

УДК 621.373.51

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРОВ

В. В. Гладун, В. В. Груздев, Ю. А. Пирогов *)

Рассмотрены генераторные устройства, используемые в микроволновых радиометрах. Для стабилизации частоты и уменьшения шумов генератора на диоде Ганна предлагается применять волноводные диэлектрические резонаторы на запертой моде, дифракционно возбуждаемые в прямоугольном волноводе либо на ступенчатой H -неоднородности, либо на E -неоднородности в форме параллелепипеда с зазором вдоль широкой стенки волновода. Для калибровки радиометров разработаны широкодиапазонные высокостабильные по уровню мощности генерации шумовые источники на ЛПД и ДБШ, использующие обнаруженные эффекты автомодуляции и автотермостабилизации выходного сигнала.

В радиометрических измерительно-вычислительных системах применяется целый ряд источников микроволновых излучений, монохроматических (гетеродины) и шумовых (для калибровки). К ним предъявляются требования стабильности частоты в первом случае и выходной мощности во втором. В данной работе предлагаются некоторые пути решения этих проблем.

1. Гетеродин на диоде Ганна, стабилизированный волноводным диэлектрическим резонатором на запертой моде

Гетеродины на диодах Ганна (ГДГ) для радиометров 3-см и 8-мм диапазонов были выполнены по оригинальной схеме (рис. 1, *a*), содержащей в качестве стабилизирующих ГДГ элементов дифракционные резонаторы \mathcal{Z} в виде диэлектрической ступеньки в H -плоскости прямоугольного волновода [1] или параллелепипеда с зазором b по широкой стенке волновода [2]. Высокая добротность таких резонаторов определяется дифракционным возбуждением в них высших запертых мод типа H_{20} или E_{11} соответственно при воздействии волной H_{10} [1—3]. Волноводные диэлектрические резонаторы на запертой моде (ВДРЗМ), располагаемые между активным элементом 1 (диодом Ганна) и согласованной нагрузкой 5, являются узкополосными отражателями, обеспечивающими возбуждение ГДГ в полосе частот режекции и подавление колебаний вне этой полосы за счет поглощения в согласованной нагрузке. Электрическое питание диода осуществляется через коаксиальный фильтр низкой частоты 2. Перемещением ВДРЗМ вдоль волновода или введением в волновод штыря 4 можно перестраивать генератор по частоте, сохраняя высокую стабильность генерации до $(\delta f/f) \approx \approx 10^{-6}$ в случае фторопластовой ступеньки и до 10^{-7} для сапфирового параллелепипеда с зазором (в обычной схеме с короткозамыкающим поршнем-отражателем не меньше чем 10^{-5}). Того же порядка величины (при комнатной температуре являющиеся рекордными) достигались ранее с помощью сложной трехрезонаторной системы стабилизации частоты [4].

В отличие от резонаторных систем иного типа, ГДГ с ВДРЗМ легко запускается, быстро настраивается на максимум мощности генерации перемещением ВДРЗМ вдоль волновода, надежно затягивается на частоту режекции, а после цикла «выключение—включение» сразу же

*) Московский университет.

выходит на заданную частоту. Двухчастотное затягивание ГДГ позволяет реализовать бистабильную электроуправляемую систему на ГДГ, стабилизированном ВДРЗМ, с четкой фиксацией уровня сигнала в частотной области.

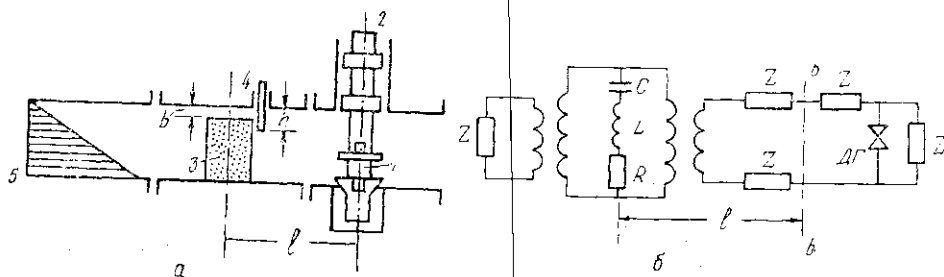


Рис. 1. Конструктивная (а) и эквивалентная электрическая (б) схемы ГДГ, стабилизированного ВДРЗМ

В эквивалентном представлении генератора (рис. 1, б) активный элемент (диод Ганна) через отрезок линии передачи с волновым сопротивлением Z и длиной l нагружен на ВДРЗМ (3 на рис. 1, а) в виде последовательного колебательного контура RLC , связанного с линией передачи дифракционными преобразователями полей с коэффициентами прямой трансформации k и обратной $1/k$. Обозначив через f_0 собственную частоту ВДРЗМ ($f_0 = 2\pi/\sqrt{LC}$) и введя обобщенную расстройку $\xi = (f/f_0 - f_0/f)$, для входного импеданса Z_r в области ВДРЗМ находим

$$\frac{Z_r}{Z} = \frac{1 + i\xi Q_0}{\rho + i\xi Q_0}, \quad (1)$$

где $Q_0 = R^{-1}\sqrt{LC}$ — собственная добротность ВДРЗМ; $\rho = 1 + 2\beta$ — параметр связи; $\beta = Z/2k^2R$ — коэффициент связи ВДРЗМ с линией передачи; k — амплитудный коэффициент дифракционного преобразования основной волны в резонансную запертую моду.

Входной импеданс Z_{bb} ВДРЗМ, приведенный к плоскости включения активного элемента ДГ, запишется в виде

$$\frac{Z_{bb}}{Z} = R_l + iX_l, \quad (2)$$

где

$$R_l = \frac{(1 - \xi Q_0 \operatorname{tg} \theta) (\rho - \xi Q_0 \operatorname{tg} \theta) + (\xi Q_0 + \rho \operatorname{tg} \theta) (\xi Q_0 + \operatorname{tg} \theta)}{(\rho - \xi Q_0 \operatorname{tg} \theta)^2 + (\xi Q_0 + \operatorname{tg} \theta)^2};$$

$$X_l = \frac{(\rho - \xi Q_0 \operatorname{tg} \theta) (\xi Q_0 + \rho \operatorname{tg} \theta) - (1 - \xi Q_0 \operatorname{tg} \theta) (\xi Q_0 + \operatorname{tg} \theta)}{(\rho - \xi Q_0 \operatorname{tg} \theta)^2 + (\xi Q_0 + \operatorname{tg} \theta)^2};$$

$\theta = 2\pi l/\lambda_w$; λ_w — длина волны в пустом волноводе.

В большинстве практических случаев, когда частотной зависимостью собственной реактивности генераторного диода можно пренебречь по сравнению с частотной зависимостью X_l , из условия баланса фаз автогенератора $X_l = 0$ можно определить частоту генерации. В частности, из (2) следует, что частота генерации f_g будет совпадать с f_0 при $l = l_{\text{opt}} = n\lambda_w/2$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Возбуждение генератора происходит при условиях [5]

$$\frac{dX_l}{d\xi} > 0 \text{ и } X_l \approx 0, \quad (3)$$

первое из которых позволяет найти границы частотной перестройки внутри зоны генерации, а второе дает зависимость частоты генерации от положения l и резонансной частоты f_0 ВДРЗМ. Так, для $l=l_{\text{opt}}+\Delta l$ ($\Delta l \ll \lambda_w$) и малых значений ξ можно получить приближенную формулу для f_G в зависимости от Δl . Действительно, в этом случае выражение для X_l в (2) можно представить в виде

$$X_l \approx \frac{(\rho-1)\xi Q_0}{\rho^2 + \xi^2 Q_0^2} \left[1 + \frac{\rho+1}{\xi Q_0} \frac{2\pi\Delta l}{\lambda_w} \right],$$

откуда следует искомая зависимость

$$f_G = f_0 \left[1 - \frac{2\pi(1+\rho)\Delta l}{2Q_0\lambda_w} \right] = f_0 \left[1 - \frac{2\pi\Delta l}{Q_l\lambda_w} \right], \quad (4)$$

где $Q_l = Q_0/(1+\beta)$ — нагруженная добротность ВДРЗМ.

Из первого условия (3) можно определить частотный интервал $\delta\xi_G$ возможной генерации при фиксированном l . Так, для $l=l_{\text{opt}}$ из (2)—(3) следует $\delta\xi_G = \rho/Q_0$. С учетом (4) находится ширина зоны генерации δl при механической перестройке за счет изменения l в виде

$$\left| \frac{\delta l}{l_{\text{opt}}} \right| \leq \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\rho}{1+\rho}. \quad (5)$$

Исследование режимов возбуждения ГДГ со стабилизирующим резонатором в виде диэлектрической ступеньки из фторопласта ($f_0 = 11,98$ ГГц; $\beta = 43,7$; $Q_l = 54,5$) на запертой моде H_{20} [6] показало, что

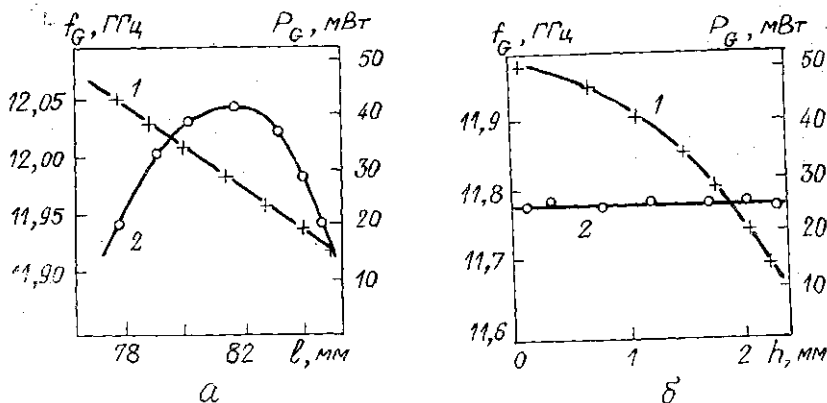


Рис. 2. Зависимости частоты генерации (1) и выходной мощности (2) от положения l ВДРЗМ (а) и глубины погружения h штыря настройки (б)

на частотах, близких к f_0 , при $l \approx (1/2)n\lambda_w$ существуют зоны устойчивой генерации. Пределы частотной перестройки δf_G с изменением l составили ~ 200 МГц. Графики зависимости частоты f_G и мощности P_G генерации ГДГ от расстояния l между активным элементом и ВДРЗМ внутри одной зоны генерации представлены на рис. 2, а.

Модель (1)—(5) является весьма точной: экспериментальные и рассчитанные по (4) значения для ГДГ 3-см диапазона с ВДРЗМ в

виде фторопластовой ступеньки оказались практически одинаковыми: $(\Delta f/\Delta I)_{\text{exp}} = -5 \cdot 10^{-2}$ ГГц/мм и $(\Delta f/\Delta I)_{\text{theory}} = -5,1 \cdot 10^{-2}$ ГГц/мм.

Изменение частоты генерации можно осуществить также и перестройкой резонансной частоты f_0 ВДРЗМ, например путем включения в его состав перестраиваемой индуктивности в виде вводимого через широкую стенку волновода индуктивного штыря 4 (см. рис. 1, а). Соответствующие зависимости f_G и P_G от глубины погружения штыря h изображены на рис. 2, б. Такой способ перестройки (в пределах $\pm 4\%$) значительно облегчает практическое использование генераторов с ВДРЗМ. Аналогичные результаты получены и с резонатором в виде параллелепипеда из сапфира [2].

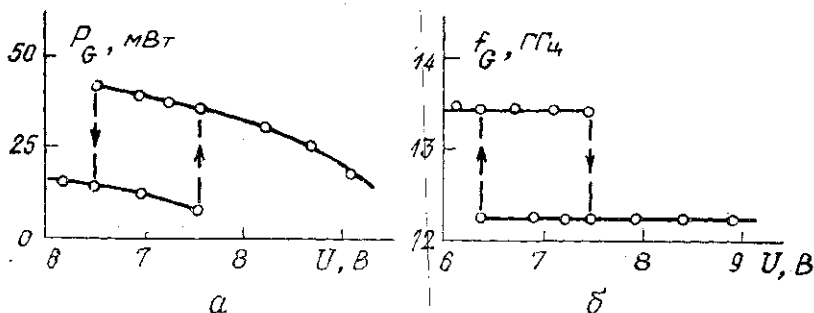


Рис. 3. Зависимости выходной мощности (а) и частоты генерации (б) от напряжения электрического питания ГДГ

Зависимости выходной мощности P_G и частоты генерации f_G от питающего напряжения показаны на рис. 3, а, б; гистерезис кривых определяется затягиванием частоты ГДГ на резонансные частоты режески ВДРЗМ. Следует отметить высокую стабильность частоты генерации при колебаниях питающего напряжения (рис. 3, б). Так, для ВДРЗМ в виде диэлектрической ступеньки относительный уход частоты при изменении питающего напряжения на 1 В составил величину $3,7 \cdot 10^{-5}$. При изменении напряжения питания уровень АМ-шумов достигал минимального значения (< 170 дБ/Гц) при напряжении, соответствующем максимальной выходной мощности генерации.

При оптимальных положениях ВДРЗМ относительно генераторного диода и значении стабилизированного питающего напряжения, обеспечивающих максимальную выходную мощность генератора, ширина полосы генерации оказалась не более 7 кГц (до 100 кГц для ГДГ с короткозамыкающим поршнем), что показывает высокую эффективность данной схемы стабилизации частоты волноводного ГДГ.

2. Шумовые источники на ЛПД и ДБШ для внутренней калибровки радиометров и измерения аппаратной функции

Для экспериментов по сверхрелеевскому разрешению в радиометрии [7] были разработаны широкодиапазонные, высокостабильные по уровню выходной мощности шумовые источники двух типов.

В качестве генераторов шума (ГШ) первого типа использовались ЛПД, у которых были обнаружены две новые физические особенности. Одна из них заключается в генерировании излучений с весьма широким спектром: от 20 до 100 ГГц (длины волн от 3 до 15 мм) с суммарной мощностью до 150 мВт. Это излучение является квазишум-

мовым, имеет линейчатый спектр с характерными сериями основных линий, сопровождаемых симметрично расположенными «спутниками» и соответствующих временам τ_1 (период микроволновых колебаний), τ_2 (длительность СВЧ-импульса) и τ_3 (период повторения импульсов). Физической причиной такого рода генерации является релаксация плазмы избыточных зарядов в пролетной области ЛПД, модулирующая процессы дрейфа доменов избыточного поля; при насыщении активной зоны полупроводниковой плазмой происходит «прокол» ЛПД и микроволновый ток прекращается. Лавинное размножение носителей и накопление заряда осуществляются в положительные полупериоды микроволнового смещения, при проколе активной зоны напряжение смещения падает и плазма за время $(\tau_3 - \tau_2)$ рассасывается, создавая условия для начала нового цикла генерации. Это явление использовано для создания широкодиапазонных ГШ с достаточно равномерным квазибелым спектром в области от 3 до 15 мм.

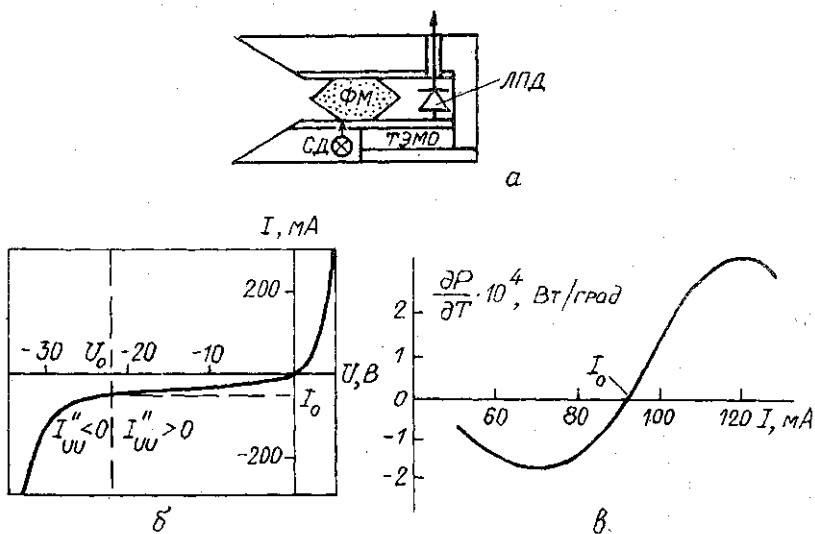


Рис. 4. Схема ГШ—ЛПД с фотоуправлением (а), вольт-амперная характеристика ЛПД (б) и зависимость крутизны кривой $P(T)$ от тока смещения диода (в): ФМ — фотомодулятор, СД — светодиоды, ТЭМО — термоэлемент

При разработке ГШ—ЛПД (рис. 4, а) было обнаружено еще одно явление, позволившее термостабилизировать уровень генерируемой мощности. Оказалось, что с изменением температуры рабочего тела ЛПД его мощность может как возрастать, так и уменьшаться: на вольт-амперной характеристике (ВАХ) диода имеется точка, в которой мощность квазишумового излучения P при изменении температуры диода не меняется, т. е. $(dP/dT)_{U=U_0} = 0$ (рис. 4, б, в). Данный эффект также определяется лавинным пробоем в ЛПД, формирующим ВАХ: при $U > U_0$ ($U < 0$) кривизна ВАХ положительна: $I''_{UU} > 0$, а при $U < U_0$ отрицательна: $I''_{UU} < 0$. Поскольку мощность генерации $P \sim \Delta I \Delta U$, а $\Delta I = I'_{UU} \Delta U$, то $P = \kappa I'_{UU} \Delta U^2$, откуда для производной по температуре имеем

$$\frac{dP}{dT} = \kappa \left\{ \frac{d^2 I}{dU^2} \cdot \frac{dU}{dT} \Delta U^2 + \frac{dI}{dU} \cdot \frac{d}{dT} (\Delta U^2) \right\}. \quad (6)$$

Все производные dI/dU , dU/dT и $d/dT(\Delta U^2)$, характеризующие соответственно крутизну ВАХ, смещение рабочей точки и изменение с температурой мощности генерации, знакопостоянны. Переменная по знаку лишь кривизна ВАХ — d^2I/dU^2 , она и определяет знак dP/dT . С помощью схемы двойной стабилизации по постоянному току и напряжению рабочей точки ВАХ обеспечивалась стабильность мощности генерации ГШ—ЛПД на уровне $\sim 10^{-5}$ — 10^{-6} .

Кроме ЛПД в качестве источников шума могут использоваться диоды с барьером Шоттки (ДБШ) с обратным смещением в режиме начала лавинного пробоя. ДБШ генерируют шумовые СВЧ-колебания с шумовой температурой до 10^4 К, линейно регулируемой путем изменения тока смещения. Уровень шумовой мощности ДБШ можно представить в виде

$$P = k_B T \Delta f + M^2 (eI/2G) \Delta f, \quad (7)$$

где G — дифференциальная проводимость диода, I — ток смещения, M — коэффициент лавинного умножения. Последний составляет, как найдено в эксперименте, $M=1,5$ — $2,5$.

Для регулирования выходной мощности шумовых генераторов использовались фотоуправляемые волноводные аттенюаторы [8] с кремниевой пластинкой (ФМ на рис. 4, а), освещаемой ИК-излучением GaAs-светодиодов СД. По сравнению с *pin*-диодными элементами того же назначения фотоуправляемые аттенюаторы отличаются особенной широкополосностью, существенно большей устойчивостью к перегрузкам, высокой линейностью характеристики управления, отсутствием отражений микроволн как в режиме пропускания, так и заграждения, полной развязкой управляющей и управляемой цепей. В настоящее время фотоуправляемые аттенюаторы обладают рекордной полосой рабочих частот и, что особенно важно, минимальными потерями полезного сигнала в режиме пропускания (до 0,1 дБ в диапазоне миллиметровых волн). До последнего времени недостатком модуляторов с фотозлектронным управлением на основе Ge или Si считалась значительная инерционность ~ 1 мс. Нами, однако, показано, что с использованием тонких полупроводниковых образцов (толщина должна быть много меньше диффузионной длины) удастся за счет перехода от объемных процессов рекомбинации к малоинерционным поверхностным эффектам уменьшить время отклика фотоуправляемых аттенюаторов до 1 мкс [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колесников В. С., Моденов В. П., Пирогов Ю. А., Свешников А. Г. // Радиотехн. и электроника. 1987. 32, № 9. С. 1841. [2] Гладун В. В., Колесников В. С., Моденов В. П., Пирогов Ю. А. // Изв. вузов, Радиофизика. 1986. 29, № 12. С. 1509. [3] Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Рудь Л. А. Резонансное рассеяние волн. Т. 2. // Симпозиум неоднородности. Киев, 1986. [4] Минакова И. И., Панов В. И., Симеонова Б. Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1986. 27, № 6. С. 83. [5] Макино Т., Nashima A. // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1979. 27, N 7. P. 633. [6] Гладун В. В., Колесников В. С., Пирогов Ю. А., Рыбаков М. А. А. с. № 1374396 А1. 4Н 03 В 7/14. [7] Gladun V. V., Pirogov Yu. A., Sukhorukov A. P. // 23 General Assembly of URSI. Abstr. Prague. 1990. V. 2. P. 597. [8] Пирогов Ю. А. // Прикладная физическая оптика (Изд. МЭИ). № 223. М., 1989. С. 67. [9] Гладун В. В., Груздев В. В., Пирогов Ю. А., Тищенко Д. А., Фомина Э. Е. // Тр. Всесоюз. школы-семинара «Физика и применение микроволн». М., 1991. Ч. 1. С. 82.