

Раздел II. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-89-97

Д.Е. Губарев, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

ГЕНЕРАТОР С КООКСИАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Автогенераторы нашли широкое применение в приёмно-передающей аппаратуре связи, навигации и радиолокации, так как определяют их стабильность, мощность и другие важные параметры. Объектом исследования в данной работе является гетеродин из состава анализатора спектра С4-60. Поскольку техническое описание этого прибора не содержит ряд важных параметров, целью исследования является исследование выбега частоты, зависимости частоты от напряжения питания, уровня гармоник. Приведены принципиальная схема и краткое описание конструкции генератора. Проведено моделирование коаксиального резонатора в пакете Microwave Office. Приведена амплитудно-частотная характеристика резонатора. Представлены результаты экспериментального исследования автогенератора. Дана оценка паразитных параметров в спектре выходного сигнала. Измерены выбег частоты и модуляционная характеристика по цепи питания. Эти данные позволяют предъявить обоснованное требование к стабильности питающего напряжения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании приёмно-передающей аппаратуры связи, навигации, радиоэлектронной борьбы. Статья может быть полезна студентам и преподавателям учебных заведений при учебном проектировании приёмно-передающей аппаратуры. Достигнуты следующие электрические параметры: – рабочая частота $1500 \pm 1,5$ МГц; – выходная мощность не менее 13 дБм; – напряжение питания минус 12,6 В; – ток потребления не более 60 мА; – выбег частоты за 24 минуты после включения не более 325 кГц; – уход частоты при изменении напряжения от минус 5 В до минус 13 В не более 241 кГц.

Генератор; стабилизированный коаксиальным резонатором; эксперимент; модуляционная характеристика; выбег частоты; ширина спектра; уровень гармоник.

D.E. Gubarev, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

GENERATOR WITH COAXIAL RESONATOR

Autogenerators have found wide application in the receiving and transmitting equipment of communication, navigation and radar, as they determine their stability, power and other important parameters. The object of research in this work is a 1.5 GHz heterodyne from the C4-60 spectrum analyzer. Since the technical description of this device does not contain a number of important parameters, the purpose of the study is to study the frequency run-out, the frequency dependence on the supply voltage, the harmonic level. A schematic diagram and a brief description of the generator design are given. The simulation of a coaxial resonator in the Microwave Office package is carried out. The amplitude-frequency characteristic of the resonator is given. The results of an experimental study of a 1.5 GHz autogenerator are presented. The estimation of parasitic parameters in the spectrum of the output signal is given. The frequency run-out and modulation characteristic along the power supply circuit were measured. These data allow us to make a reasonable requirement for the stability of the supply voltage. The results obtained can be used in the design of receiving and transmitting communication equipment, navigation, electronic warfare. The article may be useful for students and teachers of educational institutions in the educational design of

receiving and transmitting equipment. The following electrical parameters have been achieved: – operating frequency 1500 ± 1.5 MHz; – output power of at least 13 dBm; – supply voltage minus 12.6 V; – consumption current no more than 60 mA; – frequency run-out in 24 minutes after switching on no more than 325 kHz; – frequency departure when the voltage changes from minus 5 V to minus 13 V no more than 241 kHz.

Generator stabilized by a coaxial resonator; experiment; modulation characteristic; frequency run-out; spectrum width; harmonic level.

Введение. Стабилизация частоты генераторов СВЧ является актуальной задачей с 30-х годов 20 века по настоящее время. Наличие обширной литературы, в том числе монографий [1, 2], учебных пособий [3, 6], статей [7], патентов [8], диссертаций [9–15], подтверждает значимость и необходимость проведения исследований по данному вопросу.

Целью данной работы является исследование транзисторного генератора СВЧ, стабилизированного коаксиальным резонатором. Объектом исследования является автогенератор 1,5 ГГц из состава анализатора спектра С4-60 [16, 17].

Выбор коаксиального резонатора в данном случае связан с тем, что другие способы стабилизации частоты 1,5 ГГц существенно сложнее. Например, кварцевая стабилизация частоты требует многократного умножения частоты [5, 11]. Стабилизация частоты диэлектрическим резонатором затруднена в связи с тем, что серийные диэлектрические резонаторы не выпускаются на частоту 1,5 ГГц [13]. Стабилизация частоты фильтром или линией задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) возможна, если доступна субмикронная технология [15]. Однако для большинства предприятий приборостроительного профиля эта технология недоступна.

Схема и конструкция. Автогенератор на частоту 1,5 ГГц построен по схеме, показанной на рис. 1. Активным элементом генератора является транзистор Т1 типа 2Т640А2 [18]. Его коллектор заземлён, эмиттер связан с коаксиальным резонатором Э1, а выход сделан из цепи базы. В цепи питания установлен трёхзвенный фильтр нижних частот. Смещение на базу обеспечивает делитель напряжения на резисторах R2, R3. Фото генератора со снятой крышкой можно видеть на рис. 2.

Резонатор представляет собой отрезок коаксиальной линии, закороченный с одной стороны, и имеющий ёмкостной зазор h1 с крышкой с другой стороны (рис. 3). Резонансную частоту резонатора можно подстраивать в небольших пределах изменением расстояния h1. Корпус резонатора изготовлен из инвара и покрыт серебром. Для повышения добротности резонатора его внутренние поверхности рекомендуется полировать.

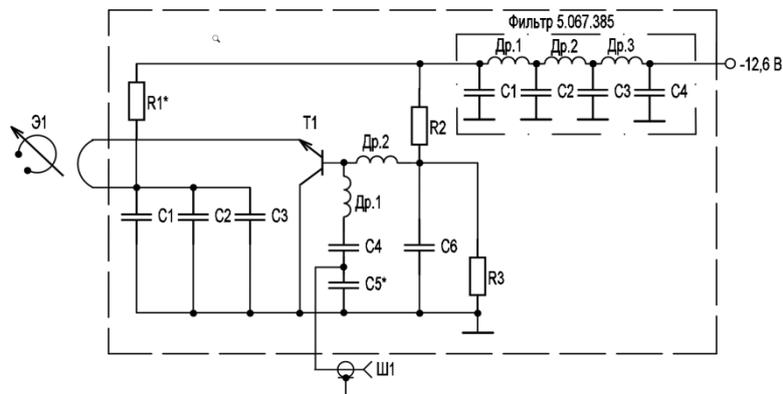


Рис. 1. Принципиальная схема генератора 1,5 ГГц

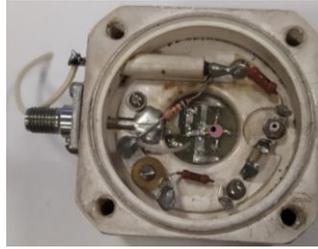


Рис. 2. Фото генератора со снятой крышкой со стороны активной части



Рис. 3. Фото генератора со снятой крышкой со стороны коаксиального резонатора

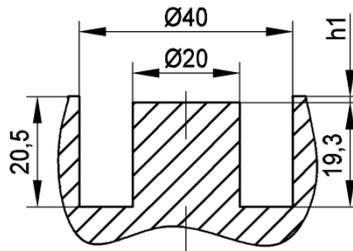


Рис. 4. Резонатор в разрезе с размерами

Моделирование резонатора. Моделирование резонатора проводилось с целью определения ёмкости, включенной между центральным проводником резонатора и его крышкой. Моделирование резонатора проводилось в среде Microwave Office [19, 20] (MWO). Отличительной особенностью этой модели является ёмкостная связь резонатора с источником сигнала и нагрузкой, тогда как на рис. 1 связь резонатора с транзистором является индуктивной. Такая замена связана с тем, что в MWO связанные линии должны быть одинаковыми. Модель резонатора приведена на рис. 5. Подключение источника сигнала и нагрузки к коаксиалу осуществляется на расстоянии 2 мм от заземленного конца. Настройка резонатора на частоту 1,5 ГГц осуществлялась путём вариации ёмкости между разомкнутым концом центрального проводника и крышкой. Удовлетворительный результат настройки резонатора на частоту 1,5 ГГц был получен при ёмкости $C1 = 3,67$ пФ. При этом резонансная кривая имеет вид, показанный на рис. 6.

Первый эксперимент проводился по измерению выбега частоты после включения с шагом в 1 минуту. Результаты измерения частоты заносились в таблицу 1. По данным табл. 1 построен график на рис. 8. Из этого рисунка видно, что температурный коэффициент частоты (ТКЧ) положительный. Среднее значение скорости дрейфа частоты за 24 минуты составляет 13,54 кГц/мин.

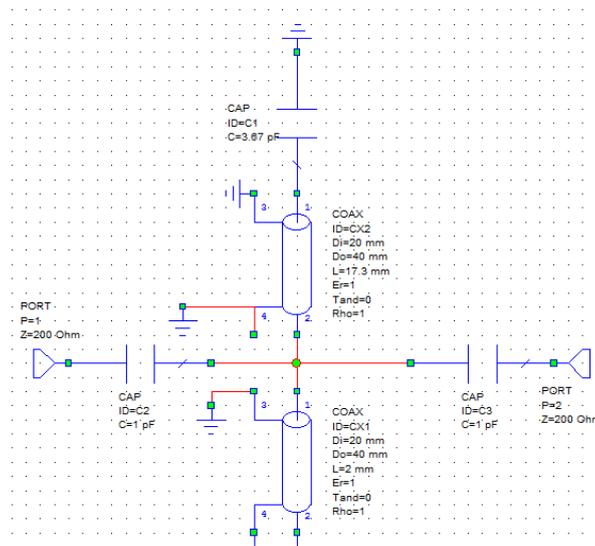


Рис. 5. Модель резонатора

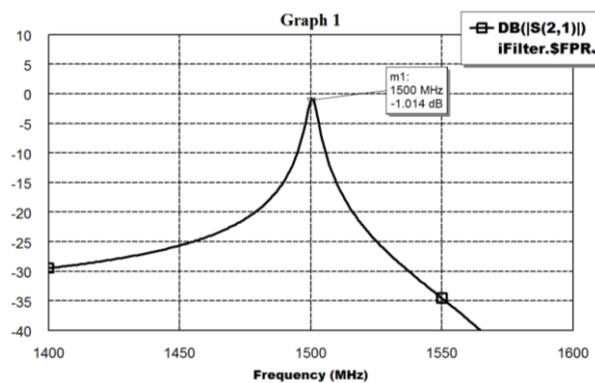


Рис. 6. АЧХ резонатора

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 7.

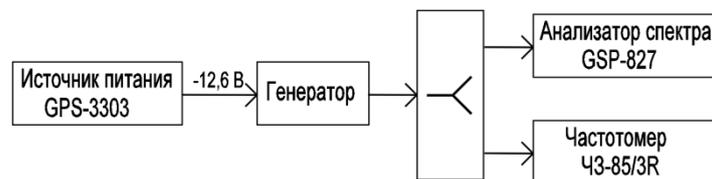


Рис. 7. Структурная схема измерительной установки

Второй эксперимент проводился для снятия модуляционной характеристики генератора по питанию. Результаты измерений заносились в табл. 2. Измерения проводились для $U_{пит}$ от 6 до 13 В с шагом 1 В. По данным табл. 2 выполнен график на рис. 9. Из этого графика видно, что средняя крутизна модуляционной характеристики составляет 34,43 кГц/В.

Таблица 1

Выбег частоты

t, мин	f _{вых} , ГГц	t, мин	f _{вых} , ГГц
5	1.498769	18	1.498973
6	1.498790	19	1.498984
7	1.498812	20	1.498997
8	1.498827	21	1.499009
9	1.498850	22	1.499020
10	1.498860	23	1.499031
11	1.498873	24	1.499042
12	1.498889	25	1.499053
13	1.498903	26	1.499064
14	1.498917	27	1.499074
15	1.498931	28	1.499084
16	1.498945	29	1.499094
17	1.498959		

Таблица 2

Зависимость частоты от напряжения питания

Упит, В	f _{вых} , ГГц
-6	1.499069
-7	1.499137
-8	1.499188
-9	1.499232
-10	1.499261
-11	1.499285
-12	1.499300
-13	1.499310

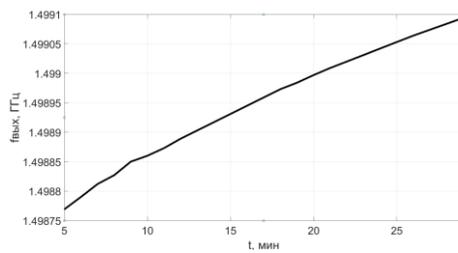


Рис. 8. Выбег частоты

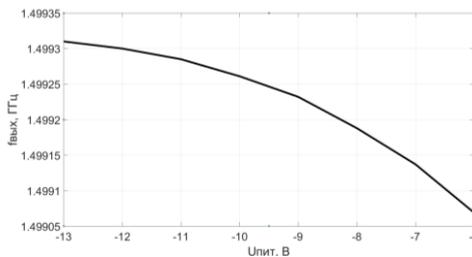


Рис. 9. Зависимость частоты генератора от напряжения питания

В третьем эксперименте проводилось фотографирование спектра выходного сигнала. На рис. 10 представлен спектр трёх гармоник выходного сигнала и их абсолютный уровень. На рис. 10 хорошо заметно, что уровень второй гармоники ниже уровня третьей, так как угол отсечки для последней более оптимален.

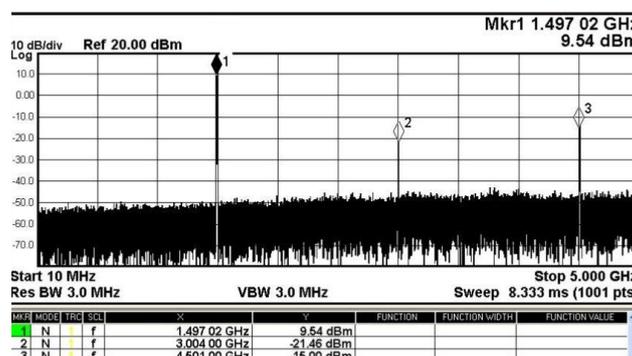


Рис. 10. Спектр выходного сигнала

В табл. 3 приводится сравнение заданных и измеренных параметров генератора.

Таблица 3

Основные параметры генератора

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Рабочая частота, МГц	1500 ± 1,5	1499
Выходная мощность, дБм	12,5	13
Выбег частоты за 24 минуты, кГц	–	325
Уход частоты при изменении напряжения питания от 6 до 13 В, кГц	–	241
Напряжение питания, В	-12,6	-12,6
Ток потребления, мА	60	40
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	50	50

Из этой таблицы видно, что все требования к генератору выполняются. Генератор рекомендуется использовать в качестве гетеродина.

Заключение. Генератор, стабилизированный коаксиальным резонатором на частоте около 1,5 ГГц, имеет следующие параметры:

- ◆ выбег частоты за 24 минуты после включения не более 325 кГц;
- ◆ уход частоты при изменении напряжения питания от минус 6 до минус 13 В составил 241 кГц;
- ◆ уровень второй гармоники ниже полезного сигнала на 31 дБ;
- ◆ уровень третьей гармоники ниже полезного сигнала на 24,54 дБ.

Показано достижение относительной нестабильности частоты порядка $\pm 10^{-4}$ /градус (резонатор из латуни). Дальнейшее повышение стабильности возможно путём применения более стабильных материалов резонатора – инвара, суперинвара, стабилитина, а также повышением добротности резонатора полированием.

Радикальное повышение стабильности частоты (на порядок и более) возможно при использовании других схемотехнических и технологических решений – путём умножения частоты кварцевого генератора, использованием резонаторов на поверхностных акустических волнах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
2. Шитиков Г.Т. Стабильные диапазонные автогенераторы. – М.: Сов. Радио, 1965. – 614 с.
3. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Передатчики помех современным средствам связи: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 176 с.
4. Гарматюк С.С. Задачник по устройствам генерирования радиосигналов: учеб. пособие. – М.: ДМК-Пресс, 2015. – 672 с.
5. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Стабильность частоты генераторов СВЧ: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 138 с.
6. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: учеб. пособие. – М.: Академия, 2005. – 224 с.
7. Бровченко С.П., Зикий А.Н., Чернышева О.А. СВЧ транзисторный автогенератор, стабилизированный диэлектрическим резонатором // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 182-184.
8. Патент США №3.866.144. Microwave Oscillator, Публ. 1975 г., 11 февраля. Т. 931, № 2. М. кл. H03B 7/14, НКИ 331 – 107G/.
9. Коробов О.Н. Широкополосные автогенераторы Ганна с ферритовыми резонаторами и распределённой связью: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1980.
10. Мусьяков М.И. Температурная и режимная нестабильность частоты одноконтурных и многоконтурных транзисторных автогенераторов: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1980.
11. Прокопенко В.Г. Исследование принципов построения высокостабильных интегральных кварцевых генераторов с нелинейным ограничением напряжения, приложенного к кварцевому резонатору: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог: ТРТУ, 1995. – 24 с.
12. Царапкин Д.П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: МЭИ, 2004.
13. Соколов И.А. Разработка и исследование малощумящих источников колебаний СВЧ диапазона, стабилизированных диэлектрическими резонансными системами: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: 1996. – 165 с.
14. Станков Л.Р. Стабилизация частоты с помощью кольцевых диэлектрических резонаторов: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 1984. – 11 с.
15. Ляшук А.Н. Исследование и разработка стабильных ВЧ ударостойких генераторов на основе ПАВ компонентов: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск: Омский госуд. технический университет, 2014.
16. Анализатор спектра С4-60. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЭ1.406.056ТО. Ч. I.
17. Анализатор спектра С4-60. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЭ1.406.056ТО. Ч. II. – 221 с.
18. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности СВЧ и их зарубежные аналоги. Справочник. – Т. 4. – М.: Куб К-а, 1997. – 544 с.
19. Бахвалова С.А., Романюк В.А. Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 152 с.
20. Разевиг Д.В., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.

REFERENCES

1. Radioizmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and HF radio measuring equipment. Node and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
2. Shitikov G.T. Stabil'nye diapazonnye avtogeneryatory [Stable range autogenerators]. Moscow: Sov. Radio, 1965, 614 p.
3. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Peredatchiki pomekh sovremennym sredstvam svyazi: ucheb. posobie [Transmitters of interference with modern means of communication: study guide]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 176 p.
4. Garmatyuk S.S. Zadachnik po ustroystvam generirovaniya radiosignalov: ucheb. posobie [Taskbook on devices for generating radio signals: textbook]. Moscow: DМК-Press, 2015, 672 p.

5. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Stabil'nost' chastoty generatorov SVCh: ucheb. posobie [Frequency stability of microwave generators: study guide]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 138 p.
6. *Belov L.A.* Formirovanie stabil'nykh chastot i signalov: ucheb. posobie [Formation of stable frequencies and signals: textbook]. Moscow: Akademiya, 2005, 224 p.
7. *Brovchenko S.P., Zikiy A.N., Chernysheva O.A.* SVCh tranzistornyy avtogenerator, stabilizirovanny dielektricheskim rezonatorom [Microwave transistor generator stabilized by a dielectric resonator], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3, pp. 182-184.
8. Patent SSHA №3.866.144. Microwave Oscillator, Publ. 1975 g., 11 fevralya, tom 931, №2. M. kl. N0ZV 7/14, NKI 331 – 107G/ [US Patent No.3.866.144. Microwave Oscillator, Publ. 1975, February 11, volume 931, No. 2. M. cl. N0ZV 7/14, NKI 331 - 107G/].
9. *Korobov O.N.* Shirokopolosnye avtogeneratory Ganna s ferritovymi rezonatorami i raspredelenny svyaz'yu: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Gann broadband autogenerators with ferrite resonators and distributed communication: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 1980.
10. *Musyankov M.I.* Temperaturnaya i rezhimnaya nestabil'nost' chastoty odnokonturnykh i mnogokonturnykh tranzistornykh avtogeneratorov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Temperature and regime instability of the frequency of single-circuit and multi-circuit transistor generators: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 1980.
11. *Prokopenko V.G.* Issledovanie printsipov postroeniya vysokostabil'nykh integral'nykh kvartsevykh generatorov s nelineynym ogranicheniem napryazheniya, prilozhennogo k kvartsevomu rezonatoru: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of the principles of construction of highly stable integral quartz generators with nonlinear voltage limitation applied to a quartz resonator: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog: TRTU, 1995, 24 p.
12. *Tsarapkin D.P.* Metody generirovaniya SVCh kolebaniy s minimal'nym urovnem fazovykh shumov: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of generating microwave oscillations with a minimum level of phase noise: dr. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 2004.
13. *Sokolov I.A.* Razrabotka i issledovanie maloshumyashchikh istochnikov kolebaniy SVCh diapazona, stabilizirovannykh dielektricheskimi rezonansnymi sistemami: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of low-noise sources of microwave oscillations stabilized by dielectric resonant systems: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: 1996, 165 p.
14. *Stankov L.R.* Stabilizatsiya chastoty s pomoshch'yu kol'tsevykh dielektricheskikh rezonatorov: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk [Frequency stabilization using ring dielectric resonators: abstract, cand. of phys. and math. sc. diss.]. Moscow: MGU, 1984, 11 p.
15. *Lyashuk A.N.* Issledovanie i razrabotka stabil'nykh VCh udarostoykikh generatorov na osnove PAV komponentov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Research and development of stable HF shock-resistant generators based on surfactant components: cand. of eng. sc. diss.]. Omsk: Omskiy gosud. tekhnicheskiiy universitet, 2014.
16. Analizator spektra S4-60. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. EE1.406.056TO. Ch. I [Spectrum analyzer S4-60. Technical description and operating instructions. EE1.406.056TO. Part I.
17. Analizator spektra S4-60. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. EE1.406.056TO. Ch. II [Spectrum analyzer S4-60. Technical description and operating instructions. EE1.406.056TO. Part II], 221 p.
18. *Petukhov V.M.* Bipolyarnye tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti SVCh i ikh zarubezhnye analogi. Spravochnik [Bipolar transistors of medium and high power microwave and their foreign analogues. Handbook]. Vol. 4. Moscow: Kub K-a, 1997, 544 p.
19. *Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A.* Osnovy modelirovaniya i proektirovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv v Microwave Office: ucheb. posobie [Fundamentals of modeling and design of radio engineering devices in Microwave Office: textbook]. Moscow: Solon-Press, 2016, 152 p.
20. *Razevig D.V., Potapov Yu.V., Kurushin A.A.* Proektirovanie SVCh ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office [Designing microwave devices using Microwave Office]. Moscow: Solon-Press, 2003, 496 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89614132918; кафедра АиРПУ; аспирант.

Зикий Анатолий Николаевич – e-mail: zikiy50@mail.ru; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Кочубей Алексей Сергеевич – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896270939; магистр; инженер-конструктор 2 категории.

Gubarev Dmitry Egorovich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79614132918; the department of A&RPU; post-graduate student.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – e-mail: zikiy50@mail.ru; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

Kochubey Alexey Sergeevich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896270939; master; design engineer of the 2nd category.

УДК 621.382.3

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-97-106

П.Г. Грицаенко, Л.А. Светличная

ЛОГИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ СБИС НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С P-N-ПЕРЕХОДАМИ

В 80-е годы прошлого столетия в качестве элементной базы широко применялась интегральная инжекционная логика (И²Л). Несколько позднее в развитие возможностей И²Л для построения СБИС появилась инжекционно-полевая логика (ИПЛ). Благодаря применению в качестве ключевого элемента инвертора полевого транзистора, в данном элементном базисе удалось существенно сократить важный для СБИС показатель – потребляемую мощность – достигнув пиковаттного диапазона. Еще большее снижение потребляемой мощности может быть достигнуто использованием в элементарной ячейке инвертора двух полевых транзисторов, которое предлагается в настоящей работе. Данный элементный базис предложено называть полевой-полевой логикой, или в дальнейшем П²Л. Для снижения габаритов П²Л-ячейки полевые транзисторы, как ключевой, так и нагрузочный, выполнены с вертикальным каналом. Кроме того, для обеспечения положительного напряжения питания в качестве ключевого используется n-канальный транзистор, в качестве нагрузочного – p-канальный транзистор. Оба транзистора являются нормально закрытыми, т.е. закрыты при нулевом напряжении на затворе каждого из них. Рассмотрены топологические варианты выполнения П²Л-ячейки от геометрии с кольцевыми затворами до геометрии с линейными затворами. Топологическими нормами, принятыми в рассмотрении, являются нормы 50 нм. Потребляемая мощность в данном элементном базисе снижена по сравнению с ИПЛ примерно в два раза, благодаря тому, что ток через нагрузочные транзисторы, так же, как и через ключевые, в цепочке инверторов протекает через один инвертор. Рассмотрен технологический процесс изготовления П²Л-ячейки, рассчитаны профили распределения примесей по глубине. Технологический процесс изготовления разработан с учетом того, что нагрузочный p-канальный транзистор должен быть выполнен в изолированном кармане по технологии полной диэлектрической изоляции. Приведены технологические режимы изготовления П²Л-ячейки. Предлагаемый конструктивно-технологический вариант П²Л-ячейки может быть рекомендован для создания СБИС с низкой потребляемой мощностью.

Инжекционно-полевая логика; интегральная инжекционная логика; полевая-полевая логика; профиль распределения примеси; плотность компоновки; потребляемая мощность.