

К. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН

Россия, г. Томск, НИИ полупроводниковых приборов
E-mail: Votoropin@mail.tomsknet.ruДата поступления в редакцию
06.02.2006 г.Оппонент В. И. МАЙ
(НПП "Сатурн", г. Киев)

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АВТОДИННЫХ ГИС КВЧ НА ДИОДАХ ГАННА

Рассмотрено конструирование основных узлов и элементов автодинных генераторов в гибридно-интегральном исполнении и технология их изготовления.

Автодинные генераторы (автодины) представляют собой приемо-передающие устройства, которые выполняют одновременно функции передатчика, приемника, усилителя и детектора отраженного сигнала [1—3]. Поэтому автодинный принцип построения разнообразных приборов (систем) СВЧ по сравнению с другими (гомодинным, гетеродинным) позволяет создавать высокочувствительные устройства с наиболее простым, миниатюрным и дешевым СВЧ-модулем. Анализ режимов их функционирования посвящены работы [4—7].

Автодины применяются в различных областях науки и техники — радиоспектроскопии, измерительной технике для определения физических характеристик веществ и экспресс-анализа параметров технологических процессов. Особенно широкое применение автодины получили в системах ближней радиолокации. Миниатюризация и низкая стоимость автодинов достигается использованием технологии гибридно-интегральных схем (ГИС).

Конструктивно-технологические особенности узлов автодинных ГИС [8—13]

Анализ конструкций гибридно-интегральных схем на микрополосковых линиях передач выявил две основные причины, препятствующие созданию автодинных ГИС крайне высоких частот (КВЧ) на микрополосковых линиях (МПЛ) передачи:

— чрезмерное уменьшение линейных размеров топологии ГИС, что создает трудности для монтажа кристалла корпусных активных компонентов;

— увеличение потерь на излучение в МПЛ, ее резонансных отрезках, а также потерь в объеме диэлектрической подложки.

Конструктивно ГИС СВЧ- и КВЧ-диапазонов состоят из платы (диэлектрической подложки) и корпусного или бескорпусного активного элемента (кристалла, чипа), которые изготавливаются отдельно. На плате формируется пассивная часть схемы, включающая отрезки микрополосковых линий передач, выполняющих функции резонаторов, трансформаторов, выходных линий передач, фильтр нижних частот цепи питания, контактные площадки. Плата ГИС изготов-

ливается методом тонкопленочной технологии на диэлектрической подложке. Технология изготовления платы включает вакуумное послойное напыление пленок "хром—медь—никель" или "хром—золото" с последующей фотолитографией, гравировкой и электрохимическим осаждением золота. В качестве материала подложки используется поликор, предпочтительный благодаря его высоким электрофизическим параметрам и механической прочности; реже используется элантинит, теплонит, кварц, сапфир и другие диэлектрики.

Создание ГИС с требуемыми параметрами в диапазоне крайне высоких частот натолкнулось на значительные трудности, что, очевидно, связано с отсутствием эффективных методов анализа конструкций ГИС КВЧ или недостаточной разработанностью имеющихся. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Наименьшими ограничениями на геометрические размеры при приемлемых волновых сопротивлениях для создания резонансных систем ГИС КВЧ обладают планарные разновидности полосковых линий передач — 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. Копланарная и щелевая полосковые линии передач, а также их разновидности, довольно широко используются при создании СВЧ- и КВЧ-смесителей, модуляторов, переключателей, гибридных мостов и пр. Эти линии передач используются и при разработке невзаимных устройств на ферритовых подложках, поскольку продольные и поперечные компоненты H -волны сдвинуты по фазе на 90° и магнитное поле в линии эллиптически поляризовано. В подобных конструкциях смесительные, детекторные и управляющие диоды, как правило, монтируются на проводник полосковой линии и связываются с ней посредством петли связи, образованной проводником, пересекающим ее зазор. Потери в этих линиях ниже по сравнению с МПЛ, т. к. токи в ЩПЛ и КПЛ рассредоточены по большей поверхности.

Однако в отличие от преобразовательных пассивных ГИС, автодинные генераторные модули характеризуются сравнительно большим уровнем потребляемой мощности по цепи питания. Это приводит к существенным ограничениям на возможность использования того или иного материала подложки, обус-

лавливает необходимость уменьшения толщины подложки и выбора способа ее монтажа на основание-теплоотвод.

Активные нелинейные элементы автодинных ГИС на диодах Ганна

Для изготовления полупроводникового кристалла диода Ганна используется четырехслойная эпитаксиальная структура арсенида галлия (ЭСАГ) типа $n^{++}n^{+}nn^{+}$, где n^{++} — высоколегированная подложка толщиной, как правило, 300 мкм с концентрацией носителей заряда $N \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; n^{+} — буферный эпитаксиальный слой, предотвращающий проникновение дефектов из подложки в активный n -слой; n — активный слой толщиной 1,5—3 мкм с концентрацией $N=10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$; n^{+} — контактный эпитаксиальный слой, предотвращающий нарушение n -слоя при формировании омического контакта.

Концентрация носителей N и толщина активного слоя d_n связаны между собой и с частотой генерации f соотношениями $N/f > 2 (1,5 \dots 6) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$; $10^{10} \text{ см}^{-2} < Nd_n < 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, которые следуют из анализа процессов формирования и рассасывания области объемного заряда в активной области диода Ганна.

При изготовлении кристалла диода применяются технологические процессы вакуумного напыления сплава "золото—германий" для формирования омического контакта, фотолитографии, формирования мезаструктуры, электрохимического осаждения золота. Продолжительность технологического цикла составляет 10—15 дней.

В настоящее время применяются два способа монтажа кристалла — прямой и обратный. В первом случае анодным электродом диода является его корпус, во втором — крышка. Обе конструкции диодов приведены на рис. 1. Последний вариант имеет меньшее тепловое сопротивление. Размеры кристаллов $200 \times 200 \times 70$ мкм, площадь мезаструктуры 2000—20000 мкм².

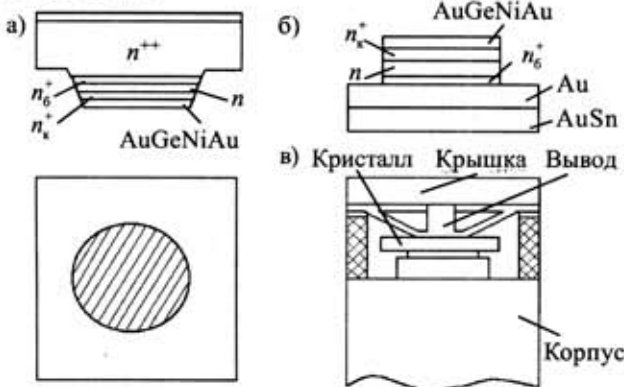


Рис. 1. Конструкция кристалла диода Ганна на сэндвич-структуре для обратного (а), прямого (б) монтажа и "кристалл в корпусе" (в, обратный монтаж)

Размещение и монтаж кристалла на подложке должен обеспечивать тепловой режим активной мезаструктуры и включение ее в электромагнитное поле резонатора. При разработке диодов Ганна на кристалле традиционно формируют мезаструктуру круглой формы, представленную на рис. 1, а. При создании ГИС КВЧ были разработаны кристаллы с тре-

угольной, квадратной и прямоугольной формой мезаструктур (рис. 2). При этом были созданы кристаллы диодов Ганна на сильно легированных подложках GaAs типа АГЭТ с планарными катодным и анодным электродами [7—9].

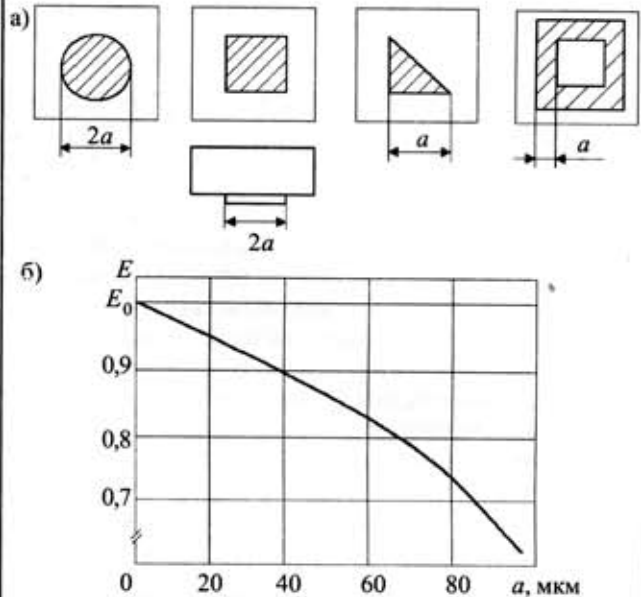


Рис. 2. Конфигурация мезаструктур активных элементов диодов Ганна (а) и зависимость средней интегральной напряженности поля E (б)

Оценка эффективности кристаллов с различной формой мезаструктур проводилась в предположении малости геометрических размеров кристалла по сравнению с рабочей длиной волны, т. е. из расчета однородности напряженности поля по его площади.

Для оценки эффективности работы мезаструктуры определим усредненную интегральную напряженность поля внутри его активного слоя в зависимости от формы мезаструктуры при сохранении ее площади. С учетом скин-эффекта имеем:

$$E = \frac{E_0}{S_0} \iint_S e^{-\beta x} dS, \quad (1)$$

где E_0 — напряженность поля на внешней границе мезаструктуры;
 S_0 — площадь мезаструктуры;
 β — декремент затухания — $\beta = (\pi \mu_0 \sigma f)^{1/2}$;
 σ — проводимость активного слоя — $\sigma = q n \mu$;
 q — элементарный заряд — $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$;
 n — концентрация носителей заряда в активном слое — $n = 6 \cdot 10^{15} \dots 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
 μ_0 — магнитная постоянная — $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$;
 μ — подвижность электронов активного слоя — $\mu \approx 6000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;
 f — рабочая частота;
 x — текущее расстояние от границы мезаструктуры до ее центра или центральной оси (в случае прямоугольной мезаструктуры).

Для кристалла с круглой формой мезаструктуры для значения средней интегральной напряженности поля имеем:

$$E_{\text{ср}} = E_0 \frac{1 - e^{-\beta r}}{\beta r}, \quad (2)$$

а для прямоугольной —

$$E_{\text{пр}} = E_0 \frac{1 - e^{-\beta a}}{\beta a}, \quad (3)$$

где r — радиус круглой мезаструктуры;

a — половина наименьшей стороны прямоугольной мезаструктуры.

Для обеспечения механической прочности кристалла размер a должен быть не менее 25 мкм.

Проведенные расчеты показали, что значение средней интегральной напряженности поля прямоугольной мезаструктуры, как правило, на 30—40% превышает ее значение для круглой формы мезаструктуры. На рис. 2, б приведены зависимости средней интегральной напряженности поля E в единицах E_0 для мезаструктур различной формы и конкретных параметров активного слоя кристалла. Экспериментальные исследования диодов Ганна показали, что КПД диодов с прямоугольной, квадратной и треугольной формой превышает КПД диодов с круглой мезаструктурой на величину до 40%. Это объясняется влиянием скин-эффекта с учетом квадратичной зависимости КПД диода Ганна от напряженности поля на нем, а также некоторым облегчением теплового режима кристалла.

Тепловой расчет гибридно-интегральной схемы

С целью правильного выбора материала подложки необходимо провести тепловой расчет конструкции ГИС, в ходе которого определяется температура активного слоя кристалла, в значительной степени влияющая на основные электрические параметры ГИС, ее надежность и предельные режимы эксплуатации. Моделью для расчета служит конструкция, изображенная на рис. 3.

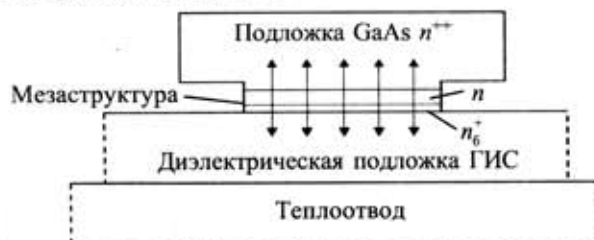


Рис. 3. Модель для теплового расчета

Температура активного слоя кристалла определяется выражением

$$T_{\text{ас}} = T_0 + P \sum_{i=1}^N R_i, \quad (4)$$

где T_0 — температура окружающей среды;

P — мощность, потребляемая активной областью кристалла;

R_i — тепловые сопротивления различных слоев.

Тепловое сопротивление структуры складывается из тепловых сопротивлений различных слоев:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N R_i = R_0 + R_{\text{д}} + R_{\text{к}} + R_{\text{ас}}, \quad (5)$$

где $R_0 + R_{\text{д}}$ — тепловое сопротивление основания-теплоотвода;

$R_{\text{к}}$ — тепловое сопротивление контактного n^+ -слоя;

$R_{\text{ас}}$ — тепловое сопротивление активного n -слоя.

Значения $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{ас}}$ определяются согласно известному уравнению теплопроводности для цилиндра:

$$R_{\text{к}} = d/\lambda_{\text{к}} S; R_{\text{ас}} = d/2\lambda_{\text{ас}} S, \quad (6)$$

где $d, \lambda_{\text{к}}$ — толщина и теплопроводность контактного слоя;

$d, \lambda_{\text{ас}}$ — толщина и теплопроводность активного слоя;

S — площадь мезаструктуры.

Определение значений R_0 и $R_{\text{д}}$ сводится к решению уравнения Лапласа с граничными условиями, определяемыми положением и размерами активного элемента, подложки и теплоотвода. Для цилиндрического диэлектрика эта задача решена в [14, 15], а результаты изображены на рис. 4. Значение $R_0 = 1/\pi r \lambda_{\text{т}}$, где r — радиус мезаструктуры; $\lambda_{\text{т}}$ — теплопроводность основания-теплоотвода.

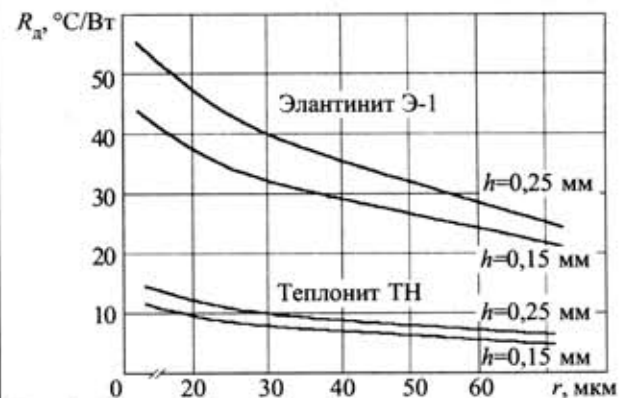


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления подложки цилиндрической формы диаметром 3 мм от размера мезаструктуры (h — толщина подложки)

Расчет, выполненный согласно приведенным соотношениям, показывает, что рассматриваемая конструкция работоспособна только при использовании материала подложки с повышенной теплопроводностью. В качестве таких материалов можно использовать “Элантинит-1” (Э-1), “Теплонит” (ТН), окись бериллия или глубоко прокисленный сплав алюминия типа АМГТ. Подложки Э-1 (элантинит, нитал) изготавливаются из поликристаллического нитрида алюминия и имеют теплопроводность до 100 Вт/(м·К), что в три раза превышает теплопроводность поликорровой подложки. Подложки ТН (теплонит) изготавливаются на основе нитрида бора и имеют теплопроводность 400—700 Вт/(м·К). Подложки из окиси бериллия также серийно освоены, но токсичны, что предполагает их обработку со специальными мерами защиты и ограничивает применение.

Результаты расчета теплового сопротивления конструкции ГИС согласно изложенной методике [16] приведены в таблице.

Параметр	Тепловое сопротивление, К/Вт	Элемент конструкции ГИС
$R_{\text{ас}}$	4—7	Активный слой кристалла
$R_{\text{к}}$	3—6	Контактный слой кристалла
R_0	1—3	Основание-теплоотвод
$R_{\text{д}}$	25—40	Диэлектрическая подложка
Суммарное тепловое сопротивление R_{Σ}	33—50	

Принимая предельную рабочую температуру ГИС равной 230°C и температуру окружающей среды $+70^{\circ}\text{C}$, получаем, что при использовании материала подложки Э-1 при ее толщине $0,15\text{--}0,25\text{ мм}$ потребляемая мощность активного элемента ГИС ограничена $2\text{--}3\text{ Вт}$, а при использовании подложки ТН возможно применение активных элементов ГИС мощностью до 8 Вт .

Однако для определения возможности применения диэлектрической подложки в ГИС КВЧ необходимо учитывать и значения ее основных электрофизических параметров, а также стойкость к механическим перегрузкам. Для подложки Э-1 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=7,5\text{--}8$ при тангенсе угла диэлектрических потерь в КВЧ-диапазоне $\text{tg}\delta=5\cdot 10^{-4}\text{--}1\cdot 10^{-3}$.

Вопросы теплового анализа диодов Ганна и конструкций ГИС, их использующих, рассмотрены в работах [14, 15, 17, 18]. Согласно этим данным тепловое сопротивление диода Ганна, выполненного способом "обратного монтажа" (катодный электрод кристалла смонтирован термоэлектровзвучковой сваркой на пьедестале кристаллодержателя-теплоотвода), составляет $20\text{--}30\text{ К/Вт}$ и послойно распределено следующим образом: n -слой — $5\text{--}12\text{ К/Вт}$; n^+ -слой — $5\text{--}10\text{ К/Вт}$; теплоотвод — $3\text{--}7\text{ К/Вт}$.

Расчеты [1, 2, 14, 15, 17, 18] показывают, что значительный вклад в величину теплового сопротивления диода Ганна вносит n^+ -слой в случае его монтажа на кристаллодержатель.

Электродинамический анализ планарных линий передач

Планарные линии широко используются при создании различного рода преобразователей частоты, а также при создании пассивных цепей КВЧ-устройств, что связано с высокой технологичностью и возможностью эффективной подстройки ГИС на этих линиях передачи [19, 20]. Но при использовании навесных полупроводниковых элементов с большим выделением тепла необходимо монтировать диэлектрическую подложку с планарной линией на металлическое основание-теплоотвод. В этом случае нарушается структура электромагнитной волны, распространяющейся в линии, изменяются ее характеристики.

Большое значение для правильного построения ГИС КВЧ имеет электродинамический анализ используемых линий передачи. Имеется множество работ, в которых подробно рассмотрена микрополосковая, щелевая полосковая, копланарная полосковая и более сложные конфигурации линий передачи. Однако часто приходится применять новые разновидности линий передачи. А поскольку строгий электродинамический анализ связан со значительными затратами времени, то более практичны сравнительно простые численные методы.

Аналитические методы электродинамического анализа связаны с решением в общем случае уравнения второго порядка в частных производных с известными начальными и граничными условиями. В качестве методов решения подобных уравнений наиболее часто применяются метод разделения переменных, метод конечных интегральных преобразований, метод функций Грина, операционный метод и метод конеч-

ных разностей (метод сеток). Первые три метода применимы только для решения линейных дифференциальных уравнений с линейными граничными условиями, что сильно ограничивает область их применения. Метод функций Грина связан со сложными аналитическими построениями.

Универсальным методом решения дифференциальных уравнений (с точностью, достаточной для инженерного расчета), не связанным со сложными аналитическими выкладками, является метод конечных разностей. В этом случае исходное дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений, число которых равно числу узлов сеточной функции. Полученная система уравнений с соответствующими сеточными начальными и граничными условиями решается с помощью вычислительной техники. Подобный метод решения был применен для анализа одной из разновидностей копланарной линии [21]. Он оказался достаточно простым и точным по сравнению с традиционными методами анализа, например [22]. Но в случае, когда конструкция ГИС КВЧ не отличается новизной, оправданы простые инженерные методы расчета.

Следует отметить, что приближения подобных расчетов в части описания нелинейности вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик диода Ганна, а также отсутствие модели, описывающей инерционные механизмы эффекта Ганна, приводят к не совсем корректному применению этого подхода для ГИС КВЧ-диапазона.

Применительно к расчету ГИС КВЧ-диапазона в работе [23] показано, что характеристика "скорость—поле" диода Ганна имеет существенный гистерезис, что связано с проявлением инерционных свойств механизма междолинного переноса электронов в активном слое диода. Величина гистерезиса тем больше, чем выше его рабочая частота. При пересчете характеристики "скорость—поле" в вольт-амперную характеристику диода Ганна оказывается, что при подаче на него прямого и обратного напряжения смещения пороговые токи диода на рабочей частоте 32 ГГц отличаются на 50% , что показывает важность учета этого явления в расчетах. Моделирование ВАХ диода с гистерезисом может быть проведено путем задания зависимости тока проводимости диода Ганна от скорости его изменения, что и выполнено в данной работе.

Копланарная линия передачи, предназначенная для использования в ГИС с повышенным выделением тепла на поверхности диэлектрической подложки, представлена на рис. 5. В работе [22] 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 $c/\sqrt{\epsilon}$

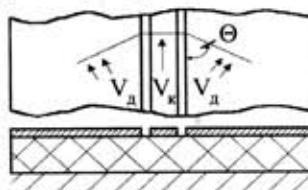


Рис. 5. Копланарная полосковая линия передачи на металлическом основании и фронт электромагнитной волны, распространяющейся в ней

меньше фазовой скорости распространения волны в копланарной линии $c\sqrt{2/(\epsilon+1)}$, где c — скорость света. Фронт волны, распространяющейся 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. Это, по-видимому, явилось основной причиной того, что данная разновидность копланарной линии практически не исследовалась.

С целью уменьшения потерь КВЧ-энергии автором была разработана разновидность копланарной линии, изображенной на рис. 5. Она отличается от предыдущей линии [11] наличием в объеме подложки двух металлических экранов, расположенных эквидистантно относительно краев щели копланарной линии [16, 24]. 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, вытекающую из рис. 6, 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

$$\epsilon_n = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\frac{\epsilon-1}{2\epsilon}}, \quad (7)$$

где f — частота колебаний электромагнитной волны.

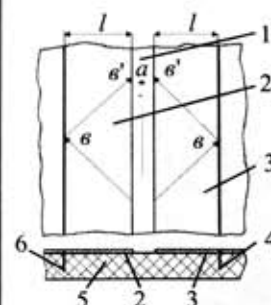


Рис. 6. Экранированная щелевая полосковая линия передачи: 1 — щелевая полосковая линия передачи; 2, 3 — металлические проводники топологии ЦПЛ; 4, 6 — металлические экраны; 5 — диэлектрическая теплопроводящая подложка «элантинит»

Эффективность данного решения тем выше, чем ближе расположен экран к копланарной линии, т. е. чем меньше зазор.

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

$$\epsilon_k = R \left(1 + \frac{c^2}{16f^2 R^2 \epsilon} + \frac{c \sqrt{(\epsilon-1)/2\epsilon}}{2f R \sqrt{\epsilon}} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где R — радиус кольцевого резонатора;
 f — рабочая частота.

Экран сформирован перпендикулярно плоскости подложки в виде канавки на всем протяжении и эквидистантен относительно границы топологии резонансной системы ГИС в узлах электрической со-

ставляющей 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].

Для проверки правильности приведенных выше соотношений, а также эффективности технического решения, 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 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 $AlN+O_2=Al+NO_2$, 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 $K_{ст} U < 1,2$. Экспериментально 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.

Использование разработанной копланарной линии передачи [16, 24] в ГИС КВЧ предусматривает определение, по крайней мере, ее волнового сопротивления и погонной емкости. В работе [22] рассмотрен численный метод решения электродинамической задачи для разновидности копланарной линии, близкой к рассматриваемой. Будучи достаточно простым, он позволяет получить характеристики копланарной линии с точностью 1—2%, что вполне достаточно для практического применения. Методика этого решения была взята за основу при анализе копланарной линии с размерами, определенными на рис. 7. Решение уравнений Максвелла для этой задачи сводится к решению уравнения Лапласа относительно потенциала ϕ как функции координат x, y с граничными условиями, определяемыми геометрией копланарной линии. Искомое значение $\phi(x, y)$ находится в виде ряда, весовые коэффициенты которого определяют вклад различных гармонических составляющих электромаг-

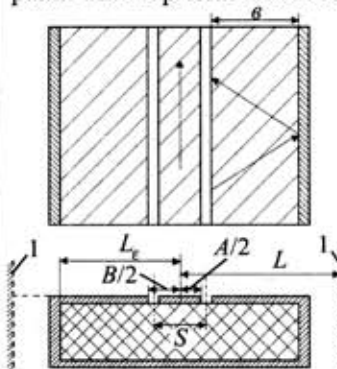


Рис. 7. КПЛ с боковыми металлическими экранами и направление распространения электромагнитной волны в ней: 1 — введенные металлические экраны для теоретического анализа КПЛ; L, L_e — расстояния от оси симметрии центрального полоска копланарной линии до экрана

нитной волны, распространяющейся в копланарной линии, в формирование функции потенциала $\varphi(x, y)$. Соответственно в воздухе:

$$\varphi_{\text{в}}(x', y') = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x') \exp(-k_i y'), \quad (9)$$

в диэлектрике:

$$\varphi_{\text{д}}(x, y) = \sum_{i=1}^N b_i \cos(k_{ie} x) \text{sh}(k_{ie} y), \quad (10)$$

где $\varphi_{\text{в}}$ — решение уравнения Лапласа относительно потенциала электромагнитной волны, распространяющейся в воздухе;

$\varphi_{\text{д}}$ — решение уравнения Лапласа относительно потенциала электромагнитной волны, распространяющейся в диэлектрике;

a_i, b_i — весовые коэффициенты решения уравнения Лапласа для соответствующих потенциалов;

k_i, k_{ie} — постоянная распространения i -й гармонической составляющей электромагнитной волны;

x', y', x, y — координаты для областей воздуха и диэлектрика, соответственно.

$$k_i = (2i-1) \frac{\pi}{2L} ; \quad k_{ie} = k_i \frac{L}{L_e}. \quad (11)$$

Граничное условие на поверхности диэлектрика сводится к равенству

$$a_i \cos(k_i x) = b_i \cos(k_{ie} x) \text{sh}(k_{ie} h), \quad (12)$$

где h — толщина подложки.

Из условия равенства тангенциальных составляющих электрического поля имеем:

$$\sum_{i=1}^N a_i k_i \cos(k_i x) + k_{ie} b_i \cos(k_{ie} x) \text{ch}(k_{ie} h) = 0 \Big|_{\frac{A}{2} < x < \frac{B}{2}} \quad (13)$$

или

$$\sum_{i=1}^N a_i k_i \cos(k_i x) [1 + L/L_e \epsilon_r \text{cth}(k_i h)] = 0, \quad (14)$$

где ϵ_r — диэлектрическая проницаемость подложки.

Учитывая, что структура поля в данной копланарной линии симметрична относительно центрального полоска и характеристики линии не зависят от амплитудных характеристик волны, полагаем его потенциал равным единице, а потенциал бокового металлического слоя равным нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \leq A/2; \\ 0 & \text{при } x \geq B/2. \end{cases} \quad (15)$$

Для решения задачи численным методом определяем значение $x_j = jL/(N+1)$, $j=1, \dots, N$ и составляем систему уравнений

$$\sum_{i=1}^N m_{ji} a_i = d_j, \quad j=1, \dots, N, \quad (16)$$

где $m_{ji} = k_i \cos(k_i x_j) [1 + L/L_e \epsilon_r \text{cth}(k_i h)]$ при $A/2 < x < B/2$;

$m_{ji} = \cos(k_i x_j)$ при $x_j \leq A/2$, $x_j \geq B/2$; $d_j = 0$ при $x_j > A/2$ и $d_j = 1$ при $x_j \leq A/2$, что вытекает из приведенных равенств.

Данная система алгебраических уравнений относительно значений a_i решалась методом Гаусса.

Определив значения a_i с учетом величины потенциала бокового проводника копланарной линии, равного 0, вычислим погонную емкость

$$C = \epsilon_0 \oint_S \epsilon_r \nabla \varphi dS = 2\epsilon_0 \sum_{i=1}^N a_i \sin[k_i (A+B)/4] \times \\ \times [1 + L/L_e \epsilon_r \text{cth}(k_i h)] \quad (17)$$

и волновое сопротивление

$$Z_0 = \frac{1}{c \sqrt{CC_0}}; \quad C_0 = C(\epsilon_r = 1). \quad (18)$$

Результаты проведенных расчетов используются при определении геометрических размеров элементов пассивной части ГИС.

Из приведенных зависимостей следует, что положение экранов существенно влияет на характеристики копланарной линии. Так, уменьшение расстояния до экрана от края щели с 1 до 0,5 мм приводит к изменению волнового сопротивления на 20—50% и погонной емкости — на 40—80%, что необходимо учитывать при конструировании ГИС.

Выводы

Рассмотрены конструкции основных узлов и элементов автодинных генераторов в гибридно-интегральном исполнении. Проведены экспериментальные исследования различных конструкций кристаллов диодов Ганна. Установлены оптимальные соотношения площадей, формы и взаимного расположения анодного и катодного контактов, сформированных в одной плоскости на эпитаксиальной структуре, выращенной высоколегированной подложке GaAs n^{++} -типа для многомезовой планарной структуры диода Ганна. Обосновано применение щелевых и копланарных полосковых линий передачи (ЩПЛ и КПЛ) в качестве резонаторов, проведен анализ экранированных ЩПЛ и КПЛ, который позволяет оптимизировать их параметры по волновому сопротивлению и потерям. Проведен тепловой расчет ГИС на основе теплопроводящей диэлектрической подложки типа нитал (AlN). Найден технологические приемы изготовления данных линий передачи, обладающих пониженными потерями на излучение, и показана эффективность применения КПЛ и ЩПЛ при создании ГИС различного назначения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Воторопин С. Д. Исследование путей создания автодинных приемопередающих модулей в диапазоне 3—8 мм: Отчет по НИР "Тамаринд" (НИИПП, г. Томск).— 1989.
2. Воторопин С. Д. Разработка автодинных датчиков 5-мм диапазона длин волн для транспортной электроники: Отчет по ОКР "Тигель" (НИИПП, г. Томск).— 1991.
3. Воторопин С. Д. Автодинные датчики КВЧ // IV Междунар. конф. "Российские технологии для индустрии. Физические, химические и биологические сенсоры".— Санкт-Петербург.— 2000.— С. В8.
4. Смольский С. М., Воторопин С. Д., Савков Н. Н. Автодинные ЧМ-локаторы КВЧ-диапазона с непрерывным излучением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 1.— С. 7—13.
5. Votoropin S. D., Noskov V. Ya. Analysis of operating regimes of EHF hybrid-integrated autodyne based on the Gunn

micro power mesa planar diodes // Russian Physics Journal.— 2002.— Vol. 45, N 2.— P. 195—206.

6. Votoropin S. D., Noskov V. Ya. General model and basic equations for an EHF autodyne HMC based on the Gunn planar mesas // Ibid.— 2001.— Vol. 44, N 12.— P. 1273—1282.

7. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Приемопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника.— 1993.— Вып. 4.— С. 70—72.

8. Пат. 2064718 РФ. Диод Ганна / С. Д. Воторопин, А. М. Кожемякин, В. И. Юрченко.— 1996.— Б. И. № 21.

9. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Автодинные ГИС на основе многослойных планарных диодов Ганна // Тр. конф. "Crimico-2004".— Севастополь.— 2004.— С. 124—127.

10. Юрченко В. И., Воторопин С. Д. Генерирующие структуры в виде ГИС с элементами микромеханики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 1.— С. 7—10.

11. Васильев Н. А., Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. и др. Исследование генераторных ГИС на диодах Ганна // Мат. межотрасл. НТК.— Горький.— 1984.— С. 39—41.

12. Воторопин С. Д. Активные ГИС КВЧ на планарных линиях передачи // V Междунар. НТК "Физика и технические приложения волновых процессов".— Самара.— 2001.— С. 16—17.

13. Воторопин С. Д. ГИС КВЧ на диодах Ганна // X Междунар. конф. "Crimico-2000".— Севастополь.— 2000.— С. 141—142.

14. Разработка генераторных диодов для работы в диапазоне частот от 52,6 до 78,9 ГГц: Отчет по ОКР "Литавр-II" (НИИПП, г. Томск).— 1983.

15. Исследование путей повышения мощности генераторных диодов 6-миллиметрового диапазона длин волн: Отчет по НИР "Трида М" (НИИПП, г. Томск).— 1983.

16. Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. Экспериментальное исследование генераторных модулей КВЧ на планарных линиях передачи // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.— 1987.— Вып. 10.— С. 66—69.

17. Гудзь И. А., Ясинский В. К. Метод измерения теплового сопротивления лавинно-пролетных диодов // Там же.— 1984.— № 9.— С. 18—23.

18. Воторопин С. Д. Разработка микрополоскового импульсного генератора Ганна см диапазона длин волн: Отчет по ОКР "Токио-I" (НИИПП, г. Томск).— 1983.

19. Арефьев А. С., Коликов В. В., Неганов В. А. Собственные волны копланарного волновода // Физика волновых процессов и радиотехнические системы.— 1999.— Т. 2, № 3-4.— С. 13—17.

20. Неганов В. А., Нефедов Е. И., Яровой Г. П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне высоких частот.— М.: Наука, 1996.

21. Rowe D. A., Lao B. Y. Numerical analysis of shielded coplanar waveguides // IEEE Trans.— 1983.— Vol. MTT-31, N 11.— P. 911—914.

22. Вайнштейн Л. А., Лесик Н. И., Кондратьев Б. В. Квазистатическая теория основной волны в щелевой линии // Радиотехника и электроника.— 1977.— Т. 22, № 9.— С. 1820—1828.

23. Curtice W. R., Purcell J. J. Analysis of the LSA mode including effects of charge and internally transfer time // IEEE Trans.— 1973.— Vol. ED-17, N 12.— P. 1048—1060.

24. А. с. 260641 СССР. СВЧ генератор / С. Д. Воторопин, А. М. Кожемякин.— 1987.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

16-я Международная Крымская Микроволновая Конференция СВЧ-ТЕХНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 11-15 сентября 2006 года, г. Севастополь

16-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии
11-15 сентября 2006г., Севастополь, Украина

КрымМуКо 2006 Crimico

September 11-15, 2006, Sevastopol, Ukraine
16th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"

В РАМКАХ КОНФЕРЕНЦИИ ПЛАНИРУЕТСЯ ПРОВЕДЕНИЕ СЕМИНАРОВ

W1 — Сети беспроводного доступа (программа формируется Севастопольским филиалом Украинского государственного центра радиочастот и предприятием "Севастополь-информ", сопредседатели — к. ф.-м. н. Каневский В. А. и к. т. н. Ермолов П. П., e-mail: vermolov@sinfo.net.ua);

W2 — Подготовка радиоинженеров и специалистов телекоммуникационного профиля (программа формируется Севастопольским национальным техническим университетом, председатель — проф. Слободянюк А. А., e-mail: ped@sevgtu.sevastopol.ua).

Рабочие языки конференции и семинаров —
русский и английский

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Твердотельные приборы и устройства СВЧ;
 - 1а. Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств;
2. Электровакuumные и микровакuumные приборы СВЧ;
3. Системы СВЧ связи, вещания и навигации;
4. Антенны и антенные элементы;
- 4а. Оптические технологии в антенной технике;
5. Пассивные компоненты;
- 5а. Материалы и технологии СВЧ-приборов;
- 5б. Нанoeлектроника и нанотехнологии;
6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты;
7. СВЧ-измерения;
8. Прикладные аспекты СВЧ-техники;
- 8а. СВЧ-техника в медицине и экологии;
9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн;
- Н. История СВЧ-техники и телекоммуникаций (доклады о юбилеях университетов, НИИ, КБ, журналов, исторических событиях, выдающихся ученых).

Тел./факс: +380-50-3931288
e-mail: crimico-2006@sinfo.net.ua
crimico-2006@mail.ru
<http://iee.orbita.ru/aps/crim06r.htm>
<http://www.crimico.org>