

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.38

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., науч. руководитель,
Ю. В. Федоров, гл. конструктор — зам. директора по НИОКР, **Д. Л. Гнатюк**, канд. техн. наук, зав. лаб.,
О. С. Матвеев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Б. Г. Путинцев**, аспирант, инженер-исследователь,
А. В. Зуев, науч. сотр.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысококачественной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)
E-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ГУН V-ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 25.07.2016

Представлена монолитная интегральная схема (МИС) генератора, управляемого напряжением (ГУН) V-диапазона с буферным усилителем, изготовленная по НЕМТ-технологии на основе гетероструктур AlGaIn/GaN на сапфировых подложках в ИСВЧПЭ РАН. Выходная мощность ГУН с буферным усилителем варьируется в пределах 25...50 мВт, крутизна управления ГУН ~900 МГц/В, потребляемый ток МИС при напряжении питания 10 В — 90 мА. Дрейф частоты от температуры составил 30 МГц/°С.

Ключевые слова: V-диапазон, нитрид галлия, генератор, управляемый напряжением, НЕМТ

Введение

Диапазон частот 57...64 ГГц (V-диапазон) активно осваивается разработчиками и производителями радиоэлектронных систем. С одной стороны, ширина доступной полосы делает данный диапазон привлекательным для высокоскоростной сверхширокополосной передачи данных в сетях 5G, скорость передачи данных в которых составляет до 5 Гбит/с. С другой стороны, сильное ослабление электромагнитных волн на атмосферном кислороде (порядка 10 дБ/км) устраняет проблему интерференции между различными источниками сигнала, принадлежащими разным сетям, при организации персональных сетей [1]. Развитие технологий 5G в настоящий момент переходит от стадии исследований к стадии стандартизации; переход к коммерциализации ожидается в 2020 г. Помимо локальных и персональных сверхширокополосных сетей беспроводной передачи данных, устройства данного диапазона могут найти применение в радиационно-стойкой аппаратуре для систем межспутниковой связи, защищенных от влияния помех со стороны Земли [2].

Разработка и изготовление МИС ГУН V-диапазона

В ИСВЧПЭ РАН ведутся работы по освоению технологии проектирования и производства моно-

литных интегральных схем (МИС) на основе гетероструктур нитрида галлия для приемопередающих систем V-диапазона [3–8]. В данной работе представлены результаты исследования образцов МИС ГУН, разработанных и изготовленных в ИСВЧПЭ РАН. МИС ГУН были реализованы на гетероструктурах AlGaIn/GaN на подложках сапфира толщиной 350 мкм производства ЗАО "Элма-Малахит". Изготовленные на данных гетероструктурах тестовые транзисторы с шириной затвора 2×50 мкм и длиной затвора 140 нм имеют измеренные значения параметров F_t и F_{\max} без деэмпеддинга контактных площадок 57 и 130 ГГц соответственно.

За рубежом микросхемы на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, как правило, изготавливают по микрополосковой технологии, подразумевающей травление заземляющих отверстий сквозь подложку, однако это связано с серьезными технологическими трудностями. Частично решение данной проблемы может быть облегчено при переходе к гетероструктурам на кремниевых подложках, но в настоящее время такие гетероструктуры нам недоступны. Поэтому в ИСВЧПЭ РАН было найдено технологическое решение, заключающееся в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика — фотолэка разра-

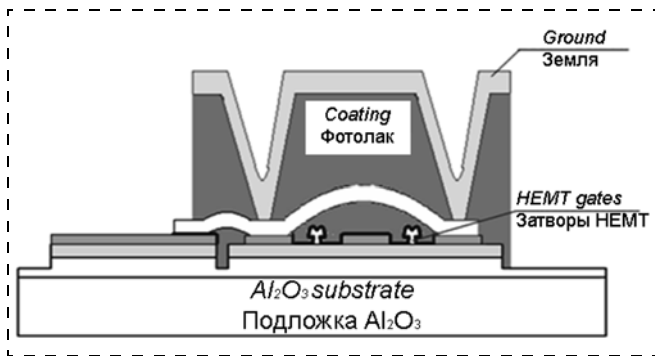


Рис. 1. Схематическое изображение сечения МИС с заземляющей плоскостью над лицевой поверхностью пластины

Fig. 1. Schematic image of MIC section with a grounding plane over the front-face surface of the plate

ботки Института высокомолекулярных соединений (ИВС РАН). Заземление соответствующих элементов осуществляется через отверстия в слое фотолака (рис. 1), одновременно выполняющего роль защитной пассивации.

Для реализации ГУН V-диапазона была выбрана схема, приведенная на рис. 2.

Микрополосковые линии T_s и T_g , подключенные к истоку и затвору транзистора, вместе с варактором образуют резонансный контур. На стоке образуется отрицательное дифференциальное выходное сопротивление. Частота генерации определяется в основном длиной линий T_s и T_g и емкостями транзистора [10]. Управление частотой генерации осуществляется варактором, в качестве которого использован транзистор в диодном включении — управляющее напряжение меняет емкость затвор-сток. На выход ГУН добавлен однокаскадный буферный усилитель для устранения влияния вариации цепи нагрузки генератора на частоту и уровень формируемого в ГУН сигнала. Номинал разделительных конденсаторов в цепях питания и

смещения выбран достаточно большим, чтобы не оказывать влияния на резонансную частоту. При расчетах схемы была использована нелинейная модель транзисторов с шириной затвора 100 мкм, построенная на основе результатов измерений тестовых транзисторов.

По разработанным принципиальным схемам был создан топологический проект ГУН и проведен электромагнитный расчет методом моментов с использованием тех же моделей транзисторов. Данный этап проектирования позволил учесть влияние паразитных связей между линиями передачи и прочих особенностей топологии. По результатам моделирования при необходимости проводят коррекцию топологического проекта и повторный электромагнитный расчет до достижения удовлетворительного результата. На основе полученного топологического проекта разработан комплект рабочих фотошаблонов для изготовления МИС.

Разработанные МИС ГУН были изготовлены на технологическом оборудовании ИСВЧПЭ РАН. Фотографии кристаллов МИС ГУН до и после нанесения слоев фотолака и верхней металлизации представлены на рис. 3. Размер кристалла составляет $1,5 \times 1,24$ мм.

Исследования характеристик МИС ГУН

Измерения параметров МИС ГУН проводили в ИСВЧПЭ РАН с помощью зондовой станции как на неразрезанной пластине, так и на отдельных кристаллах после резки пластины. В качестве измерительного оборудования был использован анализатор цепей Keysight N5247A с опцией анализатора спектра N5247A-090. На рис. 4 показана зависимость частоты генерации (F_{gen}) трех образцов МИС ГУН от управляющего напряжения (V_{ctrl}) на разрезанных кристаллах без теплоотвода.

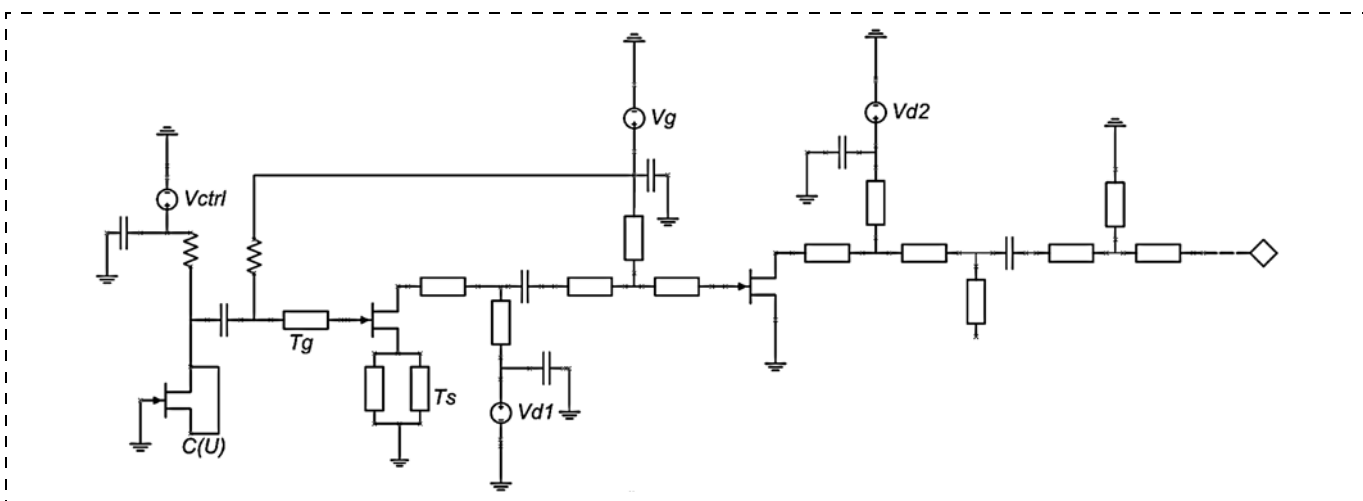


Рис. 2. Принципиальная схема МИС ГУН

Fig. 2. Schematic circuit of MIC VCO

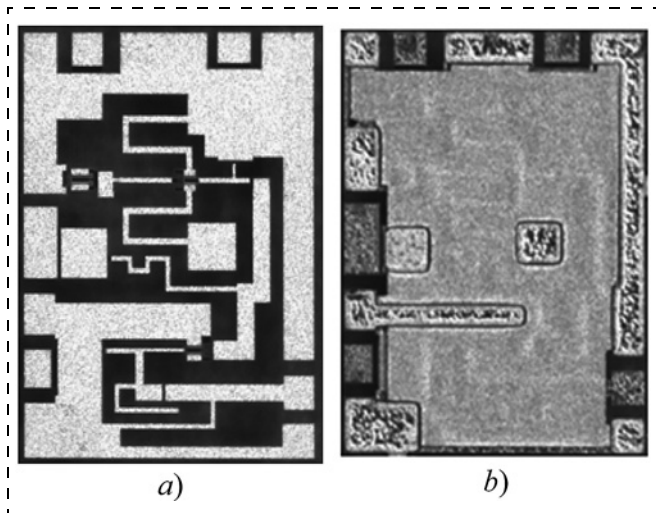


Рис. 3. Фотографии МИС ГУН до (а) и после (б) нанесения слоя фотолака и верхней металлизации

Fig. 3. Photos of MIC VCO before (a) and after (b) deposition of the layer of photovarnish and top metallization

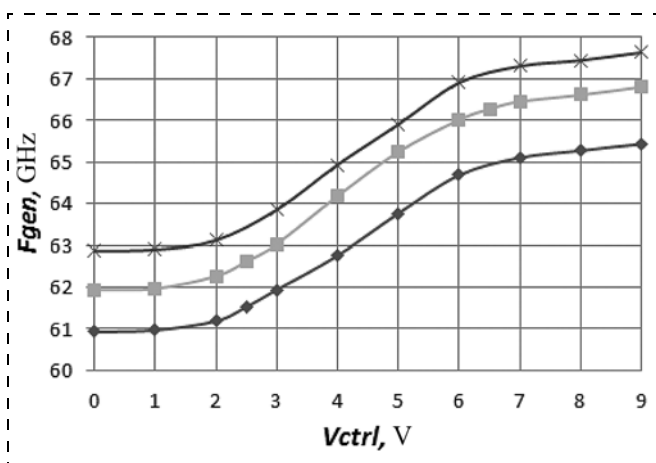


Рис. 4. Зависимость частоты генерации от управляющего напряжения трех образцов МИС ГУН

Fig. 4. Dependence of the oscillation frequency on the control voltage of three MIC VCO samples

При управляющих напряжениях от 2 до 6 В характеристика перестройки близка к линейной. Крутизна перестройки в линейной области составляет ~ 900 МГц/В.

Выходная мощность (P_{out}) исследованных образцов МИС ГУН при номинальном рабочем напряжении 10 В варьируется в пределах 25...50 мВт (рис. 5). Ток потребления составляет не более 70 мА.

На рис. 6 показана типовая зависимость частоты генерации от напряжения питания при постоянном напряжении управления и смещения на затворах. Чувствительность частоты генерации ГУН (F_{gen}) к изменению напряжения питания (V_{d1}) составляет ~ 260 МГц/В при рабочем напряжении питания 10 В.

Дополнительно было выполнено исследование зависимости характеристик МИС ГУН от темпера-

туры окружающей среды. Измерения проводили зондовым способом на отдельных кристаллах без теплоотвода на зондовой станции с термостолком. На рис. 7 представлена зависимость частоты генерации МИС ГУН от температуры при нагреве до 85°C .

Кривая 1 соответствует измерениям в постоянной рабочей точке. При увеличении температуры частота генерации уменьшается. Дрейф частоты от температуры составляет примерно 30 МГц/ $^\circ\text{C}$. Выходная мощность при 85°C уменьшается на $1,8$ дБм.

Установлено, что посредством запирания транзисторов можно обеспечить постоянное значение частоты генерации (кривая 2). Кривая 3 отражает зависимость напряжения смещения (V_g), необходимого для поддержания частоты генерации МИС ГУН на постоянном уровне.

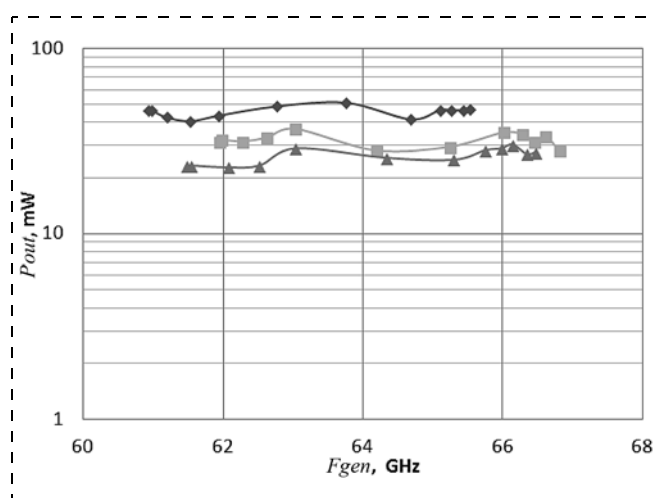


Рис. 5. Выходная мощность трех образцов МИС ГУН при напряжении питания 10 В

Fig. 5. Output power of three MIC VCO samples at the supply voltage of 10 V

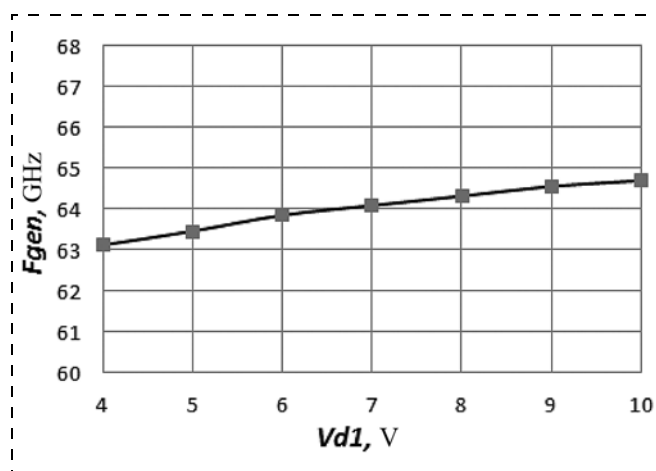


Рис. 6. Типовая зависимость частоты генерации МИС ГУН от напряжения питания

Fig. 6. Typical dependence of the oscillation frequency of MIC VCO on the supply voltage

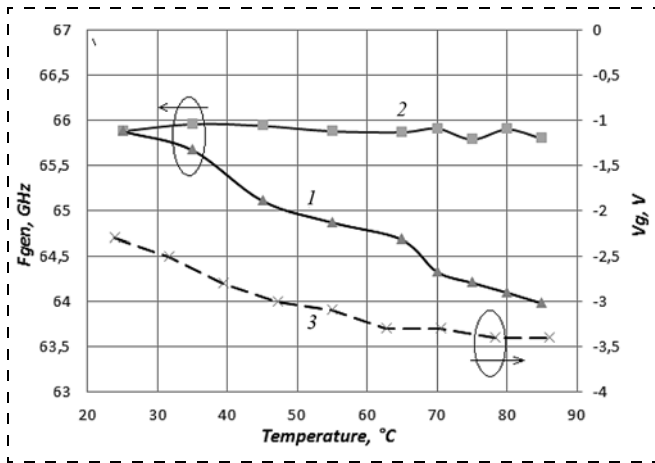


Рис. 7. Зависимость частоты генерации МИС ГУН от температуры

Fig. 7. Dependence of the oscillation frequency of MIC VCO, of the temperature

Аппаратные возможности использованного измерительного оборудования не позволили провести измерения фазового шума.

Заключение

Впервые в России в ИСВЧПЭ РАН были разработаны, изготовлены и исследованы МИС ГУН V-диапазона на гетероструктурах нитрида галлия на подложках сапфира. Выходная мощность образцов составляет 25...50 мВт, диапазон перестройки частоты генерации достигает 4 ГГц. Дрейф частоты от температуры составляет 30 МГц/°С.

Авторы выражают благодарность московскому представительству Keysight Technologies за предоставленную демонстрационную лицензию на опцию 090 к анализатору цепей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0087, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0087).

Список литературы

1. Вишневский В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3с и спецификация WirelessHD // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 70–78.
2. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Галиев Р. Р. и др. Нитридные приборы миллиметрового диапазона // Нанотехнология. 2014. № 3. С. 40–51.
3. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В. и др. Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем 5 мм диапазона длин волн на основе гетероструктур AlGaIn/GaN // Известия ВУЗов. Электроника. 2014. № 4 (189).
4. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В. и др. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 12–15.
5. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57–64 ГГц". Свидетельство о государственной регистрации № 2013630159 от 06 ноября 2013 г.
6. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Преобразователь сигнала для диапазона 57–64 ГГц", свидетельство о государственной регистрации № 2013630171 от 06 ноября 2013 г.
7. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С. Топология ИМС "Смеситель на балунах Маршанда для диапазона 57–64 ГГц", свидетельство о государственной регистрации № 20146300511 от 19 февраля 2014 г.
8. Федоров Ю., Мальцев П., Матвеев О. и др. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ диапазона на наногетероструктурах // Нанотехнология. 2015. № 3 (57). С. 44–51.
9. Muller J.-E., Grave T., Siweris H. J. A GaAs HEMT MMIC Chip Set for Automotive Radar Systems Fabricated by Optical Stepper Lithography // IEEE Journal of solid-state circuits. September 1997. Vol. 32, N. 9.

P. P. Maltsev, D. Sc., Professor, Research Supervisor,
 Yu. V. Fedorov, Chief Designer, Deputy Director for Research and Development,
 D. L. Gnatyuk, PhD., Head of Laboratory, O. S. Matveyenko, PhD., Senior Researcher,
 B. G. Putintsev, Postgraduate Student, Engineer-researcher, A. V. Zuyev, Researcher,
 Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, RAS, Moscow
 iuhfseras2010@yandex.ru,

Monolithic Integrated Circuit for VCO of V-band

Institute of Microwave Frequency Semiconductor Electronics of RAS (IMSCE RAS) presented a monolithic integrated circuit (MIC) for V-band voltage controlled oscillator (VCO) on sapphire substrates designed and manufactured on the basis of AlGaIn/GaN heterostructures. The output power of VCO with a buffer amplifier varied within 25–50 mW, the tuning sensitivity equaled to ~900 MHz/V, the power consumed by MIC was 90 mA at 10V of the supply voltage, and the frequency drift due to the temperature change was 30 MHz/°C.

Keywords: V-band, GaN, voltage controlled oscillator, HEMT

Introduction

Developers and manufacturers of the radio-electronic systems master actively the range of frequencies of 57...64 GHz (V-range). On one hand, the width of the accessible band

makes it promising for a high-speed superbroadband data transmission in 5G networks, the transfer speed in which will be up to 5 Gbit/s. On the other hand, sharp weakening of the electromagnetic waves in the atmospheric oxygen (about

10 dB/km) eliminates the problem of interference between p signal sources belonging to different networks, during organization of the personal networks [1]. Development of 5G technologies transfers from the stage of research to the stage of standardization, and commercialization of the technology is expected in 2020. Besides the local and personal super-broadband networks of wireless data transmission, the devices of the given band can find their applications in the radiation-resistant equipment for the systems of intersatellite communication protected from the influence and hindrances of the Earth [2].

Development and manufacture of MIC VCO of V-band

IMSCE RAS continues development of the technology for designing and manufacture of the monolithic integrated circuits (MIC) on the basis of the heterostructures of gallium nitride for the transmitter-receiver systems of V-band [3–8]. The work presents the results of research of the samples of the developed and manufactured MIC VCO. The MIC VCO samples were realized on AlGaIn/GaN heterostructures on sapphire substrates with thickness of 350 μm manufactured by Elma-Malachite Company. The test transistors made on the given heterostructures with the gate width of $2 \times 50 \mu\text{m}$ and gate length of 140 nm have the measured values of F_t and F_{max} parameters without de embedding of the contact platforms of 57 and 130 GHz, accordingly.

Abroad, as a rule, the microcircuits on the basis of AlGaIn/GaN heterostructures are made by the microstrip technology, envisaging etching of the earthing apertures through a substrate, however, this is connected with technological difficulties. The problem can be partially solved due to transition to the heterostructures on the silicon substrates, however, such heterostructures are not available to us. Therefore IMSCE RAS found a solution consisting in creation of the earthing plane over the front-face of the plate with already manufactured active and passive microwave elements over the polymeric dielectric layer — photovarnish developed by the Institute of High-molecular Compounds (IHC RAS). Grounding of the corresponding elements is carried out through the apertures in the photovarnish layer (fig. 1), which simultaneously plays the role of a protective passivation.

The circuit selected for realization of VCO of V-band is presented in fig. 2. T_s and T_g microstrip lines connected to the transistor source and gate, together with the varactor, form a resonant contour. Negative differential output resistance is formed on the drain. The oscillation frequency is determined basically by the length of T_s and T_g lines and the transistor's capacities [10]. The oscillation frequency is controlled by the varactor, the role of which is played by the transistor in a diode switch — the control voltage changes the gate-drain capacity. The VCO output was supplemented by one-cascade buffer amplifier for elimination of the influence of the variation of the oscillator load circuit on the frequency and level of the signal formed in VCO. Rating of the blocking capacitors in the circuits of power supply and displacement was chosen as big enough in order not to render influence on the resonant frequency. In the circuit calculations a nonlinear model of transistors was used with the gate width of 100 μm , constructed on the basis of the results of measurements of the test transistors.

In accordance with the developed basic circuits the VCO topological project was created and electromagnetic calculation was done by the method of the moments with the use of

the same models of transistors. The given design stage allowed to consider the influence of the spurious couplings between the transfer lines and other specific features of the topology. If necessary, by the results of modeling a correction of the topological project can be done as well as a repeated electromagnetic calculation up to achievement of a satisfactory result. On the basis of the received topological project a complete set of the working photomasks was developed for manufacture of MIC.

The developed MIC VCO were made on the technological equipment of IMSCE RAS. Photos of MIC VCO crystals before and after deposition of the layers of photovarnish and the top metallization are presented in fig. 3. The size of the crystal is $1,5 \times 1,24 \text{ mm}$.

Research of MIC VCO characteristics

Measurements of MIC VCO parameters were done with the help a probe station on an uncut plate and on separate crystals after the plate was cut. The measuring equipment was Keysight N5247A circuit analyzer with an option of N5247A-090 spectrum analyzer. Fig. 4 presents the dependence of the oscillation frequency (F_{gen}) of three MIC VCO samples on the control voltage (V_{ctrl}) on the cut crystals without a heat-conducting path. At the control voltages from 2 up to 6 V the readjustment characteristic is close to the linear one. The readjustment steepness in the linear area is $\sim 900 \text{ MHz/V}$.

The output power (P_{out}) of MIC VCO samples at the nominal operating voltage of 10 V varies within 25...50 mW (fig. 5). The current consumption is not more than 70 mA.

Fig. 6 presents a typical dependence of the oscillation frequency on the supply voltage at a constant voltage of control and displacement on the gates. Sensitivity of the oscillation frequency of VCO (F_{gen}) to the change of supply voltage (V_{dl}) is $\sim 260 \text{ MHz/V}$ at the working supply voltage of 10 V.

In addition the research of the dependence of MIC VCO characteristics on the ambient temperature was done. Measurements were done by the probe method on separate crystals without a heat-conducting path on a probe station with a thermal table. Fig. 7 presents the dependence of the oscillation frequency of MIC VCO on temperature at heating up to 85 $^{\circ}\text{C}$.

Curve 1 corresponds to the measurements in a constant working point. If the temperature is increased, the oscillation frequency decreases. The frequency drift due to temperature is about 30 MHz/ $^{\circ}\text{C}$. The output power at 85 $^{\circ}\text{C}$ decreases by 1,8 dBm.

It was established, that by means of locking of the transistors it is possible to ensure a constant value of the oscillation frequency (curve 2). Curve 3 reflects the dependence of the bias voltage (V_g), necessary for keeping of the oscillation frequency of MIC VCO at a constant level.

The hardware potential of the used measuring equipment did not allow us to measure the phase noise.

Conclusion

For the first time in Russia IMSCE RAS developed, manufactured and investigated MIC VCO of V-band on the heterostructures of gallium nitride on sapphire substrates. The output power of the samples was 25...50 mW, the band of arrangement of the oscillation frequency reached 4 GHz. Frequency drift due to temperature was 30 MHz/ $^{\circ}\text{C}$.

The authors express their gratitude to the Moscow Office of Keysight Technologies for the provided demonstration license for 090 option to the circuit analyzer.

The work was done with financial support of the Ministry of Education and Science (grant agreement № 14.607.21.0087, unique identifier of the project -RFMEFI60714X0087).

References

1. Vishnevskij V., Frolov S., Shahnovich I. Millimetrovyy diapazon kak promyshlennaja real'nost'. Standart IEEE 802.15.3s i specifikacija WirelessHD, *ELEKTRONIKA: Nauka, Tehnologija, Biznes*, 2010, no. 3, pp. 70–78.

2. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Galiev R. R. i dr. / Nitridnye pribory millimetrovogo diapazona, *Nanoindustrija*, 2014, no. 3, pp. 40–51.

3. Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Ju. V. Integral'nyj antennoj element so vstroennym usilitelem 5mm diapazona dlin voln na osnove geterostruktur AlGaIn/GaN, *Izvestija VUZov. Elektronika*, 2014, no. 4 (189).

4. Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Ju. V. i dr., Monolitnaja integral'naja shema usilitelja so vstroennoj antennoj

dlja pjatimillimetrovogo diapazona dlin voln, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2014, № 9, pp. 12–15.

5. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Gnatjuk D. L., Matveenko O. S., Zuev A. V. Topologija IMS "Integral'nyj antennoj element so vstroennym maloshumjashhim usilitelem dlja diapazona 57–64 GHz", svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630159 ot 06 nojabrja 2013 g.

6. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Gnatjuk D. L., Matveenko O. S., Zuev A. V. Topologija IMS "Preobrazovatel' signala dlja diapazona 57–64 GHz", svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630171 ot 06 nojabrja 2013 g.

7. Mal'cev P. P., Fedorov Ju. V., Gnatjuk D. L., Matveenko O. S. Topologija IMS "Smesitel' na balunah Marshanda dlja diapazona 57–64 GHz", svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 20146300511 ot 19 fevralja 2014 g.

8. Fedorov Ju., Mal'cev P., Matveenko O. i dr. MIS usilitelej so vstroennymi antennami SVCh-diapazona na nanogeterostrukturah, *Nanoindustrija*, 2015, no. 3 (57), pp. 44–51.

9. Jan-Erik Muller, Thomas Grave, Heinz J. Siweris, A GaAs HEMT MMIC Chip Set for Automotive Radar Systems Fabricated by Optical Stepper Lithography, *IEEE Journal of solid-state circuits*, 1997, vol. 32, no. 9.

УДК 621.372.8.049.75.002 (031)

В. П. Тимошенко, д-р техн. наук, проф., e-mail: valeri04@hotmail.com,

Д. В. Родионов, вед. инженер, denis.rodionov@gmail.com,

А. И. Хлыбов, канд. техн. наук, науч. сотр., alex1818@yandex.ru,

А. С. Мусаткин, инженер, musatkin.a@hotmail.com,

Д. В. Вертянов, вед. инженер, vdv.vertyanov@gmail.com

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский университет МИЭТ

ИССЛЕДОВАНИЯ 3D СВЧ СБОРОК НА ПОЛИИМИДНОМ ШЛЕЙФЕ ДЛЯ СИСТЕМ В КОРПУСЕ

Поступила в редакцию 11.04.2016

Исследовались особенности 3D сборки СВЧ трактов высокочастотных интегральных микросхем и устройств на полиимидном носителе. Рассмотрены расчеты волнового сопротивления микрополоскового и копланарного трактов. Проведены экспериментальные исследования СВЧ параметров и сравнение с теоретическим расчетом.

Ключевые слова: 3D СВЧ сборка, интегральная микросхема, S-параметры, полиимид, полиимидный гибкий шлейф

Введение

Основные тенденции в микроэлектронике связаны со снижением массогабаритных параметров, повышением быстродействия и снижением потребляемой мощности. Технология трехмерной (3D) интеграции играет существенную роль в улучшении параметров изделий электронной техники. Ключевыми приемами 3D-интеграции является использование ультратонких (20...35 мкм) кристаллов, собранных в пакет (стек) с применением коммутационных подкристалльных плат-интерпозеров (*interposer*), со сквозными металлизированными переходными отверстиями [1]. Данная технология хорошо работает для относительно низкочастотных

сигналов. В случае сигналов СВЧ диапазона существуют ограничения, связанные с изготовлением трактов передачи на проводящем кремниевом основании (чип кристалла, интерпозер). Эту проблему можно успешно разрешить, используя гибкий полиимидный шлейф, включающий СВЧ тракты, а также низкочастотные сигнальные линии, шины питания и земли. Причем применение полиимидного шлейфа возможно как для соединения печатных плат, так и для интегральных схем, собираемых в 3D-пакет (рис. 1).

В связи с этим актуальной задачей является разработка СВЧ трактов на полиимидном носителе, а также измерение и исследование их параметров в широком частотном диапазоне.