

УДК 621. 396

DOI:10.36815/2073-8250-2020-258-3-77-81

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОВРЕМЕННУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ РЭА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

М.В. Кулиев

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, 27

В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на долговременную стабильность частоты СВЧ генераторов. Из-за воздействия внешних факторов частота сигнала на выходе любого реального источника непрерывно изменяется во времени. Долговременная нестабильность частоты может вызываться старением материала. Для СВЧ генераторов, используемых в РЭА космического базирования, необходимо учитывать специальные воздействующие факторы окружающей среды.

Ключевые слова: СВЧ генератор, GaN, долговременная стабильность частоты

Сведения об авторах: Кулиев Мурад Васифович, m.kuliev@mail.ru

FACTORS AFFECTING THE LONG-TERM STABILITY OF MICROWAVE OSCILLATORS FOR SPACE ELECTRONIC EQUIPMENT

M. V. Kuliev

S&PE Pulsar JSC, 105187 Moscow, Okruzhnoy pr., 27

Main factors affecting the long-term stability of microwave oscillator frequency are discussed in this paper. External factors affect the signal frequency at the output of any actual source, causing it to continuously change over time. Long-term frequency instability could be attributed to aging of the material. So, it is necessary to take special environmental factors into account, when designing microwave oscillators for space electronic equipment.

Keywords: microwave oscillator, GaN, long-term frequency stability

Data on authors: Kuliev Murad Vasifovich, m.kuliev@mail.ru

Вопросы обеспечения увеличения срока активного существования космической аппаратуры длительного функционирования являются актуальными и требуют особого внимания. Необходимо создавать специальную космическую аппаратуру, выдерживающую экстремальные внешние воздействия в течение длительного жизненного цикла.

Вопросы описания нестабильностей фазы и частоты имеют важное значение, поскольку функционирование всё большего числа систем базируется на использовании высокостабильных источников сигналов. Так генераторы используются в летательных аппаратах для радиолокации и связи. Нестабильности частоты вредны, так как ухудшают качественные показатели системы в целом, например, космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. При измерении дальности нестабильность любого из работающих в системе генераторов приводит к погрешности определения дальности и определяет величину подавления мешающих отражений от неподвижных объектов в селекторах движущихся целей радиолокационных комплексов (РЛК).

Данная работа посвящена анализу факторов и методов обеспечения долговременной стабильности СВЧ генераторов для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического базирования.

Стабильность частоты излучаемого колебания является одной из важнейших технических характеристик радиопередающего устройства.

Условия эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) влияют на качество формируемых сигналов СВЧ генераторов в целом и имеют различную природу. Под влиянием переменных факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, механических воздействий и т. п.), старения элементов схемы, вариаций напряжения питания и шумовых процессов в ак-

тивном приборе и колебательной системе происходит непрерывное изменение мгновенной частоты автоколебаний.

Особенности функционирования космических систем предъявляют к используемой ЭКБ особые требования. Это прежде всего стойкость к специальным факторам и повышенные требования к наработке до отказа. Различные исходные материалы по-разному влияют на стойкость ЭКБ к воздействию специальных факторов. Достижению наилучших параметров изготавливаемой радиоаппаратуры служит сочетание ЭКБ нитрид-галлиевых приборов для СВЧ-трактов, а кремний-германиевых – для функционально сложных устройств и цифровых блоков.

Кроме того, GaN приборы обладают рядом преимуществ по сравнению с кремниевой и арсенид-галлиевой ЭКБ. GaN обладает высоким напряжением пробоя (150-200 В), что позволяет увеличить рабочее напряжение GaN приборов до 40-80 В и снизить рабочий ток. Высокая рабочая температура более 250 °С расширяет диапазон рабочих температур приборов, что также увеличивает время наработки на отказ. Повышенная устойчивость к специальным воздействиям до 80 МэВ·см²/мг также увеличивает время наработки на отказ в условиях специальных воздействий.

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования [2] показали, что радиационные воздействия приводят к образованию в элементах изделий твердотельной СВЧ электроники структурных повреждений, вызываемых воздействием высокоэнергетичного излучения.

Структурные эффекты смещения представляют собой перемещения атомов из своего нормального положения в кристаллической решётке вещества, которые могут происходить вследствие передачи атому некоторой энергии при облучении. Дозовые эффекты могут приводить к пере-

стройке зарядовых состояний в активных областях приборов.

В результате в приборных слоях могут протекать дополнительные токи утечки, или наоборот, первичные технологические дефекты могут компенсироваться с уменьшением общего тока прибора.

Анализ основных направлений работ по созданию нового поколения радиационно стойких СВЧ генераторов для РЭА космического базирования показал, что использование широкозонных гетеропереходных структур AlGaIn/GaN позволяет создавать мощные высокотемпературные и радиационно стойкие СВЧ приборы нового поколения [3].

Сравнительный анализ данных по деградации характеристик наногетероструктур транзисторов с буферным слоем AlN (AlGaIn/AlN/GaN) и без него (AlGaIn/GaN) был проведён в [4]. При этом было установлено, что введение дополнительного слоя AlN приводит не только к росту подвижности носителей в канале транзистора, но и к снижению чувствительности к воздействию протонного облучения.

Другой важный параметр в $Al_xGa_{(1-x)}$ N – это доля Al. Неоднородность проводящей зоны на границе раздела AlGaIn/GaN напрямую определяется величиной x . Высокая доля Al приводит к возрастанию плотности концентрации в слое. Она также минимизирует избыточную модуляцию этого слоя. Высокое содержание Al, однако, приводит к присутствию DX-центров, ответственных за коллапс I-V характеристик транзисторов.

Проведённые исследования показали, что чувствительность элементов конструкции СВЧ генератора к воздействиям специальных факторов можно минимизировать использованием широкозонных гетеропереходных структур AlGaIn/GaN с определённой долей Al, благодаря чему образующиеся при облучении радиационные дефекты будут взаимодействовать с исход-

ными несовершенствами гетероструктур, приводя к компенсации этих дефектов и, как следствие, к ликвидации нестабильности частоты во времени.

Дальнейшее улучшение характеристик СВЧ генераторов можно получить, применив схему комбинированной стабилизации частоты и новый принцип компенсации шумов, заключающийся в одновременном использовании внешнего высокочастотного резонатора как для параметрической стабилизации автогенератора, так и в качестве дискриминатора системы автоподстройки частоты.

Оценку долговременной стабильности частоты СВЧ генераторов, стабилизированных резонаторами на ПАВ, проводили по изменению зависимости спектральной плотности фазового шума сигнала СВЧ генератора, стабилизированного резонаторами на ПАВ.

Для оценки долговременной нестабильности частоты СВЧ генераторов измерения проводились на выборке из 100 резонаторов на ПАВ (рис. 1, 2). Результаты измерений сформировали гистограмму, в которой N – количество измерений в интервале значений $S(f_m)$, определяемом погрешностью измерений 2 дБ. $\bar{S}(f_m)$ – среднее значение спектральной плотности шума $S(f_m)$, определённое по выборке из 100 транзисторов.

Проведённые исследования долговременной стабильности частоты СВЧ генераторов по критерию изменения спектральной плотности фазового шума не выявили ухудшения спектральной плотности фазового шума СВЧ генератора, использующего резонаторы на ПАВ со сроком хранения более 20 лет.

Основными преимуществами СВЧ устройств, стабилизированных резонаторами на ПАВ, по сравнению с кварцевыми генераторами, являются более высокая рабочая частота опорного генератора (более чем на порядок) [5, 6] и большая устойчивость к внешним воздействиям [7].

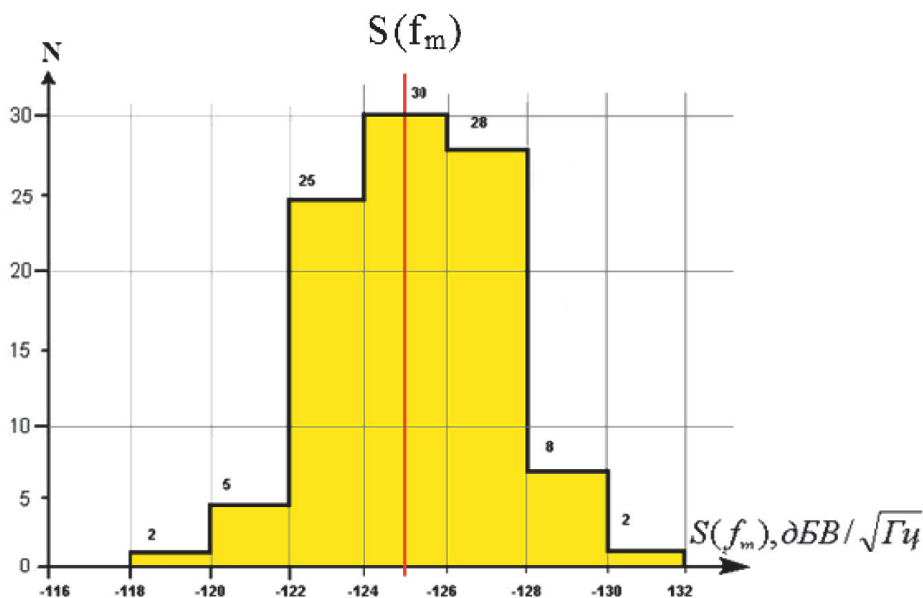


Рис. 1

Распределение результатов измерений $S(f_m)$ на частоте отстройки $f_m=1\text{кГц}$ СВЧ генератора, стабилизированного резонаторами на ПАВ, через 20 лет после их изготовления

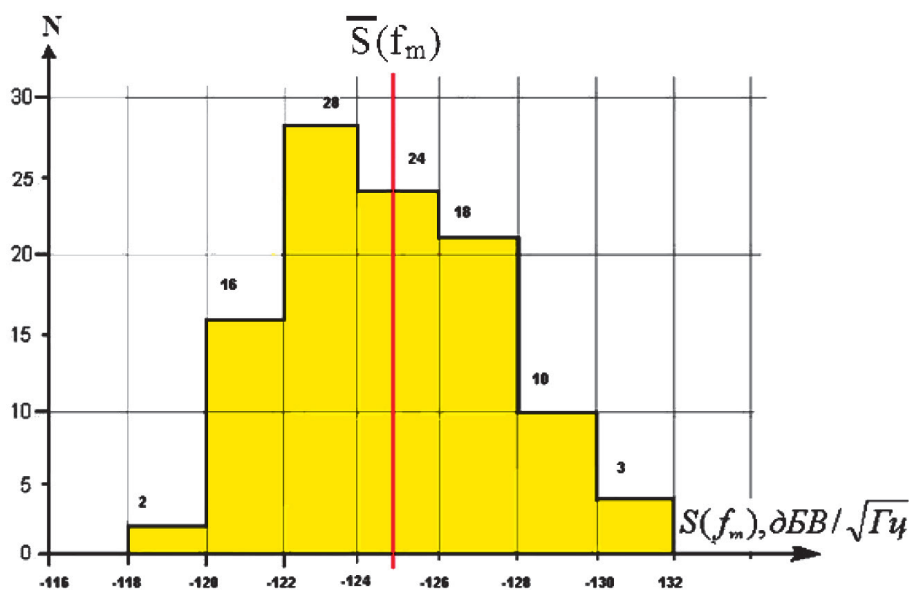


Рис. 2

Распределение результатов измерений $S(f_m)$ на частоте отстройки $f_m=1\text{кГц}$ СВЧ генератора, стабилизированного резонаторами на ПАВ, в момент изготовления

Литература

1. Груздов, В.В. Новые технологии дистанционного зондирования Земли / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Криштопов, А.И. Кудря. – Москва: Техносфера, 2018. – 482 с.
2. Громов, Д.В. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики ге-

тероструктурных полевых транзисторов на нитриде галлия / Д.В. Громов, Ю.А. Матвеев, Г.Н. Назарова / Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем», МЭС-2012. – Зеленоград: ИПИМ РАН. – 2012. –URL: <https://www.google.ru/url>

- ?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjepd7m7OrrAhVEpYsKHUDeBHoQFjACegQIBhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.spels.ru%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D839%26Itemid%3D29&usg=AOvVaw0qAAswHivY8cowO-5H8dIj
3. Васильев, А.Г. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках / А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой // М: Техносфера, 2011. – 416 с.
 4. Xinwen Hu, A.P. Karmarkar, Jun Bongim et al. Proton - irradiation effects on AlGaN/ AlN/ GaN high electron mobility transistors. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, vol. 50, no.6, pp.1791- 1796.
 5. Гуляев, Ю.В. Экспериментальное исследование высокостабильного генератора с ПАВ – резонатором в цепи обратной связи / Ю.В. Гуляев, В.Н. Григорьевский, А.М. Кмита, А.П. Кундин, О.А.Мальцев // Радиотехника и электроника. – Т. XXIX. – №8. – 1984. – С. 1641 – 1642.
 6. Дворников, А.А. К теории синхронизированного автогенератора на акустических поверхностных волнах / А.А. Дворников, В.И. Огурцов, Г.М. Уткин // Радиотехника и электроника. – 1981. – №11. – С. 2322-2327.
 7. Колковский Ю.В., Федосов В.И.. Твердотельные СВЧ генераторы, стабилизированные микросхемами серии 321ФЕхх / Ю.В. Колковский, В.И. Федосов // Электронная промышленность. – 2003. – №2 .– С.65- 70.
- effect of ionizing radiation on the performance of GaN heterostructure FETs]. Conference «Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem», 2012, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, available at: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjepd7m7OrrAhVEpYsKHUDeBHoQFjACegQIBhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.spels.ru%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D839%26Itemid%3D29&usg=AOvVaw0qAAswHivY8cowO-5H8dIj
3. Vasilyev A. G., Kolkovskiy Yu. V., Kontsevov Yu. A. SVCH pribory i ustroystva na shirokozonykh poluprovodnikakh [Microwave devices based on wide-bandgap semiconductors]. Moscow, Tekhnosfera, 2011, 416 p.
 4. Hu Xinwen, Karmarkar A. P., Bongim Jun et al. Proton - irradiation effects on AlGaN/ AlN/GaN high electron mobility transistors. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, vol. 50, no. 6, pp. 1791- 1796.
 5. Gulyaev Yu. V., Grigoryevskiy V. N., Kmita A. M., Kundin A. P., Maltsev O. A. Eksperimental'noye issledovaniye vysokostabil'nogo generatora s PAV – rezonatorom v tsepi obratnoy svyazi [Experimental study of a highly stable oscillator with a SAW resonator in the feedback circuit]. Radiotekhnika i elektronika, 1984, vol. XXIX, no. 8, pp. 1641-1642.
 6. Dvornikov A. A., Ogurtsov V. I., Utkin G. M. K teorii sinkhronizirovannogo avtogeneratora na akusticheskikh poverkhnostnykh volnakh [On the theory of a synchronized oscillator based on surface acoustic waves]. Radiotekhnika i elektronika, 1981, no. 11, pp. 2322-2327.
 7. Kolkovskiy Yu. V., Fedosov V. I. Tverdotel'nyye SVCH generatory, stabilizirovannyye mikroskhemami serii 321FEkhkh [Solid-state microwave oscillators stabilized by microcircuits of the 321FExx series]. Elektronnaya promyshlennost', 2003, no. 2, pp. 65-70.

References

1. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V., Krishtopov A. V., Kudrya A. I. Novyye tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli [New technologies for Earth remote sensing]. Moscow, Tekhnosfera, 2018, 482 p.
2. Gromov D. V., Matveev Yu. A., Nazarova G. N. Issledovaniye vliyaniya ioniziruyushchikh izlucheniye na kharakteristiki geterostrukturnykh polevykh tranzistorov na nitride galliya [Research on the