

11. Tekhnicheskoe rukovodstvo – TSifrovoy viskozimetr model' 7829 - Solartron mobrey, 2002 g. [Technical Manual-Digital Viscometer model 7829-Solartron mobrey, 2002].
12. Preobrazovateli plotnosti zhidkosti izmeritel'nye Micro Motion 7835/45/47. Rukovodstvo po ustanovke i nastroyke konfiguratsii. MMI-20018786, Red. AA, 2011 [Liquid density transmitters measuring Micro Motion 7835/45/47. Installation and Configuration guide. MMI-20018786, Ed. AA, 2011], 150 p.
13. *Bogush M.V., Zatserklyannyy O.V., Pikalev E.M.* Modelirovanie vibratsionnogo datchika plotnosti metodom konechnykh elementov [Modeling of a vibration density sensor by the finite element method], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2018, No. 10, pp. 8-13.
14. *Zatserklyannyy O.V.* Vibratsionnye plotnomery gazov i zhidkostey dlya produktsii gazokondensatnykh skvazhin [Vibrational density meters of gases and liquids for the production of gas-condensate wells], *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in the oil industry], 2011, No. 2, pp. 9-13.
15. *Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. i dr.* Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical quantities: Handbook], ed.by I.S. Grigor'eva, E.Z. Meylikhova. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p.
16. GOST 6709-72. Voda distillirovannaya. Tekhnicheskie usloviya [GOST 6709-72. Distilled water. Technical conditions]. Moscow: Standartinform, 2007, 12 p.
17. GSSSD 8-79 Vozdukh zhidkiy i gazoobraznyy. Plotnost', ental'piya, entropiya i izobarnaya teploemkost' pri temperaturakh 70–1500 K i davleniyakh 0,1...100 MPa. Tablitsy standartnykh spravochnykh dannykh [GSSSD 8-79 Liquid and gaseous air. Density, enthalpy, entropy and isobaric heat capacity at temperatures of 70-1500 K and pressures of 0.1 ... 100 MPa. Tables of standard reference data], 10 p.
18. GSSSD 187-99 Voda. Udel'nyy ob'em i ental'piya pri temperaturakh 0...1000 °S i davleniyakh 0,001...1000 MPa. Tablitsy standartnykh spravochnykh dannykh [GSSSD 187-99 Water. Specific volume and enthalpy at temperatures 0 ... 1000 With and pressures of 0.001...1000 MPa. Tables of standard reference data], 41 p.
19. GOST 443-76. Nefrasy S2-80/120 i S3-80/120. Tekhnicheskie usloviya [GOST 443-76. Oil solvent S2-80/120, and C3-80/120. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1988, 7p.
20. GOST 13032-77. Zhidkosti polimetilsiloksanovye. Tekhnicheskie usloviya [GOST 13032-77. Polymethylsiloxane liquids. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1997, 17 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.К. Шелковников.

Зацерклянный Олег Владимирович – НКТЬ "Пьезоприбор" лаборатория 2.6, Южный федеральный университет; e-mail: ZaOleg2003@rambler.ru; Ростов-на-Дону, Россия; тел.:+79287617874; инженер.

Zatserklyanyi Oleg Vladimirovich – SCTB "Piezopribor", laboratory 2.6, Southern Federal University; e-mail: ZaOleg2003@rambler.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79287617874; engineer.

УДК 621.373.52

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-189-196

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОДИННОГО МОДУЛЯ

Гетеродины являются неотъемлемой составной частью любого супергетеродинного приёмника. Именно они определяют стабильность и точность настройки приёмника. Целью данной работы является создание гетеродинного модуля с улучшенными электрическими параметрами, с малыми габаритами и массой. Объектом исследования является пятиканальный гетеродин сантиметрового диапазона волн. Такой гетеродин можно использовать в многоканальном супергетеродинном приёмнике обнаружения сигналов. Проведено экспериментальное исследование двух каналов пятиканального гетеродина – верхнего и нижнего по частоте настройки. Представлены результаты в виде кривых выбега частоты за полчаса работы после включения, а также спектры выходных сигналов в

ближней и дальней зоне. Дана функциональная схема модуля, краткое описание конструкции и методика эксперимента. Конструкция модуля имеет габаритные размеры корпуса 170x20x40 мм, стандартизована и позволяет интегрировать модуль в состав различных приёмников. В состав каждого канала гетеродинного модуля входит стабилизатор напряжения, автогенератор с диэлектрическим резонатором, усилитель мощности, детектор контроля мощности и делитель мощности на два. В результате проведённых экспериментов достигнуты следующие параметры: – рабочие частоты 9,25 и 16,25 ГГц; максимальная мощность выходного сигнала при отсутствии усилителя не менее 2 мВт; – выбег частоты 80 кГц для частоты 9,25 ГГц; – выбег частоты 600 кГц для частоты 16,25 ГГц; – напряжение питания + 15 В; – ширина спектральной линии не более 5 кГц; – подавление второй гармоники не менее 25 дБ; – имеется включение-выключение каждого из каналов гетеродинного модуля и встроенный контроль работоспособности.

Автогенератор; стабильность частоты; диэлектрический резонатор; схема; конструкция; эксперимент; элементная база.

A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

EXPERIMENTAL STUDY OF THE HETERODYNE MODULE

Heterodynes are an integral part of any superheterodyne receiver. They determine the stability and accuracy of the receiver settings. The purpose of this work is to create a heterodyne module with improved electrical parameters, with small dimensions and weight. The object of research is a five-channel heterodyne of the centimeter wave range. Such a heterodyne can be used in a multi-channel superheterodyne signal detection receiver. An experimental study of two five-channel channels-the upper and lower frequency heterodyne tuning. The results are presented in the form of frequency run-out curves for half an hour of operation after switching on, as well as the spectra of output signals in the near and far zones. The functional diagram of the module, a brief description of the design and the experimental method are given. The design of the module has the overall dimensions of the case 170x20x40 mm, is standardized and allows you to integrate the module into various receivers. Each channel of the heterodyne module includes a voltage stabilizer, an autogenerator with a dielectric resonator, a power amplifier and a power control detector, and a power divider by two. As a result of the experiments, the following parameters were achieved: – operating frequencies of 9.25 and 16.25 GHz; – maximum output power in the absence of an amplifier of at least 2 mW; – the run-out frequency of 80 kHz to 9.25 GHz frequency; – run-on frequency 600 kHz for the frequency of 16.25 GHz; – supply voltage + 15 V; – spectral line width no more than 5 kHz; –second harmonic suppression of at least 25 dB; – there is an on / off switch for each channel of the heterodyne module and built-in health monitoring.

Autogenerator; frequency stability; dielectric resonator; circuit; design; experiment; element base.

Введение. Принципам построения автогенераторов и гетеродинов СВЧ посвящены многочисленные публикации, в том числе монографии [1–9], учебные пособия [10–17], статьи [18–20], диссертации, патенты, реклама, однако до сих пор эта тема не исчерпана. Поиск новых технических решений ведётся в направлении освоения новых диапазонов частот, уменьшения массы и габаритов, повышения стабильности частоты и улучшения других параметров. Целью данной работы является разработка и исследование многоканального гетеродина для приёмника обнаружения сигналов. Объектом исследования является пятиканальный гетеродин сантиметрового диапазона. К нему предъявляются следующие требования:

- ◆ диапазон частот – сантиметровый;
- ◆ выходная мощность 5–10 мВт на каждом из 10 выходов;
- ◆ относительная нестабильность частоты $\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$ при воздействии всех дестабилизирующих факторов;
- ◆ питание + 15 В;
- ◆ габариты не более 170x200x40 мм;
- ◆ гетеродин должен содержать датчики контроля мощности и выдавать сигнал исправности;

- ◆ гетеродин должен иметь управление включением/выключением независимо для каждого канала;
- ◆ подавление второй гармоники по отношению к полезному сигналу не менее 25 дБ.

Схема и конструкция. Указанные выше требования можно реализовать по схеме, приведённой на рис. 1.

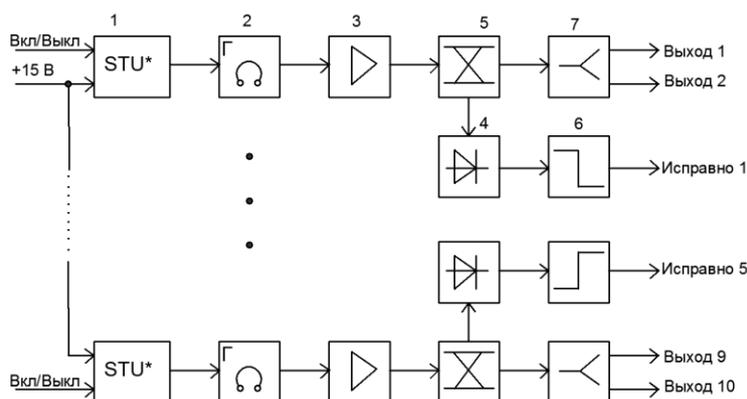


Рис. 1. Функциональная схема пятиканального гетеродина

Гетеродин состоит из стабилизатора напряжения 1, генераторных головок 2, усилителей мощности 3, детекторов контроля мощности 4, направленных ответвителей 5, компараторов 6 и делителей мощности 7. Стабилизаторы напряжения 1 реализованы на микросхемах 142ЕН3. В качестве генераторных головок 2 использованы серийные генераторы «Орсель», стабилизированные диэлектрическими резонаторами. В качестве усилителя использована микросхема М421227-3. Направленный ответвитель 5 выполнен одноступенчатым с боковой связью длиной $\lambda/4$. Детектор 4 выполнен на диоде с барьером Шотки типа 3А131. В качестве компаратора 6 применена микросхема 1481СА6Р. Делитель мощности 7 является кольцевым равноплечим по схеме Вилкоксона. СВЧ часть гетеродина представляет собой микросборку, в которой имеется 5 каналов гетеродина. Для уменьшения стоимости макета гетеродина в нём не установлены микросхемы усилителей СВЧ. Делитель мощности, направленный ответвитель и детектор контроля мощности выполнены на плате из поликора размером 15х30 мм. Платы из поликора питаются на носители, которые крепятся в корпусе винтами. Такая конструкция делает гетеродин ремонтпригодным в условиях производства.

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте измерялся выбег частоты гетеродина с номинальной частотой 9,25 ГГц. Результаты измерений заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построен график на рис. 3, из которого видно, что выбег частоты за 25 минут составил около 80 кГц.

Во втором эксперименте измерялся выбег частоты гетеродина с номинальной частотой 16,25 ГГц. Результаты измерений заносились в табл. 1. По данным табл. 1 для гетеродина 16,25 ГГц построен график на рис. 4, из которого видно, что выбег частоты за 30 минут составил около 600 кГц.

В третьем эксперименте проводилось фотографирование спектров сигналов обоих гетеродинов в ближней и дальней зонах. На рисунке 5 можно видеть спектр гетеродина с номинальной частотой 9,25 ГГц. При этом мощность сигнала составила 3,6 дБм, а ширина спектра на уровне минус 3 дБ от максимума около 1 кГц.

На рис. 6 изображён спектр гетеродина с номинальным значением частот 16,25 ГГц. При этом ширина спектра по уровню минус 3 дБ от максимума составила 5 кГц.

На рис. 7 можно видеть спектр первой и второй гармоники гетеродина с номинальной частотой 9,25 ГГц. Из рис. 7 видно, что вторая гармоника слабее первой на 26,85 дБ.

Таблица 1

Выбег частоты гетеродинов

№ отсчёта	F1, ГГц для гетеродина 9,25 ГГц	F2, ГГц для гетеродина 16,25 ГГц
0	9.249832	16.249500
1	9.249857	16.249987
2	9.249861	16.250027
3	9.249865	16.250052
4	9.249866	16.250064
5	9.249867	16.250073
6	9.249868	16.250077
7	9.249870	16.250083
8	9.249871	16.250088
9	9.2498726	16.250091
10	9.249873	16.250096
11	9.2498738	16.250098
12	9.2498744	16.250101
13	9.2498749	16.250106
14	9.2498755	16.250108
15	9.249876	16.250111

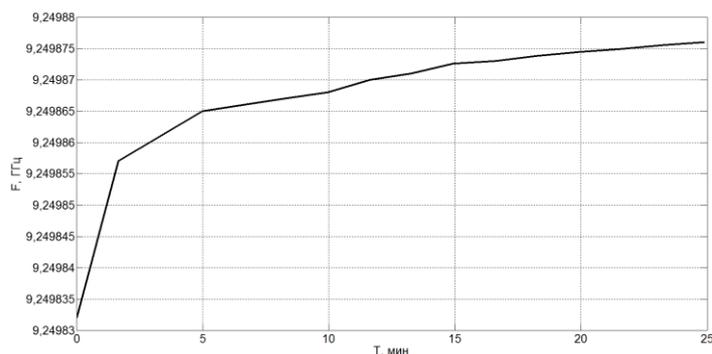


Рис. 3. Выбег частоты генератора за 25 минут после включения

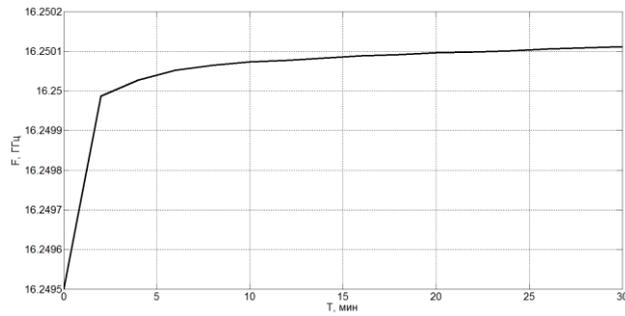


Рис. 4. Выбег частоты генератора за 30 минут после включения

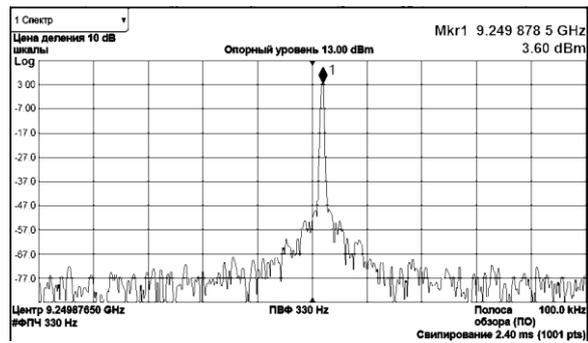


Рис. 5. Спектр сигнала при номинальном значении частоты 9,25 ГГц

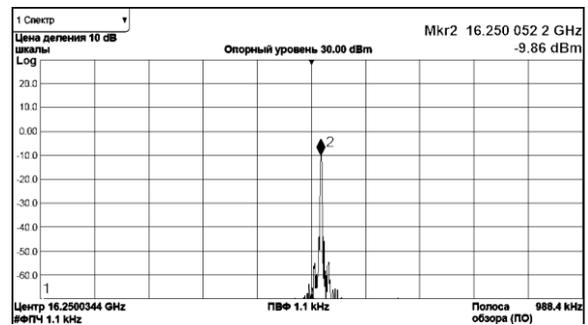


Рис. 6. Спектр сигнала при номинальном значении частоты 16,25 ГГц

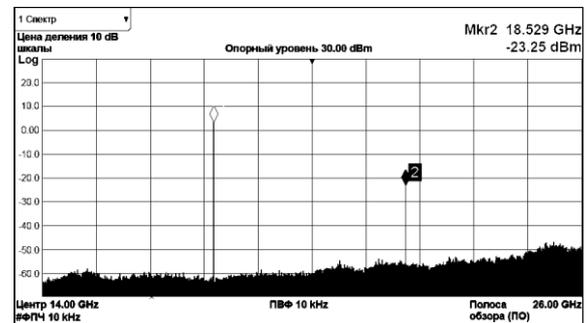


Рис. 7. Сравнение первой и второй гармоники сигнала

Выводы. Ниже в табл. 2 приведены заданные и измеренные параметры гетеродина.

Таблица 2

Основные параметры гетеродина

Наименование параметра, размерность	Задано	Эксперимент
Диапазон рабочих частот	сантиметровый	9,25 ГГц 16,25 ГГц
Выходная мощность, мВт	5–10 с усилителем 5 дБ	> 2 мВт без усилителя
Относительная нестабильность частоты	$\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$	Выбег $8,65 \cdot 10^{-6}$ для частоты 9,25 ГГц Выбег $3,7 \cdot 10^{-5}$ для частоты 16,25
Габариты, мм	170x20x40	170x20x40
Напряжение питания	+ 15 В	+ 15 В
Наличие контроля мощности	есть	есть
Управление включением/выключением	есть	есть
Ширина спектральной линии, кГц	Не задано	1 кГц для $f = 9,25$ ГГц 5 кГц для $f = 16,25$ ГГц
Подавление второй гармоники не менее, дБ	25	26,85

Из этой таблицы видно, что все требования к гетеродину выполняются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Michal Odyniec. RF and Microwave Oscillator Design. Artech House, Boston, London. 2002. – 398 p.
2. Ali Hajimiri, Thomas H. Lee. The Design of Low Noise Oscillators. Kluwer Academic Publishers, New York et al, 1999. – 207 p.
3. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
4. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. – М.: Радиотехника, 2005. – 352 с.
5. Электронные устройства СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. Т. 1. – М.: Радиотехника, 2008. – 352 с.
6. Шитиков Г.Т. Стабильные диапазонные автогенераторы. – М.: Сов. Радио, 1965. – 614 с.
7. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на ПАВ. – М.: Радио и связь, 1983. – 136 с.
8. Дворников А.А., Уткин Г.М. Автогенераторы в радиотехнике. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
9. Grebennikov A. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 437 p.
10. Белов А.А. Формирование стабильных частот и сигналов: учеб. пособие. – М.: Академия, 2005. – 224 с.
11. Шахгильдян В.В., Карякин В.Л. Проектирование устройств генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2011. – 400 с.
12. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Стабильность частоты генераторов СВЧ: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 138 с.

13. *Иванова И.Н., Махно В.В., Нойкин Ю.М.* Высокостабильные генераторы СВЧ: учеб. пособие / под ред. А.М. Лерера. – Ростов-на Дону: Изд-во ЮФУ 2018. – 102 с.
14. *Алексеев О.В., Головков А.А., Митрофанов А.В. и др.* Генераторы высоких и сверхвысоких частот: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2003. – 320 с.
15. *Белов Л.А.* Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 320 с.
16. *Гарматюк С.С.* Задачник по устройствам генерирования и формирования радиосигналов: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 736 с.
17. *Царапкин Д.П.* Стабилизация частоты возбудителей радиопередатчиков СВЧ: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 1985. – 80 с.
18. *Зикий А.Н., Зламан П.Н., Сивокос Е.В.* Экспериментальное исследование двух автогенераторов с диэлектрическими резонаторами // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2015. – № 10. – С. 198-209.
19. *Василенко В.Э., Беляев Д.В., Зикий А.Н., Сальный И.А.* Экспериментальное исследование генераторного модуля на основе автогенератора «Орсель» // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2008. – № 3. – С. 184-187.
20. *Белов Л.А., Хилькевич В.* Генераторы СВЧ с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты // *Электроника: Наука. Технология. Бизнес.* – 2006. – № 7.

REFERENCES

1. Michal Odyniec. RF and Microwave Oscillator Design. Artech House, Boston, London. 2002, 398 p.
2. *Ali Hajimiri, Thomas H. Lee.* The Design of Low Noise Oscillators. Kluwer Academic Publishers, New York et al, 1999, 207 p.
3. Radioizmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and EHF radio measuring equipment. Nodal and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
4. Generatory i usiliteli SVCh [Generators and amplifiers, microwave oven], ed. by I.V. Lebedeva. Moscow: Radiotekhnika, 2005. – 352 s.
5. Elektronnyye ustroystva SVCh [Electronic devices of microwave], ed. by I.V. Lebedeva. Vol. 1. Moscow: Radiotekhnika, 2008, 352 p.
6. *Shitikov G.T.* Stabil'nye diapazonnye avtogenery [Stable range autogenerators]. Moscow: Sov. Radio, 1965, 614 p.
7. *Dvornikov A.A., Ogurtsov V.I., Utkin G.M.* Stabil'nye generatory s fil'trami na PAV [Stable generators with filters on surfactants]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 136 p.
8. *Dvornikov A.A., Utkin G.M.* Avtogenery v radiotekhnike [Autogenerators in radio engineering]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 224 p.
9. *Grebnikov A.* RF and Microwave Transistor Oscillator Design. John Wiley & Sons, Ltd, 2007, 437 p.
10. *Belov A.A.* Formirovanie stabil'nykh chastot i signalov: ucheb. posobie [Formation of stable frequencies and signals: textbook]. Moscow: Akademiya, 2005, 224 p.
11. *Shakhgil'dyan V.V., Karyakin V.L.* Proektirovanie ustroystv generirovaniya i formirovaniya signalov v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi: ucheb. posobie [Design of devices for generating and generating signals in mobile radio communication systems: textbook]. Moscow: Solon-Press, 2011, 400 p.
12. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Stabil'nost' chastoty generatorov SVCH: ucheb. posobie [Frequency stability of microwave generators: a textbook]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 138 p.
13. *Ivanova I.N., Makhno V.V., Noykin Yu.M.* Vysokostabil'nye generatory SVCh: ucheb. posobie [High-stable microwave generators: textbook], ed. by A.M. Lerera. Rostov-on Don: Izd-vo YuFU 2018, 102 p.
14. *Alekseev O.V., Golovkov A.A., Mitrofanov A.V. i dr.* Generatory vysokikh i sverkhvysokikh chastot: ucheb. posobie [Generators of high and ultrahigh frequencies: textbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 320 p.
15. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty: ucheb. posobie [Devices for the formation of microwave signals and their components: a textbook]. Moscow: Izd. dom MEI, 2010, 320 p.

16. *Garmatyuk S.S. Zadachnik po ustroystvam generirovaniya i formirovaniya radiosignalov: ucheb. posobie* [Task book on devices for generating and generating radio signals: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TPI YuFU, 2010, 736 p.
17. *Tsarapkin D.P. Stabilizatsiya chastoty vzbuditeley radiopredatchikov SVCh: ucheb. posobie* [Stabilization of the frequency of exciters of microwave radio transmitters: textbook]. Moscow: MEI, 1985, 80 p.
18. *Zikiy A.N., Zlaman P.N., Sivokoz E.V. Eksperimental'noe issledovanie dvukh avtogeneratorov s dielektricheskimi rezonatorami* [Experimental study of two self-oscillators with dielectric resonators], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2015, No. 10, pp. 198-209.
19. *Vasilenko V.E., Belyaev D.V., Zikiy A.N., Sal'nyy I.A. Eksperimental'noe issledovanie generatornogo modulya na osnove avtogeneratora «Orsel'»* [Experimental study of the generator module based on the autogenerator "Orsel"], *Izvestiya SFedU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3, pp. 184-187.
20. *Belov L.A., Khil'kevich V. Generatory SVCh s dielektricheskimi rezonatorami dlya stabilizatsii chastoty* [Microwave generators with dielectric resonators for frequency stabilization], *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics: Science. Technology. Business], 2006, No. 7.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Зикий Анатолий Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Кочубей Алексей Сергеевич – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; 347909, г. Таганрог, ул. Шаумяна, 25, к. 43; тел.: 89896270939.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

Kochubey Aleksey Sergeevich – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; 25, Shaumyana street, ap. 43, Taganrog, 347909, Russia; phone: +79896270939.

УДК 621.3.49.7

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-196-203

С.В. Малохатко, Е.Ю. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСКИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ МЕМБРАН МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Микроэлектромеханические датчики мембранного типа изготавливаются методами поверхностной и объемной микрообработки. В последнем случае мембраны получают путем глубокого анизотропного травления монокристаллического кремниевого слоя или подложки до толщин 20–50 мкм. При этом используются как сухие, так и жидкостным способы травления. Преимуществом жидкостного травления является простота контроля латеральных размеров мембран и высокая селективность. Высокая селективность травления может быть достигнута за счет выбора подходящего состава травящего раствора, материала защитного покрытия и технологии его получения. В работе проведено экспериментальное исследование защитных свойств пленок оксида кремния, полученных методами термического окисления, плазмохимического осаждения, а также комбинированного покрытия из этих пленок в условиях жидкостного травления монокристаллического кремния в 30%-ном водном растворе гидроксида калия при температуре 80°C. Селективность травления, остаточная толщина, шероховатость и поверхностная концентрация локальных дефектов рассчитывались по данным стилусной профилометрии, оптической интерферометрии и микроскопии. Установлено, что скорости и селективности травления тер-