

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

А.Л. Хвалин, А.В. Васильев,
А.А. Игнатьев, В.Н. Самолданов
(СГУ им. Н.Г. Чернышевского)

Статья посвящена исследованию характеристик магнитоуправляемых генераторов в интегральном исполнении малой мощности (до 10 мВт) в диапазоне частот 18 – 40 ГГц. Приведены результаты экспериментальных исследований.
Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика, транзисторы с затвором Шоттки, ферритовый резонатор.

На основе генераторов, управляемых внешним постоянным магнитным полем, возможно создание ряда устройств СВЧ-, КВЧ-диапазонов: генераторов качающейся частоты, генераторов шума, синтезаторов частот, датчиков (магнитных полей, механических смещений и пр.). В качестве магниточувствительного частотозадающего элемента в цепи обратной связи генератора используется ферритовый резонатор, работающий на частоте ферромагнитного резонанса [1, 2].

С увеличением рабочих частот задачи проектирования значительно усложняются, а стоимость эксперимента возрастает. Современные системы автоматизированного проектирования (например Microwave Office 2007), позволяют создать строгие модели разрабатываемых устройств и получить совпадение теоретических и экспериментальных результатов с погрешностью порядка 20%. Различия теоретических и экспериментальных результатов связаны, прежде всего, с трудностями моделирования транзисторных структур

(необходима строгая физическая модель активной области транзистора), допусками на изготовление, искажением характеристик элементами монтажа и соединителями и пр.

Модель исследуемого генератора создана в среде компьютерной системы автоматизированного проектирования (САПР) и совместима с САПР Microwave Office 2007 [3, 4]. В качестве активных элементов в усилительной части генератора использованы транзисторы с затвором Шоттки типа ПТШ-100.

На первом этапе моделирования в САПР решена задача анализа принципиальной электрической схемы двухкаскадного усилительного блока генератора, в которую затем включены элементы полоскового тракта (отрезки регулярной линии, повороты, тройники, согласующие шлейфы, модели СВЧ-конденсаторов и пр.), полученные на основе решения электродинамической задачи. Следующий этап моделирования заключается в формулировке и решении задачи многопараметрической оптимизации.

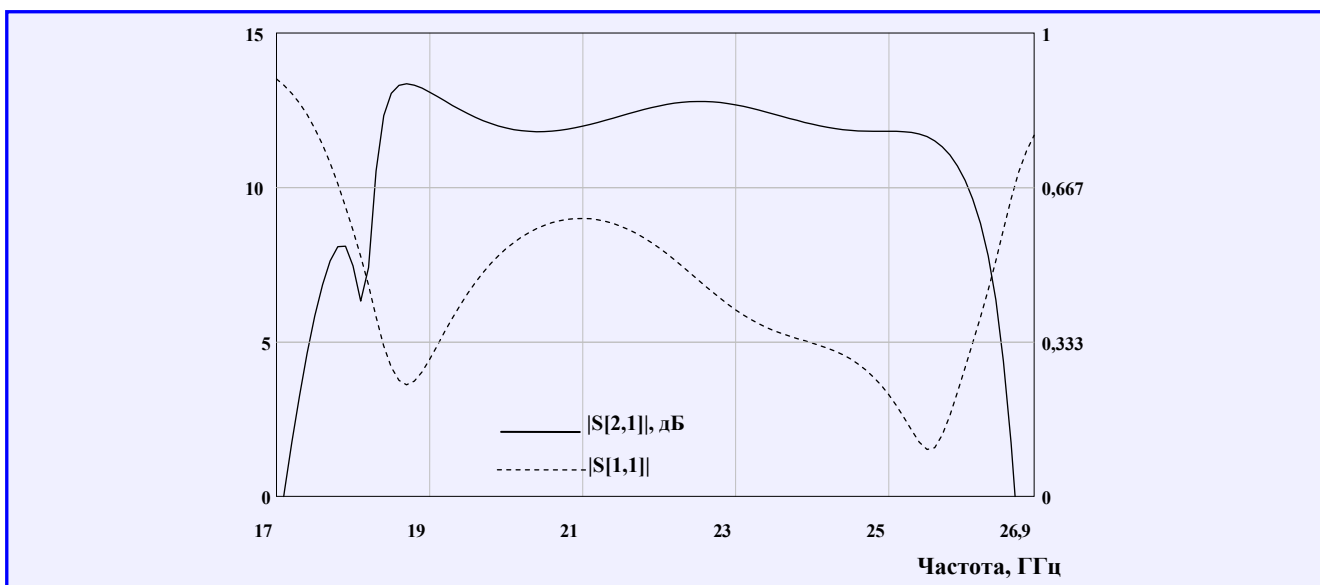


Рис. 1. Коэффициенты передачи S_{21} и отражения S_{11} модели усилительного блока генератора

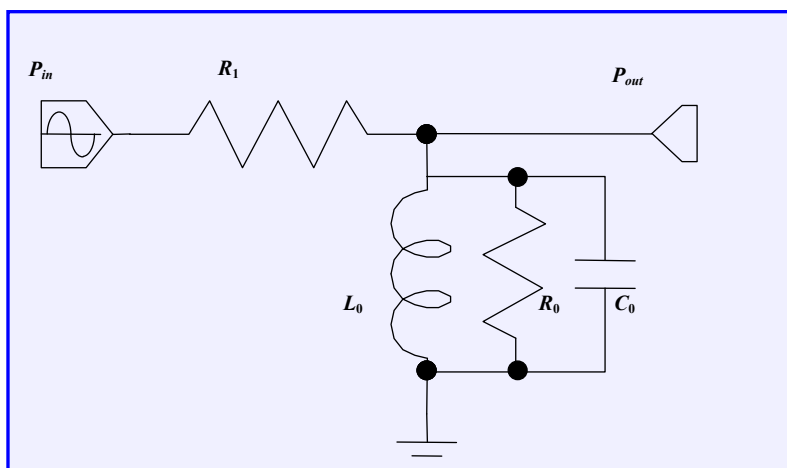


Рис. 2. Эквивалентная схема ферритового резонатора

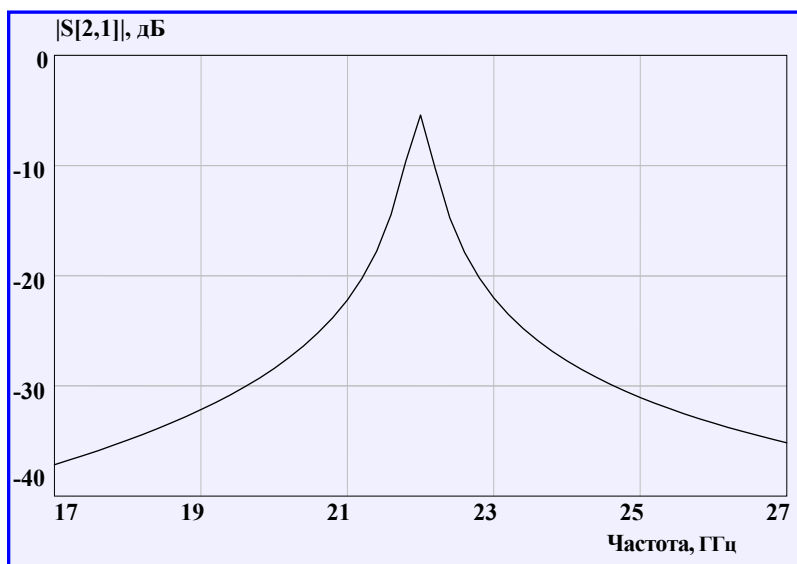


Рис. 3. Коэффициент передачи S_{21} ферритового резонатора на частоте 22,4 ГГц

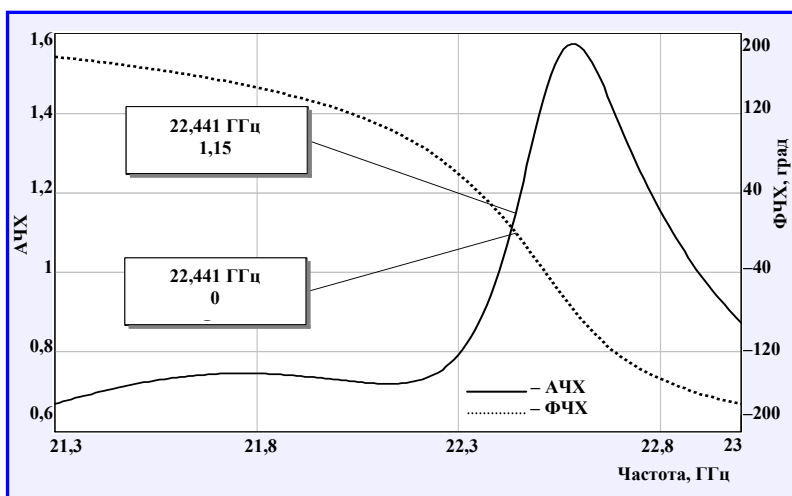


Рис. 4. Коэффициент усиления цепи генератора

Цель оптимизации заключается в достижении максимального коэффициента усиления (12 – 14 дБ) в рабочей полосе частот при минимальных уровнях КСВН входа и выхода усилительного блока (не более 2,5). В качестве варьируемых параметров использованы номинальные значения сосредоточенных элементов (индуктивностей, конденсаторов), а также геометрические размеры микрополосковых проводников, элементов подстройки и согласования. Оптимальные частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения усилительного блока генератора показаны на рис. 1.

В цепь обратной связи включён ферритовый резонатор типа 140КГ в виде сферы диаметром 0,4 мм, использована эквивалентная схема, показанная на рис. 2. Ферритовый резонатор имеет следующие основные параметры: собственная намагниченность $4\pi M_s$ ($4\pi M_s = 175,0$ мТл), полуширина резонансной кривой ΔB по уровню минус 3 дБ ($\Delta B = 0,22$ мТл), Q_n – добротность резонатора. Величина R_1 ($R_1 = 85$ Ом) задаёт потери СВЧ-энергии в системе: ферритовый резонатор – линия обратной связи генератора.

Параметры эквивалентной схемы ферритового резонатора [2, 4] связаны с его резонансной частотой F_0 следующими выражениями:

$$Q_n = \frac{3B_0 - \pi M_s}{3\Delta B};$$

$$R_0 = 0,487Q_n;$$

$$L_0 = \frac{R_0}{\omega_0 Q_n};$$

$$C_0 = \frac{1}{\omega_0^2 L_0};$$

$$\omega_0 = 2\pi F_0.$$

На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модели ферритового резонатора. Индукция внешнего магнитного поля равна $B_0 = 785,7$ мТл, что соответствует середине рабочего диапазона усилительного блока генератора (примерно 22 ГГц).

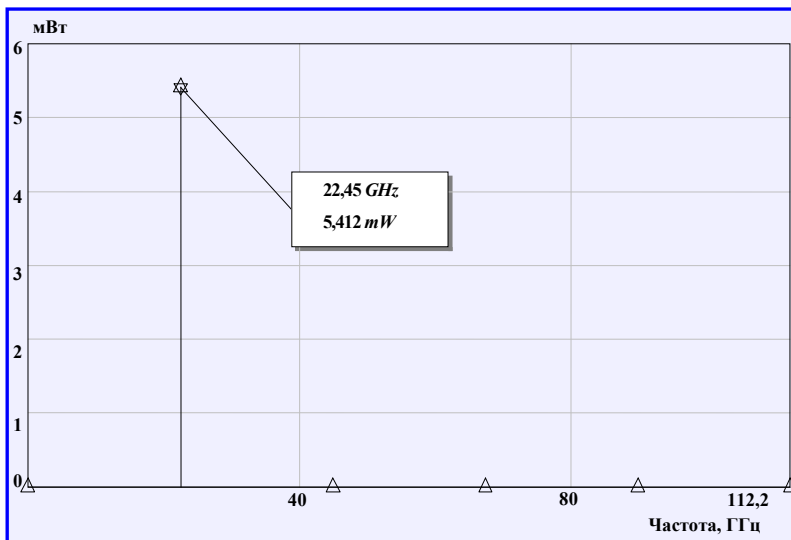


Рис. 5. Расчётная мощность генерации на частоте 22,45 ГГц

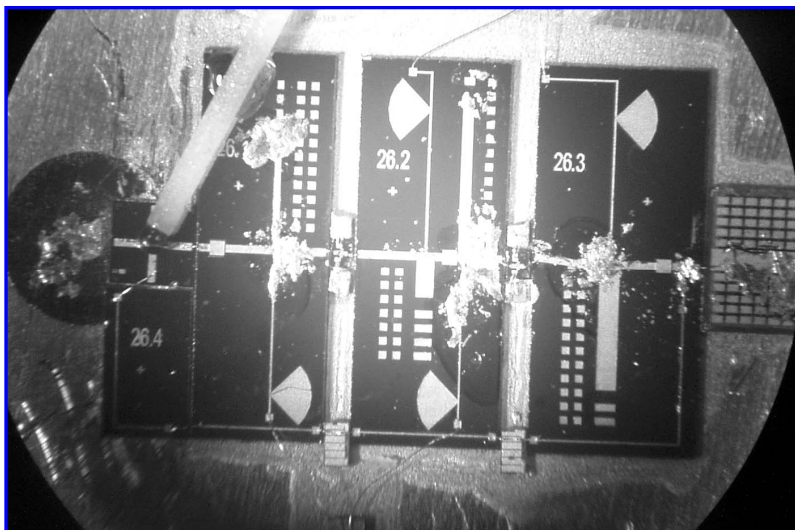


Рис. 6. Платы магнитоуправляемого генератора

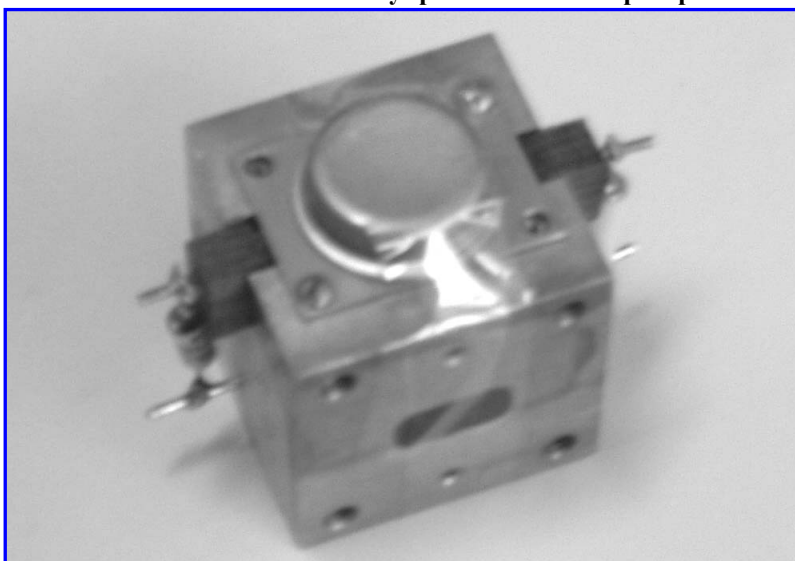


Рис. 7. Магнитоуправляемый генератор СВЧ-диапазона в волноводной оснастке

Моделирование режима генерации заключается в удовлетворении амплитудного и фазового условий генерации. На рис. 4 представлены АЧХ и фазочастотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи усилительного блока генератора, полученные при использовании в САПР блока поиска условий генерации. Как видно из рис. 4, условия генерации выполняются на частоте 22,441 ГГц: приведенная амплитуда в линии обратной связи составляет 1,15 (т. е. превышает 1,0), ФЧХ переходит через 0,0.

На рис. 5 в качестве примера представлены гармонические составляющие генерируемого сигнала (преобладает первая гармоника на частоте 22,45 ГГц), полученные с использованием в САПР блока измерения мощности генерации. Небольшие отличия частоты генерации, полученные на рис. 4 и 5, связаны с нелинейным насыщением мощности транзистора.

Расчётная мощность генератора при перестройке внешним магнитным полем показана в табл. 1 в

двух поддиапазонах частот (17,503 – 17,793 ГГц и 21,988 – 22,421 ГГц) и изменяется в пределах от 1 до 6,8 мВт.

На рис. 6 и 7 представлены фотографии плат генератора и измерительной СВЧ-оснастки. Генератор выполнен в интегральном исполнении (волноводно-микрополосковый модуль), использованы два транзистора ПТШ-100, три платы согласования с линией обратной связи, магнитоэлектронный элемент связи с ферритовым резонатором типа КГ-140.

Генераторные свойства образца генератора исследовались на спектроанализаторе С4-60 в диапазоне частот от 18 до 40 ГГц. На рис. 8 изображены осциллограммы для режимов генерации регулярных сигналов, индукция внешнего магнитного поля составляет 630 мТл, мощность на основной частоте составила 200 мкВт.

Также исследовались генераторные свойства образцов при магнитной перестройке частоты в режиме регулярных сигналов (табл. 2).

Таблица 1

Расчетная мощность генератора при изменении индукции внешнего магнитного поля

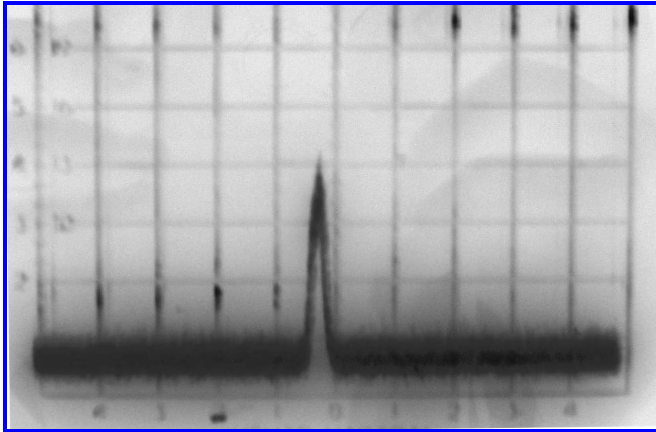
Частота, ГГц	Индукция магнитного поля, мТл	Мощность, мВт
17,503	627	3,0
17,754	637	2,9
17,871	641	1,9
17,955	644	1,8
17,973	645	1,8
21,988	785,7	1,7
22,084	790,0	6,5
22,302	800,0	6,8
22,403	805,0	5,6
22,421	805,9	1,0

Таблица 2

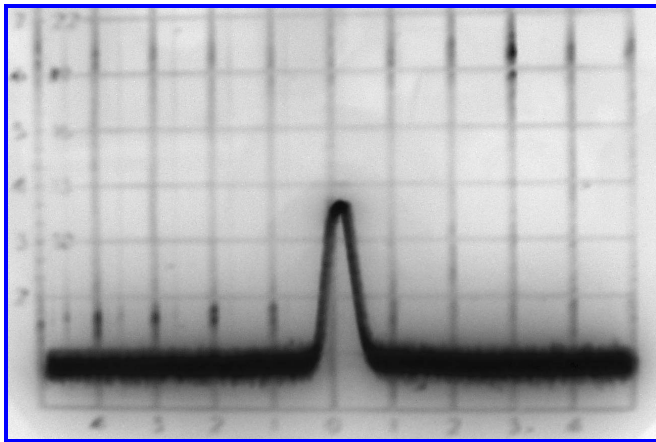
Магнитная перестройка регулярного сигнала

B , мТл	f_1 , ГГц	Δf_1 , МГц
$U_3 = -0,3 \text{ В}, U_c = 5,4 \text{ В}, I_c^* = 40 \text{ мА}$		
637	17,80	0,9
641	17,89	1,0
644	17,96	1,0
645	17,98	1,0
$U_3 = -0 \text{ В}, U_c = 5,5 \text{ В}, I_c = 50 \text{ мА}$		
627	17,56	1,0
640	17,86	1,0

* I_c – ток стока.



а



б

Рис. 8. Исследование режимов генерации регулярных сигналов: *а* – генерация регулярного сигнала, основная частота $f = 19,36$ ГГц, полуширина по уровню минус 3 дБ $\Delta f = 0,6$ кГц; *б* – вторая гармоника сигнала, частота $f = 35,50$ ГГц, полуширина по уровню минус 3 дБ $\Delta f = 0,9$ кГц

Сравнительно узкая полоса пропускания волноводной оснастки (около 2 ГГц) не позволяет получить значительную перестройку центральной частоты и шумовые режимы генерации для ненасыщенных (доменных) режимов ферритового резонатора.

Проведенные исследования генератора показывают соответствие экспериментальных и расчетных результатов. Для разработки СВЧ- и КВЧ-устройств с заданными характеристиками необходимо провести корректировку измерительной оснастки и магнитной системы под конкретные технические требования.

Литература

1. Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики / Б. Лакс, К. Баттон; пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 676 с.
2. Гуревич А.Г., Мелхов Г.А. Магнитные колебания и волны / А.Г. Гуревич, Г.А. Мелхов. – М.: Физ.-мат. литературы, 1994. – 574 с.
3. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.
4. Электродинамическое проектирование селективных усилителей с гетеромагнитным взаимодействием. Проблемы защиты информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам / А.Л. Хвалин, А.А. Игнатъев, А.В. Васильев [и др.] // Материалы Всероссийской научно-практической конференции представителей органов по аттестации, аккредитованных в Системе сертификации Госстандарта России и организаций-лицензиатов. г. Саратов, РАЦ «Тантал», 25 – 27 июня 2003 г. – Саратов, 2003. – С.129 – 135.

Поступила в редакцию 02.10.2009

Александр Львович Хвалин, канд. техн. наук, доцент, т. 8-905-321-55-02, e-mail: Khvalin63@mail.ru.
Александр Васильевич Васильев, зав. лабораторией кафедры.
Александр Анатольевич Игнатъев, д-р физ.-мат. наук, профессор, т. (845-2)34-08-70.
Виктор Николаевич Самолданов, ассистент, т. (845-2)34-08-70.