

Генераторы СВЧ с применением ферритовых резонаторов

Часть 1

В. Геворкян, к. т. н.¹, В. Кочемасов, к. т. н.², А. Сафин, к. т. н.³

УДК 621.389 | ВАК 2.2.2

Ферритовый, или гиромангнитный, резонатор – частотно-селективный элемент СВЧ-техники, широко применяемый с середины 70-х годов прошлого века для создания различных колебательных систем (резонансных контуров) СВЧ-устройств, в том числе и генераторов. Часто такие изделия называют ЖИГ-генераторами, однако монокристаллы железо-иттриевого граната (ЖИГ) не единственный, хотя и наиболее часто применяемый, вид материала ферритового резонатора. В статье рассматриваются особенности и характеристики различных генераторов СВЧ с применением ферритовых резонаторов, выпускаемых рядом производителей.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИРОМАГНИТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Гиромангнитный резонатор (ГР) – частотно-избирательный твердотельный элемент СВЧ-устройств, работа которого основана на явлении ферромагнитного резонанса (ФМР), – избирательном поглощении ферромагнетиком энергии электромагнитного поля при частотах, совпадающих с собственными частотами прецессии магнитных моментов электронной системы ферромагнитного образца во внутреннем эффективном магнитном поле. Величина этого поля превышает значения, необходимые для магнитного насыщения ферритового материала. Напряженность внешнего поля определяет резонансную частоту ГР – ω_p , которая зависит от свойств материала и практически не связана с геометрическими размерами резонатора. Гиромангнитные резонаторы могут использоваться во всем диапазоне СВЧ (от 0,1 до 300 ГГц), но основная область их применения – сантиметровый диапазон длин волн.

Гиромангнитные резонаторы выполняются из различных ферритов с малыми магнитными и диэлектрическими потерями, чаще всего из монокристаллов железо-иттриевого граната с высоким значением добротности Q , обеспечивающим низкий уровень фазовых шумов (ФШ) и многооктавную перестройку СВЧ-генераторов [1–8].

Типичный ГР представляет собой оптически полированную сферу (гораздо реже – диск) с размерами, много меньшими длины волны, что для сантиметрового диапазона длин волн соответствует диаметрам от 0,3 до 1,5 мм. Высокая добротность Q гиромангнитного резонатора сохраняется в широком диапазоне перестройки (рис. 1) [1]. Синяя область на рис. 1 соответствует возможным значениям добротности ГР, которые определяются многими факторами. Основным среди них является неоднородность постоянного магнитного поля в пределах образца ГР, которая может зависеть от размеров самого ГР, а также от воздействия конструктивных факторов, влияющих на неоднородность намагничивающего поля, например, таких как элементы связи и настройки ГР. Итак, добротность ГР не превышает 10 000 и убывает с ростом частоты вследствие возникновения неоднородностей прецессии. Так, с ростом диаметра сферы от 1 до 3 мм возможно увеличение полосы пропускания резонансной кривой (то есть падение добротности) примерно в пять раз. Отметим, что реальная добротность ГР уступает добротности диэлектрических резонаторов [9].

Основной вид СВЧ-колебаний ГР – однородная прецессия намагниченности, центральная частота резонансной кривой которой для сферы определяется формулой

$$\omega_p = \mu_0 \gamma (H \pm H_A),$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\gamma = 1,76 \cdot 10^8$ К/г (Кулон/грамм) – гиромангнитное (магнитомеханическое) отношение; H – модуль напряженности внешнего постоянного магнитного поля, превышающий магнитное поле насыщения магнитного материала, соответствующего

¹ НИУ «МЭИ», профессор.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

³ НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов, arsaфин@gmail.com.

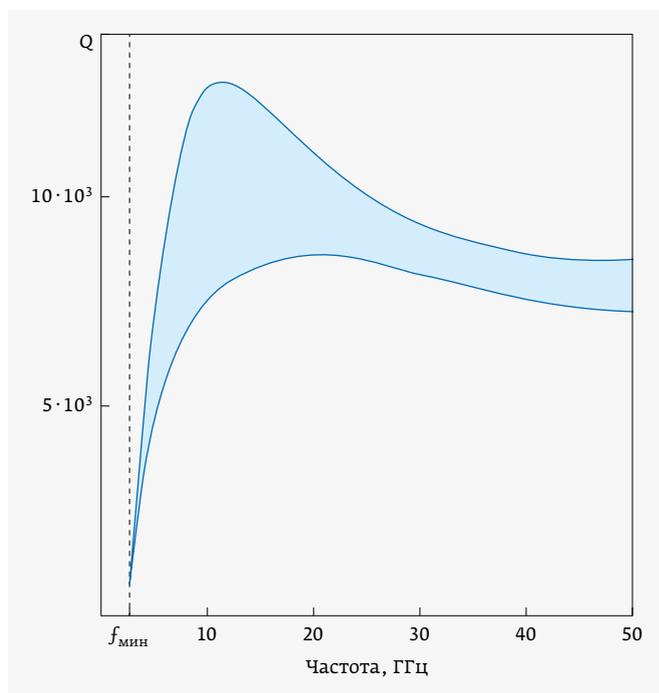


Рис. 1. Типичная зависимость собственной добротности Q сферического ГР от резонансной частоты

коллинеарной полю ориентации магнитных моментов теоретически (в режиме насыщения) всех магнитных доменов образца; H_A – модуль напряженности эффективного поля магнитной кристаллографической анизотропии, зависящей от температуры и ориентации осей кристалла относительно направления внешнего постоянного магнитного поля.

Частота ФМР с высокой степенью линейности пропорциональна внешнему магнитному полю. Условие необходимого магнитного насыщения образца ГР указывает на наличие нижней границы $f_{\text{мин}}$ возможной частоты ФМР, вблизи которой потери в ГР резко возрастают. Так, у ЖИГ-резонаторов это значение равно примерно 1,7 ГГц, для монокристаллов кальций-висмут-ванадиевого граната (КВВГ), обладающих меньшей добротностью, частота $f_{\text{мин}}$ составляет около 600 МГц. Сверху диапазон перестройки ГР ограничен частотой объемного резонанса, определяемой диэлектрической проницаемостью феррита, его размерами или практически достижимой напряженностью поля H магнитной системы. В диапазоне миллиметровых волн ($\lambda \leq 8$ мм) для снижения массы и габаритных размеров магнитной системы в качестве материала ГР используют высокоанизотропные гексаферриты с H_A от $8 \cdot 10^5$ до $32 \cdot 10^5$ А/м.

Для сведения, в постоянном магнитном поле напряженностью до 10^6 А/м сфера ЖИГ проявляет резонансные свойства на частотах до 40 ГГц с эквивалентной

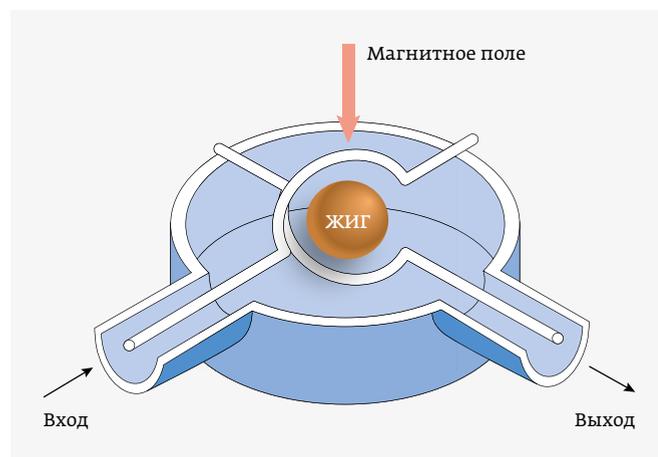


Рис. 2. Простейшее резонансное звено на основе ГР

добротностью до $5 \cdot 10^3$ (см. рис. 1). На нерезонансных частотах сфера ведет себя как обычный диэлектрик с относительной проницаемостью около 15.

Благодаря малым размерам в сравнении с длиной волны, электромагнитная связь с ГР может быть реализована СВЧ-цепями как с квазисосредоточенными (петли, полупетли), так и с распределенными СВЧ линиями передачи. Простейшее резонансное звено СВЧ-фильтра представляет собой ферритовую сферу, размещенную в центре ортогонально установленных для развязки входов полупетель [1], образующих элементы связи ГР (рис. 2) [1]. Сфера ЖИГ входит в резонанс на СВЧ, когда она находится в постоянном магнитном поле.

В любом варианте реализации электромагнитной связи ГР с СВЧ-полем возбуждение колебаний в резонаторе возникает только при «правовинтовом» вращении во времени вектора СВЧ-поля относительно вектора намагничивающего поля. Это обуславливает невзаимные свойства СВЧ-элементов с ГР, которые применяют в различных СВЧ-устройствах.

Гиромангнитные резонаторы применяются в генераторах, перестраиваемых постоянным магнитным полем. Поле перестраивается электромагнитом, который обычно содержит две катушки (рис. 3): основную (в иностранной литературе может иметь обозначение Tune), предназначенную для обеспечения режима насыщения ферритового материала и перестройки по рабочему диапазону частот резонансной частоты ГР, и подстроечную – с небольшим числом витков, которая обычно выполняется в виде спиральной намотки с центром в точке положения сферы ГР. Малая индуктивность подстроечной катушки обеспечивает относительно быструю перестройку частоты.

В ЖИГ-генераторах ГР выполняет функцию колебательного контура, применение спиральной катушки



Рис. 3. Магнитная система перестройки частоты ГР, состоящая из основной и подстроечной катушек

обеспечивает функцию точной подстройки частоты контура и генератора, например для температурной компенсации ухода частоты генерации, или для быстрой подстройки частоты генератора относительно частоты опорного генератора, при использовании его в петле фазовой автоподстройки частоты.

Сфера ЖИГ обычно размещается на конце тонкого, например, бериллиевого стержня (рис. 4), обладающего высокой теплопроводностью [2, 3]. Тем самым, во-первых, достигается необходимая ориентация кристаллографических осей ЖИГ-сферы относительно направления постоянного магнитного поля намагничивания по «более легкой» оси и, кроме того, обеспечивается постоянная

температура в точке ее крепления, поскольку стержень является хорошим проводником тепла от нагревателя к сфере и обратно.

Постоянное магнитное поле создается электромагнитом (рис. 4а), постоянным магнитом (рис. 4б) и гораздо реже их комбинацией. Магнитное поле электромагнита меняется под действием вариаций подаваемого тока. В присутствии магнитного поля вокруг ЖИГ-сферы появляется резонирующее на СВЧ магнитное поле (прецессия).

Применение комбинированных магнитных систем, образованных сочетанием постоянного магнита для формирования поля насыщения ГР и электромагнита для перестройки частоты, не имеет качественных преимуществ перед электромагнитом, так как вставка постоянного магнита в контур замкнутого магнитопровода эквивалентна увеличению воздушного зазора на толщину постоянного магнита.

Воздушный зазор, в котором размещен ГР, должен быть минимальным, чтобы минимизировать необходимые значения силы тока (точнее, ампер-витков) в катушке для создания необходимых значений напряженности постоянного магнитного поля. Длина воздушного зазора составляет единицы миллиметров.

Кроме относительно больших габаритов перестраиваемых по частоте ЖИГ-генераторов, определяемых электромагнитной системой, ограничение в применении ГР обусловлено инерционностью перестройки магнитного поля в зазоре электромагнита, а точнее, значительной постоянной времени, определяемой большой индуктивностью обмотки в сравнении с ее омическим сопротивлением. Обычно время перестройки ГР в широком диапазоне

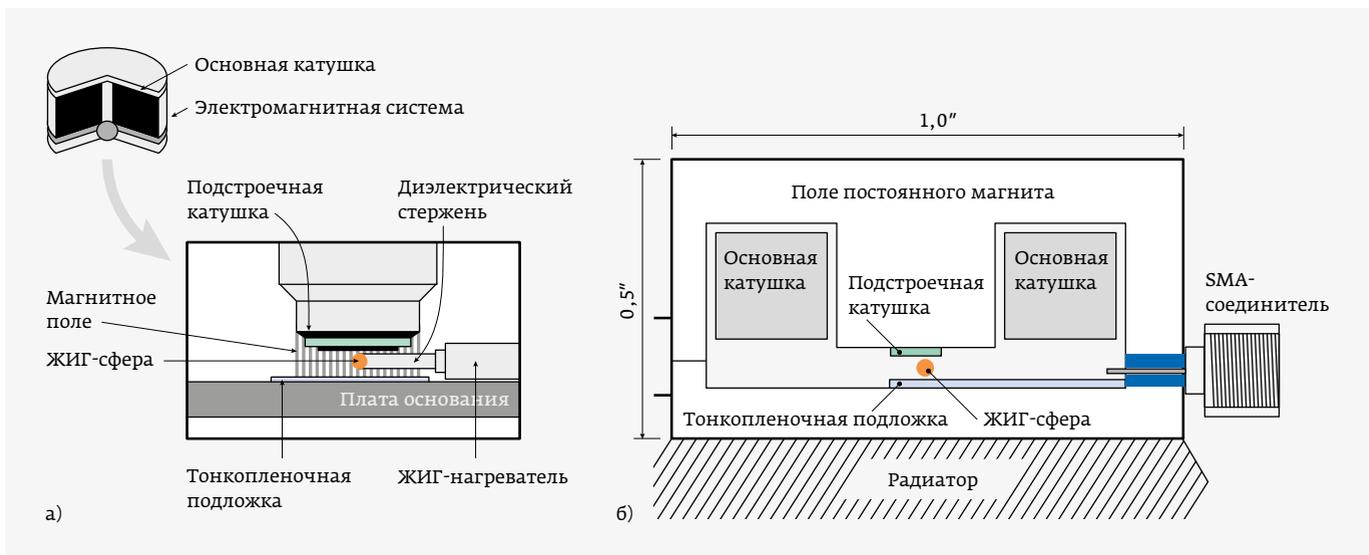


Рис. 4. Упрощенные конструкции ЖИГ-генераторов: а – с электромагнитом; б – с постоянным магнитом

частот составляет несколько миллисекунд/ГГц. Поэтому ЖИГ-генераторы целесообразно использовать в системах с достаточно плавным изменением частоты. Помимо инерционности, ЖИГ-генераторы обладают еще одним недостатком, связанным с необходимостью использовать для перестройки частот источник тока, значение которого при выводе ГР в режим насыщения может достигать единиц ампер.

Кроме названных, к достаточно проблемным вопросам конструирования устройств с ГР относится обеспечение температурной стабильности резонансной частоты, которая определяется стабильностью собственно ГР, связанной с ориентацией осей монокристалла относительно направления постоянного магнитного поля, и стабильностью параметров электромагнита. Заметим, что для ГР из слабоанизотропных ферритов ($H_A \ll H$) кубической симметрии (феррогранаты, феррошпинели), в том числе и ЖИГ, достижим температурный коэффициент частоты (ТКЧ) порядка $\sim 10^{-6}$ град $^{-1}$.

Определенным недостатком всех ГР является низкий уровень выходной мощности (менее 100 мВт), поскольку зависимость свойств феррита от температуры и малый объем образца не позволяют рассеять в нем значительную мощность. В интервале частот $f_{\min} \leq f \leq 2f_{\min}$ уровень допустимой мощности особенно мал и не превышает 10 мкВт из-за низкого значения порогового СВЧ магнитного поля, при котором происходит переход от линейного режима ферромагнитного резонанса к нелинейному. В последнем случае добротность ГР и его связь с СВЧ-цепями падают с увеличением уровня мощности сигнала.

Суммируя сказанное, очевидно, что создание любых СВЧ-устройств с применением ГР представляет сложную техническую задачу, для успешного решения которой необходимы достаточный опыт и технологические возможности.

СХЕМОТЕХНИКА ЖИГ-ГЕНЕРАТОРОВ

В качестве активного элемента в ЖИГ-автогенераторе (АГ) применяются все типы маломощных активных элементов: от СВЧ-диодов, интерес к которым уменьшается в настоящее время, до транзисторов. Биполярные и полевые транзисторы могут быть включены в схему автогенератора с ГР различными способами (рис. 5) [4]. Свойства этих генераторов (мощность и фазовые шумы) определяются особенностями активных элементов и не зависят от ГР, одинаково проявляющего себя во всех автогенераторах. Генераторы с общей базой (common base) на биполярных транзисторах (рис. 5а) имеют малый уровень фазовых шумов и обеспечивают широкую полосу перестройки. Их фазовые шумы примерно на 12 дБ ниже, чем у генераторов с общим затвором (common gate) на арсенид-галлиевых полевых транзисторах. Недостаток автогенераторов на биполярных транзисторах – ограниченный частотный

диапазон. Вследствие этого для СВЧ-применений часто используют удвоение частоты ЖИГ-генераторов на биполярных транзисторах. Это обеспечивает лучший уровень фазовых шумов (рис. 6) [4] по сравнению с фазовыми шумами в генераторах на полевых транзисторах по основной гармонике [5].

Кремниевые биполярные транзисторы в ЖИГ-генераторах обычно используются на частотах менее 8–18 ГГц (табл. 1). Переход на кремний-германиевые транзисторы позволяет достигнуть лучших фазовых шумов на частотах до 20–22 ГГц (табл. 2).

Генераторы на арсенид-галлиевых полевых транзисторах по схеме с общим затвором (рис. 5б) обеспечивают широкую полосу перестройки (2–8, 6–18, 20–40 ГГц), но достигаемый в них уровень фазовых шумов (табл. 3) существенно уступает фазовым шумам ЖИГ-генераторов, реализованных на биполярных транзисторах (см. рис. 6).

При создании ЖИГ-генераторов на арсенид-галлиевых полевых транзисторах широко применяется схема (рис. 5в)

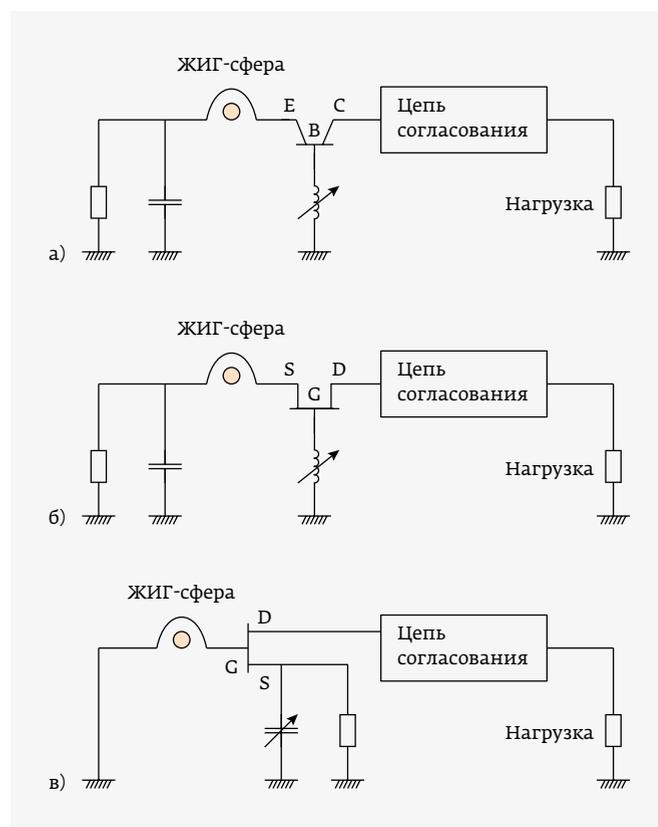
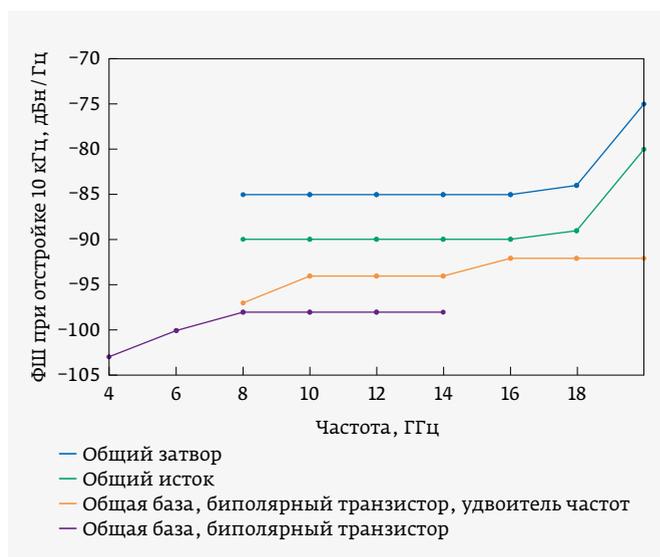


Рис. 5. Упрощенные схемы ЖИГ-генераторов: а – биполярный транзистор, схема с общей базой (common base); б – полевой GaAs-транзистор с общим затвором (common gate); в – полевой GaAs-транзистор с общим истоком (common source). Обозначения: Е – эмиттер, В – база, С – коллектор, S – исток, D – сток, G – затвор

Таблица 1. Характеристики ЖИГ-генераторов на кремниевых (Si) биполярных транзисторах

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
MLW	MLMY-0204	2-4	-125
MLW	MLMY-0306	3-6	-123
MLW	MLMY-0408	4-8	-120
MLW	MLMY-0208	2-8	-120
MLW	MLLC-0208	2-8	-120
MLW	MLMB-0204	2-4	-125
MLW	MLMB-0306	3-6	-123
MLW	MLMB-0408	4-8	-120
MLW	MLMB-0208	2-8	-120
OMNIYIG	YOM-3681	6-18	-115
OMNIYIG	YOM-3679	4-18	-115
OMNIYIG	YOM-3676	2-18	-115

с общим истоком (common-source). Теоретически достигаемый в ней уровень фазовых шумов на 8 дБ превышает фазовые шумы ЖИГ-генераторов на биполярных транзисторах. ЖИГ-генераторы по этой схеме имеют ограниченную полосу перестройки – 5 ГГц. Использование

**Рис. 6.** Фазовые шумы ЖИГ-генераторов на кремниевых биполярных транзисторах и полевых транзисторах, выполненных по арсенид-галлиевой технологии**Таблица 2.** Характеристики ЖИГ-генераторов на кремний-германиевых (SiGe) транзисторах

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
MLW	MLPW-0812	8-12	-125
MLW	MLPW-1418	14-18	-125
MLW	MLPW-1822	18-22	-120
MLW	MLXB-0618	6-18	-123
MLW	MLXB-0820	8-20	-125
MLW	MLXB-0220	2-20	-120...-112
MLW	MLXS-0818	8-18	-125
MLW	MLXS-0820	8-20	-123
MLW	MLXS-0220	2-20	-120...-107
MLW	MLXM-0818	8-18	-125
MLW	MLXM-0618	6-18	-123
MLW	MLVG-0618	6-18	-125
MLW	MLVG-0820	8-20	-123
MLW	MLVG-1021	10-21	-123
TMS	FS2898-R	6-13	-125
TMS	FS2637	8-18	-125
TMS	FS2678	12-20	-125
TMS	FS3005-R	10,0-20,5	-118
VIDA Products	DS1004LCB	10-20	-145 (при отстройке 1 МГц)

этой схемы при создании узкополосных ЖИГ-генераторов может быть более эффективным с экономической точки зрения.

Подводя итог анализу возможных схемотехнических решений, можно констатировать, что наименьший уровень фазовых шумов достигается при использовании биполярных транзисторов (см. рис. 6). Замена кремниевых биполярных транзисторов на кремний-германиевые, осуществляемая многими производителями ЖИГ-генераторов, приводит к существенному снижению уровня фазовых шумов в изделиях с частотой генерации более 8–10 ГГц. Технические описания (data sheets) на ЖИГ-генераторы разных производителей, к сожалению, не всегда содержат сведения об используемых технологиях и уровне достигнутых фазовых шумов. Наиболее полные данные представлены в материалах компании Micro Lambda Wireless (MLW). Именно эти сведения позволили

Таблица 3. Характеристики ЖИГ-генераторов на GaAs полевых транзисторах

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
MLW	MLCC-0818	8–18	–105
MLW	MLOS-1226	8–26,5	–98
MLW	MLOS-1724	17–24	–98
MLW	MLOS-1826	18–26,5	–98
MLW	MLOS-1840	18–40	–95
MLW	MLOS-2040	20–40	–95
MLW	MLOS-2640	26,5–40	–95
OMNIYIG	YOM2320	2–10	*
OMNIYIG	YOM1516	6–18	*
OMNIYIG	YOM1515	4–18	*

* В data sheets данные о фазовых шумах отсутствуют.

свести в таблицы (табл. 1, 2, 3) информацию об основных характеристиках ЖИГ-генераторов, выполненных на биполярных и полевых транзисторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляков С. В.** Гироманитный резонатор. Электроника. Энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1991. С. 100–101.
2. Technology Description – YIG Tuned Oscillators. – Micro Lambda Wireless.
3. YIG Tuned Oscillator – FM Coil Driver. Application Note M001. – Avantek Products.
4. **Benson D. et al.** YIG Oscillator. – San Jose State University Fall 2009, EE 172.
5. Oscillators the complete microwave solution. – Teledyne Microwave Solutions.
6. **Каа В.** A Simple approach to YIG Oscillators // VNF Communications. 2004. No. 4. PP. 217–224.
7. **Белов Л.** Корпорация Micro Lambda Wireless. СВЧ-приборы с ЖИГ-перестройкой // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 8. С. 60–66.
8. **Геворкян В. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р., Ченакин А. В.** Генераторы СВЧ на основе ферритовых материалов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. Т. 13. № 1. С. 4–9.
9. **Геворкян В., Кочемасов В., Шадский В.** Генераторы с применением диэлектрических резонаторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 2. С. 114–128, № 4, С. 102–113, № 5. С. 112–119.



Акционерное общество
**ИРКУТСКИЙ
РЕЛЕЙНЫЙ
ЗАВОД**

разрабатываем и производим радиоэлектронные компоненты



Ориентируемся на клиентов

Учитываем требования клиентов и предоставляем своим заказчикам образцы изделий

100% гарантия качества

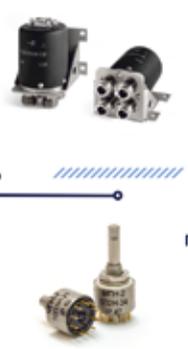
Строго следим за выпускаемой продукцией и проверяем ее на каждом этапе производства

Работаем над продукцией

Постоянно работаем над своей продукцией и улучшаем технические характеристики







**РАЗРАБАТЫВАЕМ И
СЕРИЙНО ПРОИЗВОДИМ**

электромагнитные реле,
коаксиальные радиочастотные
соединители,
переключатели электромеханические
поворотные и коаксиальные,
помехоподавляющие фильтры

Россия, 664075,
г. Иркутск, ул. Байкальская, 239
(3952) 35-23-18
marketing@irzirk.ru



Посмотрите каталог промежуточных реле на сайте:
www.irzirk.ru