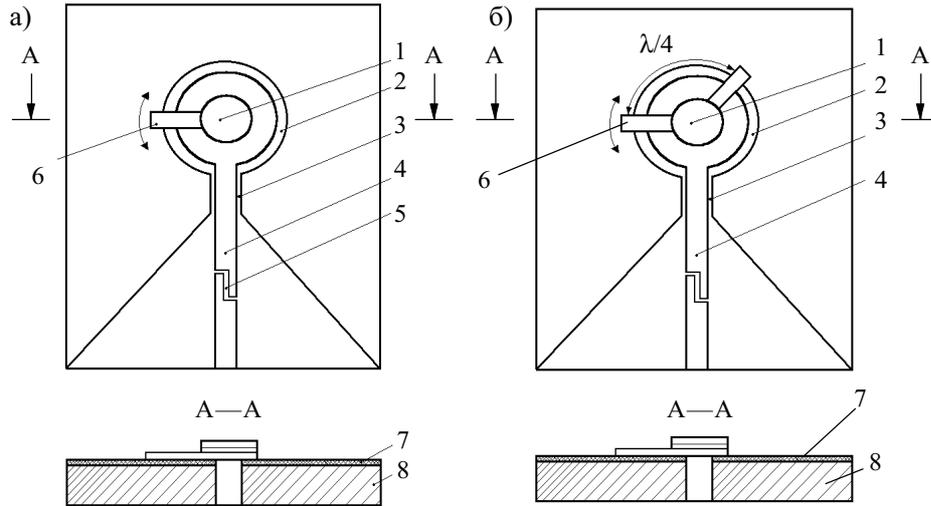


Рис. 2. Конструкции ГИС КВЧ на кольцевом щелевом резонаторе: 1 — корпусной диод Ганна; 2 — кольцевой щелевой резонатор; 3 — трансформирующий отрезок на копланарной линии передачи; 4 — выходная линия передачи; 5 — конструктивная емкость для развязки по цепи питания; 6 — подвижный контактный лепесток; 7 — диэлектрическая подложка; 8 — основание-теплоотвод

ды и напряжения питания диода. Волновое сопротивление резонансного отрезка МПЛ выбирается из соотношения $Z_p = (10-30)R_0$, где R_0 — активное сопротивление диода Ганна на начальном участке вольт-амперной характеристики при токе 10 мА.

Наименьшими ограничениями на геометрические размеры при приемлемых волновых сопротивлениях для создания резонансных систем ГИС КВЧ обладают планарные разновидности полосковых линий передачи — щелевая (ЩПЛ) и копланарная (КПЛ). Эти линии характеризуются наличием металлических проводников, нанесенных на одну поверхность диэлектрической подложки и разделенных щелями, причем электромагнитная волна распространяется вдоль щелей. Потери в этих линиях ниже по сравнению с МПЛ, т. к. токи в ЩПЛ и КПЛ рассредоточены по большей поверхности. Авторами впервые были созданы генераторные ГИС на ЩПЛ и КПЛ передачи, конструкции которых приведены на рис. 2 [7—9] с использованием микромеханических подвижных контактных лепестков.

На рис. 2, б представлена конструкция стабилизированной ГИС КВЧ с автокомпенсацией температурных изменений частоты. Диод Ганна одновременно включен в две точки кольцевого щелевого резонатора с помощью микромеханических подвижных контактных лепестков, отстоящих друг от друга на $\lambda/4$.

Разработана также копланарная линия передачи, предназначенная для использования в ГИС с повышенным выделением тепла на теплопроводящих диэлектрических подложках типа "элантинит" и "теплонит". В работах [10—12] отмечено, что подобная линия передачи имеет большие потери, связанные с возникновением электромагнитной волны в объеме диэлектрика между металлическими плоскостями. Этот эффект связан с тем, что фазовая скорость распространения волны в диэлектрике $c/\sqrt{\epsilon}$ меньше фазовой скорости распространения волны в копланарной

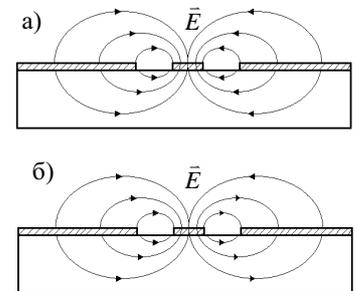


Рис. 3. Структура электрической составляющей поля в КПЛ при параллельном (а) и последовательном (б) возбуждении

линии $c\sqrt{2/(\epsilon+1)}$ (рис. 3), где c — скорость света, ϵ — диэлектрическая проницаемость подложки. Фронт волны, распространяющийся в диэлектрике, расположен по отношению к копланарной линии под углом $\theta = \arccos\sqrt{(\epsilon+1)/2\epsilon}$. При данном механизме распространения электромагнитной волны до трети энергии теряется на излучение в подложку.

С целью уменьшения потерь КВЧ-энергии была разработана разновидность копланарной линии. Она отличается от обычной линии передачи наличием в объеме подложки двух металлических экранов, расположенных эквидистантно относительно краев щели копланарной линии [9]. Расстояние от экрана до края щели при линейном резонаторе выбиралось так, чтобы электромагнитная волна, распространяющаяся в диэлектрике, отразившись от экрана, совпала бы по фазе с волной, распространяющейся в копланарной линии вдоль щелей. Решая тригонометрическую задачу с учетом значений фазовых скоростей распространения электромагнитных волн в линии и в диэлектрике подложки, получаем для расстояния от экрана до края щели прямолинейного отрезка линии передачи выражение

$$b_{\text{н}} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\frac{\epsilon-1}{2\epsilon}},$$

где f — частота колебаний электромагнитной волны.

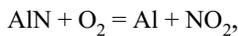
Уменьшение потерь тем выше, чем ближе расположен экран к копланарной линии, т. е. чем меньше зазор.

В случае включения ДГ в кольцевой щелевой резонатор повышение добротности резонатора достигается за счет уменьшения потерь в диэлектрической подложке, а токопроводящий экран в ее объеме формируется на расстоянии

$$b_k = R \left(1 + \frac{c^2}{16f^2 R^2 \epsilon} + \frac{c\sqrt{(\epsilon-1)/2\epsilon}}{2f\sqrt{\epsilon}} \right)^{1/2}.$$

Экран сформирован перпендикулярно плоскости подложки в виде канавки на всем протяжении и эквидистантен относительно границы топологии резонансной системы ГИС в узлах электрической составляющей поля стоячей волны. Расположение экрана в узлах электрической составляющей электромагнитного поля является оптимальным, поскольку в противном случае появляются токи КВЧ, замыкающиеся через канавку экрана, которые приведут к дополнительным потерям [10, 12].

Для проверки правильности приведенных выше соотношений была экспериментально исследована зависимость затухания КВЧ-энергии в разработанной копланарной линии от расстояния между щелями и экранами. Экраны формировались в объеме подложки (элантинит) при помощи лазера установки ЭМ-220 с плотностью падающей мощности на поверхности подложки не менее 10^5 Вт/см². Воздействие лазерного излучения на подложку в воздушной среде приводит к реакции диссоциации алюминия



который осаждается на стенках канавки, прорезаемой лазерным лучом. Геометрические размеры канавки и толщина слоя металлизации определяются интенсивностью луча лазера и его фокусировкой.

Исследования проведены в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн с помощью панорамного измерителя Р2-65 и двух измерительных переходов с коэффициентом стоячей волны по напряжению меньше 1,2. Установлено, что при длине линии передачи 10 мм разность значений потерь КВЧ-энергии в копланарной линии с оптимальным и неоптимальным расстояниями от экранов до щелей составляет 8—10 дБ, причем значения оптимальных расстояний совпали с расчетными с точностью до 3—5% в зависимости от рабочей частоты.

Реализация ГИС на фиксированную частоту наиболее доступна, однако для обеспечения тактико-технических требований комплексированного радиоэлектронного блока радиолокационной системы необходима их работа в режимах частотной и амплитудной модуляции, импульсном режиме, а также повышенная стабильность частоты, что, наряду с повышением рабочего диапазона частот, является также насущной проблемой.

В 8-миллиметровом диапазоне длин волн выходная мощность ГИС составляет 25—30 мВт при КПД до 4%, в 6-миллиметровом диапазоне уменьшается до 10 мВт и в 5-миллиметровом — до 3 мВт с соответствующим уменьшением КПД при потребляемой мощности ДГ не более 0,4 Вт. Значения температурных коэффициентов частоты и мощности составляют 2—4 МГц/°С и 0,025 дБ/°С в диапазоне температур от -60 до +70°С, соответственно [9, 10].

Между внешним проводником кольцевого щелевого резонатора (КЩР) и ДГ подвижный лепесток обеспечивает постоянный омический контакт между диодом и внешним проводником КЩР. Тем самым лепесток является элементом включения диода Ганна в резонатор, а при его вращении вокруг оси диода меняется фазовая картина электромагнитного поля в резонаторе. Мощность отводится в нагрузку посред-

ством копланарного шлейфа и выходной линии передачи. Питание на диод Ганна подается через металлическое основание и внешний проводник КЩР. Максимальный КПД обеспечивается оптимальным согласованием ДГ с резонатором и нагрузкой за счет плавной и широкодиапазонной регулировки волнового сопротивления отрезка копланарной линии, образующей шлейф.

В КПЛ возможно возбуждение двух типов электромагнитных волн, соответствующих параллельному или последовательному направлению электрических составляющих электромагнитного поля в ЩПЛ, образующих КПЛ (рис. 3). В первом случае центральный полосок КПЛ имеет потенциал, отличный от равного потенциала боковых проводников КПЛ, и поэтому

$$C_{\text{л}} = 2C_{\text{щ}}; L_{\text{л}} = \frac{L_{\text{щ}}}{2}; Z_{\text{л}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_{\text{щ}}}{C_{\text{щ}}}},$$

где $C_{\text{л}}$, $C_{\text{щ}}$ — погонные емкости КПЛ и ЩПЛ, образующих КПЛ;
 $L_{\text{л}}$, $L_{\text{щ}}$ — погонные индуктивности КПЛ и ЩПЛ;
 $Z_{\text{л}}$ — волновое сопротивление КПЛ,

а для другого случая центральный полосок КПЛ имеет потенциал, промежуточный между потенциалами боковых металлических проводников КПЛ, и тогда

$$C_{\text{л}} = \frac{C_{\text{щ}}}{2}; L_{\text{л}} = 2L_{\text{щ}}; Z_{\text{л}} = 2 \sqrt{\frac{L_{\text{щ}}}{C_{\text{щ}}}},$$

т. е. в четыре раза больше, чем в первом случае. Очевидно, волновое сопротивление КПЛ может иметь и любые промежуточные значения.

В разработанной ГИС КВЧ путем изменения положения лепестка в ЩКР регулируется структура электромагнитного поля в копланарном шлейфе и тем самым изменяется его волновое сопротивление, что обеспечивает эффективное согласование диода Ганна практически с любой нагрузкой.

С целью определения эффективности технического решения были изготовлены ГИС в 8-миллиметровом диапазоне длин волн на слаботочных (до 100 мА) диодах 3А768 в корпусе "Тракт". ГИС обеспечивали выходную мощность 10—20 мВт при КПД до 6%, что в среднем на 20—30% превысило КПД этих же диодов в волноводной конструкции [9].

Применение КЩР оказалось весьма перспективным при создании другого типа ГИС — с повышенной стабильностью частоты.

Известные способы стабилизации частоты ГИС заключаются в применении различного рода диэлектрических резонаторов (ДР) с положительным ТКЧ. В качестве материала ДР используются различные диэлектрики, в частности, рутил. При тщательной настройке, заключающейся в оптимизации коэффициента связи ДР и резонатора с ДГ, достигается уменьшение ТКЧ примерно на порядок [12].

В разработанных авторами конструкциях ГИС (см. рис. 2, а, б) в простейшем случае, без учета нагрузки, частота генерации определяется электрической длиной резонатора:

$$l_3 = \frac{n\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2\pi} \arctg \frac{Z_{\text{л}}}{Z_{\text{п}}},$$

где n — целое число;

λ — длина волны в кольцевом щелевом резонаторе;

Z_d — реактивное сопротивление диода Ганна;

Z_p — волновое сопротивление отрезка линии передачи, образующей резонатор.

В случае одновременного включения диода Ганна в КЩР с помощью второго лепестка, расположенного на расстоянии $\lambda/4$ от первого, электрическая длина кольцевого щелевого резонатора определяется соотношением

$$l_3 = \frac{n\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2\pi} \left[\arctg \frac{Z_d}{Z_p} + \operatorname{arccctg} \left(\frac{Z_d}{Z_p} + \varphi \right) \right] = \frac{\lambda}{4} (2n-1) = \text{const}$$

при любых изменениях реактивного сопротивления диода Ганна (φ — фазовое расстояние между элементами включения диода).

Применение в ГИС резонатора на отрезке кольцевой щелевой линии передачи с одновременным включением ДГ в две точки КЩР делает возможной полную компенсацию ухода частоты генератора за счет автокомпенсации реактивной составляющей проводимости диода Ганна. В случае небольшого изменения расстояния между лепестками относительно $\lambda/4$ удается полностью скомпенсировать дестабилизирующее влияние пассивной части модуля [9].

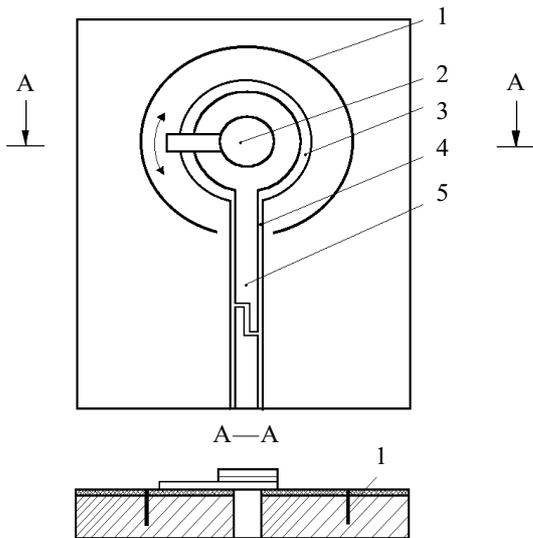


Рис. 4. Стабилизированная ГИС КВЧ:

1 — токопроводящий экран, сформированный в объеме подложки; 2 — корпусный диод Ганна; 3 — щелевой кольцевой резонатор; 4 — трансформатор; 5 — выходная линия передачи

Повышение стабильности частоты ГИС достигается также и включением ДГ в высокочастотный КЩР [8] (рис. 4). Повышение добротности резонатора достигается уменьшением потерь электромагнитной энергии в подложке ГИС, для чего в ее объеме на определенном расстоянии формируется токопроводящий экран.

Настройка изготовленных ГИС проводилась в импульсном режиме с использованием анализатора спектра С4-60, стробоскопического осциллографа, прямоотсчетного цифрового частотомера РЧЗ-73 (рабочий диапазон от 37 до 118 ГГц), что позволяет изме-

рять внутримпульсную девиацию частоты в течение воздействия питающего импульса с погрешностью не более 0,05%. На низкоомную нагрузку (0,3—1,6 Ом) модулятор обеспечивал плавную регулировку амплитуды до 30 В со скважностью модулирующего импульса 100—1000 с дискретной регулировкой частоты повторения и длительности импульса. Для исследованных ГИС восьмимиллиметрового диапазона получено уменьшение паразитной внутримпульсной девиации частоты до 30 раз. В таком же соотношении уменьшалось значение ТКЧ; для настроенных ГИС оно составило $(0,5...2) \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$.

Анализ показывает, что возможности построения ГИС на планарных линиях передачи с использованием рассмотренных конструктивных приемов далеко не исчерпаны [13].

Таким образом, найдены пути и технологические приемы изготовления экранированных щелевых и копланарных линий, позволяющие оптимизировать их параметры по волновому сопротивлению и потерям. Определены микромеханические конструктивные элементы ГИС, позволяющие компенсировать температурные изменения параметров ДГ и, соответственно, реализовать генераторные ГИС, высокостабильные при изменении температуры окружающей среды.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. Устройства КВЧ и оптического диапазонов длин волн для физиотерапии // Электронная промышленность. — 1998. — Вып. 1—2. — С. 178—181.
2. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Приемопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем // Электронная техника. Сер. СВЧ. — 1993. — Вып. 4. — С. 70—72.
3. Воторопин С. Д., Юрченко В. И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность. — 1998. — Вып. 1—2. — С. 110—115.
4. Бузыкин В. Т., Веснин В. Н., Воторопин С. Д. и др. Автодинные СВЧ-датчики для бесконтактных измерений и контроля / Сб. докл. III конф. "КрыМиКо-92". — Севастополь. — 1992. — С. 159—164.
5. А. с. 1204107 СССР. Микрополосковый генератор / С. Д. Воторопин, С. В. Кулешов. — 08.09.85.
6. А. с. 749344 СССР. Микрополосковый генератор / С. Д. Воторопин, М. С. Егунов, Б. А. Наливайко. — 21.03.80.
7. Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. Экспериментальное исследование генераторных модулей на планарных линиях передач // Электронная техника. Сер. СВЧ. — 1987. — Вып. 10. — С. 67—70.
8. А. с. 260641 СССР. СВЧ генератор / С. Д. Воторопин, А. М. Кожемякин. — 01.09.87.
9. Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. Высокостабильный генератор на диоде Ганна // Сб. докл. Межотраслевой НТК. — Горький. — 1988. — С. 23—24.
10. Воторопин С. Д. Гибридно-интегральные схемы КВЧ на диодах Ганна / Сб. докл. V Междунар. конф. АПЭП-2000. — Новосибирск. — 2000. — С. 114—116.
11. Воторопин С. Д. ГИС КВЧ на диодах Ганна / Сб. докл. X Междунар. конф. "КрыМиКо-2000". — Севастополь. — 2000. — С. 141—142.
12. Воторопин С. Д. Активные ГИС КВЧ на планарных линиях передачи / Сб. докл. V Междунар. НТК "Физика и технические приложения волновых процессов". — Самара. — 2001. — С. 21—23.
13. Юрченко В. И. Микромеханические устройства СВЧ диапазона / Мат-лы 14-й Всерос. конф. по использованию синхротронного излучения (СИ-2002). — Новосибирск. — 2002. — С. 135.