

4. Crochiere R. E., Penfield P. On the efficient design of bandpass digital filter structures//IEEE Trans. — 1975. — ASSP-23, № 4. — P. 380—381.

5. Свами М. Н. С., Тхьягараджан К. С. Цифровые полосно-пропускающие и полосно-заграждающие фильтры с регулируемой центральной частотой и полосой//ТИИЭР. — 1976. — Т. 64, № 11. — С. 92—94.

Поступило 13 июля 1989 г.

УДК 621.372.8:621.313

И. А. Соколов

ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ В ГЕНЕРАТОРАХ САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Рассмотрены два подхода к применению дисковых диэлектрических резонаторов (ДДР) для стабилизации частоты источников колебаний (ИК) в СВЧ-диапазоне, приведены результаты экспериментальных исследований генераторов на диоде Ганна, стабилизированных внешними ДДР из лейкосапфира при рабочих температурах резонатора 77 и 300 К, даны приближенные формулы для расчета резонатора типа ДДР в экране, указаны основные области применения диэлектрических резонаторов (ДР), и намечены основные перспективные направления конструирования малошумящих и стабильных ИК, стабилизированных ДР, в сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

В последнее время к диэлектрическим резонаторам (ДР) проявляется повышенный интерес в связи с возможностью реализации высокой нагруженной добротности Q_n в генераторах, стабилизированных ДР (ГДР). Добротность Q_n в значительной степени определяет стабильность частоты и спектральную плотность фазовых флюктуаций $S_{\varphi}(f)$ источников колебаний (ИК) в диапазоне СВЧ. Кроме того, ГДР предлагают относительно лучшую температурную стабильность по сравнению с другими ИК в СВЧ-диапазоне, обеспечивают стабильность опорного или умноженного кварца при использовании в системах ФАП и дают на выходе сигнал, свободный от паразитных составляющих.

Два подхода к применению дисковых диэлектрических резонаторов

Ниже приведены результаты исследований основных характеристик генераторов (ГДДР), стабилизированных внешними дисковыми диэлектрическими резонаторами (ДДР) из лейкосапфира (монокристалл Al_2O_3 с $\epsilon \sim 10$ и $tg \delta \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ при $T = 300$ К, $tg \delta \sim 10^{-7} - 10^{-8}$ при $T = 77$ К) при рабочих температурах резонатора 77 и 300 К.

Существует два основных подхода к применению ДДР с целью достижения максимально возможных собственных добротностей резонатора. Эти подходы определяют конструктивную реализацию генераторов на основе ДДР, заключающуюся в выборе: формата ДДР (отношение диаметра резонатора к его высоте); типа колебаний, элементов связи и настройки; размеров экрана. Для обоих подходов

разработаны и рассчитаны на ЭВМ электродинамические модели. Оба подхода предполагают генерацию на высших типах мод гибридных азимутальных колебаний HE_{m11} и EH_{m11} . Различие заключается в определении собственной добротности Q_0 и связанной с ней практически реализуемой нагруженной добротности Q_n ГДДР.

При первом подходе, на основе которого были сконструированы образцы ГДДР1 при температуре ДДР 77 К, предполагается минимизация радиационных потерь, составляющих пренебрежимо малую часть от диэлектрических потерь: $Q_{рад} \gtrsim (10 - 50) \cdot tg \delta^{-1}$. В этом случае суммарная добротность Q_0 определяется в основном $tg \delta$, т. е. диэлектрическими потерями: $Q_0 \approx tg \delta^{-1}$. Конструктивная реализация этого подхода предусматривает снижение до минимума радиационных потерь: в конструкции ГДДР1 размеры металлической камеры (экрана), на внутреннюю поверхность которой нанесен поглощающий слой, выбраны таким образом, чтобы доля энергии, запасаемая в воздушной полости между корпусом и ДДР, была минимальной. В [1] дан расчет электродинамической модели, лежащей в основе рассматриваемого подхода, в [2] подробно описаны конструктивные особенности ГДДР при температурах ДДР 4,2 и 77 К, приведены результаты численного расчета анизотропного ДР, выполненного по методике [1], а также представлены основные технические характеристики ГДДР, сконструированных на основе первого подхода.

Альтернативный подход, лежащий в основе конструкции генератора ГДДР2 при рабочей температуре резонатора $T = 300$ К, устраняет основной недостаток предыдущего подхода, который игнорирует учет радиационной добротности, в значительной степени определяющей суммарную добротность мультипольного резонатора типа ДДР с порядком мультиполя m — числом вариаций поля по азимутальному углу φ . Теоретически этот подход развит в [3, 4]. Второй подход предусматривает оптимизацию по потерям на излучение, достигаемую за счет накопления части излучаемой энергии (в данном случае ДДР подобен антенне [4]) между стенками экрана и ДДР. Для эффективной концентрации энергии в конструкциях на основе второго подхода оптимально выбраны размеры и форма металлического экрана, специальных торцевых отражателей.

Обобщая результаты расчетов, полученные в [3, 4], можно сделать следующий вывод: как в сферических, так и в дисковых ДР наряду с излучаемой (бегущей) волной имеется накапливаемая вблизи диэлектрика неизлучаемая (стоячая) волна. Собственная добротность Q_0 резонатора пропорциональна отношению реактивной энергии к энергии излучения и оказывается пропорциональной номеру моды m : $Q_0 \sim m/\text{const}$.

Генераторы на основе ДДР в экране

В пользу применения второго подхода для конструирования генераторов, стабилизированных ДДР, говорят имеющиеся расчетные и экспериментальные данные, подтверждающие существенное

значение энергии, накопленной вне диэлектрика. Добротность Q_0 увеличивается с ростом m , так как при переходе к высшим модам при $m \gtrsim 10$ усиливается вытеснение энергии к поверхности ДДР, т. е. доля накапливаемой энергии вне резонатора возрастает. Так, например, при $m > 20$ и температуре 4,2 К радиационная добротность ДДР составляет величину порядка 10^8 . Зависимость $Q_0(m)$ имеет максимум, положение которого зависит от ряда факторов, например, от температуры. Так, для сапфировых ДДР при комнатной температуре ($T = 300$ К) $m_{opt} = 10 - 12$, при $T = 77$ К $m_{opt} = 16 - 18$, при $T = 4,2$ К $m_{opt} > 20$. Оптимальный индекс m возрастает по эмпирическому закону

$$m_T = m_K \frac{2T_K}{T + T_K},$$

где $m_K \approx 10$ — оптимальный индекс при комнатной температуре $T_K = 300$ К.

Таким образом, при $T = 300$ К спектр колебаний ДДР состоит из мод с возрастающей пропорционально m собственной добротностью Q_0 от $m = 2 - 3$ до $m \approx 16$. При $m < 3$ существенны потери на излучение, при $m > 16$ существенны диэлектрические (диссипативные) потери энергии. Радиационные потери находятся в сильной зависимости от неидеальностей диска: несовершенства кристаллической решетки, неортогональности оси Z и плоскости кристалла, клиновидности и эллипсности, сколов, некачественной обработки и неудовлетворительной чистоты поверхности резонатора. Добротность Q_0 достигает максимума при $m \approx 10$, частоты мод отстоят друг от друга на величину $\sim 1/m$. Практически добротность для известных материалов определяется точностью выполнения диска и однородностью материала и при $\sqrt{\epsilon} \text{tg} \delta = \text{const}$ не зависит от материала ДДР.

Оценочные формулы для приближенного расчета геометрии ДДР при выбранном значении m имеют следующий вид:

$$D_{\text{ДДР}} \approx m \lambda_0 \frac{\sqrt{3}}{\pi \sqrt{\epsilon}},$$

$$H_{\text{ДДР}} \approx \lambda_0 / \sqrt{\epsilon},$$

где $D_{\text{ДДР}}$, $H_{\text{ДДР}}$ — диаметр и высота диска, соответственно; λ_0 — длина волны в свободном пространстве; ϵ — диэлектрическая проницаемость материала ДДР. Оптимальный формат резонатора, обеспечивающий достаточную разряженность спектра частот и высокую добротность Q_0 резонатора, выбирается из условия $D_{\text{ДДР}} / H_{\text{ДДР}} = 6 - 8$.

Очень важен правильный выбор оптимальной геометрии цилиндрического экрана, при которой высокодобротные моды ДДР не разрушаются, взаимодействуя с металлическими стенками экрана:

$$D_{\text{экр}} \approx D_{\text{ДДР}} + 2 \lambda_0;$$

$$H_{\text{экр}} \approx 2 \lambda_0,$$

где $D_{\text{экр}}$, $H_{\text{экр}}$ — диаметр и высота экрана, соответственно. Так, например, для сапфира с $\epsilon \sim 10$ и $m \approx 10$ получим

$$D_{\text{ДДР}} \approx \frac{m \lambda_0}{6} \approx 1,6 \lambda_0, \quad H_{\text{ДДР}} \approx \frac{\lambda_0}{3,16},$$

$$D_{\text{экр}} \approx 3,6 \lambda_0, \quad H_{\text{экр}} \approx 2 \lambda_0.$$

Для ДДР из сапфира на частотах колебаний $f \sim 10$ ГГц при форматах 6 — 8 для точной подгонки резонансной частоты на номинальное значение имеется возможность шлифовки, составляющей $df/\partial D_{\text{ДДР}} \approx 100$ МГц/мм.

В заключение этого раздела укажем, что для еще более эффективной концентрации энергии вне ДДР целесообразно в конструкциях ГДДР, создаваемых на основе второго подхода, применять специальные торцевые отражатели. Применение таких отражателей в ГДДР2, например, позволило увеличить нагруженную добротность Q_n приблизительно в 1,5 раза. Однако строгий расчет геометрии, выбор формы, конструктивные особенности таких отражателей требуют особого детального рассмотрения и могут быть сделаны только после уточнения и расчета электродинамической модели резонатора типа ДДР в экране, являясь следующим перспективным направлением в конструировании ГДДР.

Нагруженная добротность и фазовые шумы ГДДР

Метрология высокодобротных малощумящих ИК типа ГДДР требует специальной измерительной аппаратуры с повышенной разрешающей способностью и чувствительностью. К сожалению, отечественная промышленная аппаратура не удовлетворяет этим требованиям, и приходится прибегать к косвенным методам измерений, при этом значительно понижается их достоверность и точность.

В [5] рассмотрен метод измерения добротности Q_n ДДР в экране при $T = 300$ К с размерами ДДР и экрана, выбранными на основе второго подхода, заключающийся в оценке величины Q_n непосредственно по резонансной характеристике резонатора типа ДДР в экране, наблюдаемой на индикаторе анализатора спектра. Величина Q_n вычисляется как отношение резонансной частоты моды колебания к ширине резонансной характеристики на уровне 3 дБ. В диапазоне частот генерируемых колебаний 7 — 12 ГГц величина Q_n составила $(5 - 10) \cdot 10^5$ и примерно на порядок превышает имеющиеся данные о добротности Q_n для ГДДР при температуре резонатора 300 К, сконструированных на основе первого подхода (см., например, [2, 6]).

Результатом того, что добротность ГДДР1 примерно в 5 — 10 раз выше добротности ГДДР2, явилась разница в измеренных значениях спектральной плотности фазовых флюктуаций $S_\varphi(F)$, составившая в среднем 12 — 15 дБ/Гц (таблица).

Результаты измерений ГДДР на ИФ5901СА на частоте 9,6 ГГц

Тип ГДДР	Частота отстройки от несущей F , кГц	$S_\varphi(F)$, дБ/Гц
ГДДР1	0,1	— 110
	1	— 140
	10,0	— 162
ГДДР2	0,1	— 98
	1	— 125

В [5] представлены также схема и результаты измерений с их подробным обсуждением. Предварительно генераторы были оптимизированы на максимум Q_n модуляционным методом [5], причем минимальные фазовые шумы соответствовали максимуму Q_n .

Величина $S_\varphi(F)$ на частоте ~ 12 ГГц, ГДДР при температуре ДДР 300 К в среднем на 20 дБ/Гц ниже фазовых шумов кварцевого генератора с частотой $f_{кГ} \sim 60$ МГц, умноженной на 200, в диапазоне частот отстроек $F = 100$ Гц — 10 кГц от несущей ~ 12 ГГц.

Частотная стабильность ГДДР

Основная проблема, возникающая при конструировании ГДДР, — температурная зависимость и долговременная нестабильность частоты. Среди важнейших факторов, ответственных за долговременную нестабильность частоты ГДДР, можно отметить: старение материала ДДР, механические напряжения в узле настройки, старение активного элемента.

Частотная стабильность ГДДР определяется в первую очередь температурным коэффициентом резонансной частоты (ТКЧ) материала диэлектрика резонатора. Данные из [2] показывают, что ТКЧ для лейкосапфира составляет $\sim 10^{-4}$ К $^{-1}$ при $T = 300$ К и $\sim 10^{-5}$ К $^{-1}$ при $T = 77$ К, а при более глубоком уровне охлаждения до гелиевых температур ($T = 2 - 20$ К) ТКЧ не превышает 6×10^{-9} К $^{-1}$. Замечено аномальное поведение ТКЧ в области гелиевых температур, он равен нулю в диапазоне 6 — 13 К для различных образцов ДДР. В [2] приведены следующие данные по нестабильности частоты для ГДДР, сконструированных на основе первого подхода.

Так, генератор на диоде Ганна, стабилизированный по схеме «затягивания частоты» охлажденным до 77 К ДДР из лейкосапфира с добротностью 5×10^6 , имел относительную нестабильность частоты 10^{-10} за 1 с и $2 \cdot 10^{-8}$ за 1000 с в трехсантиметровом диапазоне; генератор, стабилизированный системой АПЧ по ДДР с добротностью $4 \cdot 10^7$ (4,2 К) на частоте 9,2 ГГц, имел нестабильность $2 \cdot 10^{-12}$ за 1 с и 10^{-11} за 1000 с; генератор миллиметрового диапазона, стабилизированный охлажденным до 77 К ДДР ($Q_0 = 7 \cdot 10^5$), имел на частоте 36 ГГц нестабильность 10^{-9} за 10 с и 10^{-8} за 1 ч.

Из приведенных примеров ясно, что охлаждение ДДР до температур жидкого азота и еще более глубокое охлаждение до гелиевых температур позволяют существенно повысить частотную стабильность, однако вряд ли целесообразно следовать по этому пути стабилизации частоты, способствующему существенному удорожанию и усложнению конструкции, так как утрачивается основное достоинство ДДР — высокая добротность уже при комнатных температурах. Гораздо выгоднее конструировать ГДДР при комнатных и в особых случаях при азотных (77 К) температурах, выбирая в качестве материалов резонаторов диэлектрики с малыми потерями $\text{tg } \delta$ и малыми значениями ТКЧ в диапазоне частот 10 — 300 ГГц и широко применяя методы термостатирования и термостабилизации.

Существует еще один перспективный метод повышения температурной и долговременной стабильности частоты — двухчастотный режим колебаний. Основой этого метода служит различная температурная зависимость частоты от размеров резонатора у различных мод. В таком режиме разностная частота мод обладает высокими спектральными характеристиками и стабильностью. Известно применение двухчастотного режима в кварцевых генераторах в диапазоне частот 5 — 10 МГц; применение двухчастотного режима в СВЧ-диапазоне неизвестно, однако в силу одинаковости механизма возникновения генерации в колебательных системах со многими степенями свободы все достоинства двухчастотного режима переносятся и на СВЧ-диапазон.

Относительная режимная нестабильность для ГДДР1 и ГДДР2 составила $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ и $\pm 1 \cdot 10^{-5}$, соответственно. Специальных мер для стабилизации температуры не предпринималось. Более высокая стабильность частоты ГДДР1 по сравнению с ГДДР2 объясняется, по-видимому, тем, что конструктивно ГДДР1 выполнен в виде вакуумированного криостата, т. е. термостатирован.

Наилучшие значения кратковременной нестабильности, по некоторым данным, наблюдаются за времена усреднения $10^{-3} - 10^{-1}$ с [6] и на меньших временах усреднения [10], однако еще предстоит провести прецизионные измерения как кратковременной, так и долговременной нестабильностей частоты.

Применение ДР в миллиметровом диапазоне

На основе второго подхода разработаны образцы ГДДР на диодах Ганна при температуре ДДР 300 К в миллиметровом диапазоне на частоты генерируемых колебаний 38 — 42 ГГц. Для расширения частотного диапазона до 70 — 120 ГГц необходимо применять материалы с малыми значениями диэлектрической проницаемости ϵ , в этом случае γ сколько увеличиваются размеры резонатора (диаметр и высота ДДР обратно пропорциональны $\sqrt{\epsilon}$), что необходимо для создания надежных конструкций. В этом смысле представляет интерес применение в качестве материала ДДР монокристаллического кварца ($\epsilon \sim 4$), у которого, кроме того, температурная стабильность выше, а диэлектрические потери меньше, чем у лейкосапфира.

Ближайшей перспективой является создание на основе второго подхода криогенных конструкций ГДДР при рабочей температуре резонатора 77 К.

Малый уровень фазовых шумов позволяет применять генераторы, стабилизированные ДР, для повышения порога чувствительности измерителей флюктуаций, где они могут быть использованы в качестве гетеродинов для измерения спектральных характеристик ИК СВЧ-диапазона, являясь переносчиками частоты в область 50 — 1000 Гц.

В [7] для значительного повышения точности измерения $\text{tg } \delta$ в широком диапазоне температур ($\text{tg } \delta \cong 10^{-5}$ при $T = 300$ К, $\text{tg } \delta \cong 10^{-9}$ при $T = 4,7$ К) используют характеристики затухания колебательных систем определенной геометрии, например, ДДР и кольцевые ДР. Повышение точно-

сти измерения $\operatorname{tg} \delta$, т. е. ϵ' — действительной и ϵ'' — мнимой частей диэлектрической проницаемости материала диэлектрика, необходимо для повышения точности расчета электродинамических моделей ДР (в таких расчетах точность определения ϵ' и ϵ'' должна быть не ниже 1%).

В [8] указано на применение ГДР для наземных радаров с подвижной частотой, требующих стабильных ИК с быстрой установкой и переключением частоты:

несколько отдельных ГДР, смещенных по частоте, с переключением нужной частоты $p-i-n$ -диодами с высокой изоляцией;

несколько отдельных ГДР с включением питания нужного генератора;

один генераторный активный элемент, подключаемый к соответствующему ДР.

В последнее время ДР находят все большее применение в стандартах частоты [9, 10].

Выводы

Дальнейшее конструирование маломощных и стабильных ИК, стабилизированных ДР, в сантиметровом и миллиметровом диапазонах необходимо осуществлять, решая две основные задачи: повышение температурной и долговременной стабильности частоты и снижение фазовых шумов.

Для решения первой задачи можно рекомендовать применение в качестве материалов ДР диэлектриков с малыми значениями ТКЧ, термостабилизация и термостабилизацию конструкций, создание многорезонаторных систем, работающих в двухчастотном режиме генерации со смещением и выделением разностной частоты, создание ИК по схеме ФАП, в которых стабильность частоты ГДР за 1 с определялась бы стабильностью кварцевого генератора.

С целью снижения фазовых шумов необходимо исследовать новые высокочастотные резонансные системы: многослойные ДР, цилиндрические ДР, ДР в виде тора; применять в зависимости от частотного диапазона активные элементы с низким уровнем собственного частотного фликкер-шума следующим образом: до 10 ГГц — диоды Ганна (ДГ) и биполярные транзисторы; до 100 ГГц — ДГ и полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ); до 300 ГГц — лавинно-пролетные диоды и ПТШ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров В. Н., Мальцева И. Н. Азимутальные колебания в анизотропном диэлектрическом резонаторе// Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. — 1984. — Вып. 2(362). — С. 36.

2. Охлаждаемые диэлектрические резонаторы для стабилизации частоты/С. Н. Буньков, Б. А. Вторушин, В. Н. Егоров и др.//Радиотехника и электроника.— 1987.— № 5.— С. 1071.

3. Волков П. В., Матвеев В. В. Исследование предельных добротностей диэлектрических резонаторов для стандартов частоты//Сборник научных трудов/ВНИИФТРИ.— М., 1987.— С. 108.

4. Волков П. В., Матвеев В. В. Диэлектрический резонатор как антенна//Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства.— 1987.— Вып. 2(62).— С. 13.

5. Волков П. В., Матвеев В. В., Соколов И. А. Исследование генераторов, стабилизированных дисковыми диэлектрическими резонаторами//Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства.— 1989.— Вып. 4(76).— С. 10—14.

6. Панов В. И., Станков П. Р. Стабилизация частоты генераторов высокочастотными диэлектрическими резонаторами из лейкоапфита//Радиотехника и электроника.— 1986.— № 1.— С. 213.

7. Брагинский В. Б., Панов В. И., Тимашов А. В. Аномально малая диссипация электромагнитных волн в ионном кристалле//Докл. АН СССР. Сер. Физика.— 1982.— Т. 267, № 1.— С. 74.

8. Bierman H. DROs meet EW and countermeasure system needs//Microwave Journal.— 1987.— October.— P. 48.

9. Гайгеров Б. А. Водородный генератор с малогабаритным резонатором//Измерительная техника.— 1986.— № 6.— С. 8.

10. Волков П. В. Стандарты частоты на основе охлажденных дисковых диэлектрических резонаторов//Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства.— 1989.— Вып. 3(75).— С. 6—8.

Статья поступила 24 июля 1989 г.

УДК 621.396.677.494 : 621.391

В. С. Кузнецов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНЫХ АФАР В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМ КОДИРОВАНИЕМ

Показано, что при фиксированных параметрах передающей активной фазированной антенной решетке (АФАР), т. е. $(P_{\text{ср}}G)_{\text{пер}} = \text{const}$, параметры узлов и блоков приемной АФАР, зависящие от мощности сигнала на выходе синхронного демодулятора, и параметры передающей АФАР, зависящие от времени излучения высокочастотной энергии, могут быть оптимизированы за счет применения в радиосистеме помехоустойчивого кодирования.

Радиосистемы с АФАР в последние годы получили бурное развитие. Однако сами АФАР на сегодняшний день являются весьма дорогостоящим звеном радиосистемы, к тому же звеном с низким КПД. Поэтому вопросы оптимизации проектируемой АФАР весьма актуальны [1].

Настоящая работа посвящена радиосистемам передачи информации с АФАР. Можно показать, что в этих системах за счет применения помехоустойчивого кодирования массогабаритные параметры (МГП) передающей АФАР и её первичного источника питания могут быть снижены в 1,5—2,5 раза.

В данной статье при любых методах помехоустойчивого кодирования зафиксируем параметры передающей АФАР $((P_{\text{ср}}G)_{\text{пер}} = \text{const})$ и покажем, что энергетический выигрыш (ЭВ) за счет кодирования перед полным двоичным кодом (ПДК) в конечном итоге может быть реализован в снижении МГП приемной и частично передающей АФАР и их первичных источников питания.

Введем следующие сокращения: ДК — двоичный код; ПДК — полный двоичный код; ТК — троичный код. Индекс «п» присваивается параметрам ПДК; параметры ДК и ТК обозначаются без индексов.