

the diffusion limited current of ferroelectric thin film capacitors. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2004. V. 16. P. L515—L521.

19. **Moazzami R.** Ferroelectric thin films for semiconductor memory. *Semiconductor Science and Technology*. 1995. V. 10. P. 375—390.

20. **Mehta R. R., Silverman B. D., Jacobs J. T.** Depolarization fields in thin ferroelectric films. *Journal of Applied Physics*. 1973. V. 44, N. 8. P. 3379—3385.

21. **Scott J. F., Dawber M.** New interface effects in ferroelectric thin films. *Le Journal de Physique IV*. 2001. V. 11, N. PR 11. P. Pr 11-9—Pr 11-19.

22. **Weibull W.** A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of the Applied Mechanics*. 1951. N. 9. P. 293—297.

23. **Operation and Service Manual.** Model 4140B pA Meter/DC Voltage Source. 1983.

24. **Waser R., Baiatu T., Hardtl K.-H.** DC electrical degradation of perovskite-type titanates: I—III. *Journal of the American Ceramic Society*. 1990. V. 73, N. 6. P. 1645—1673.

25. **Al-Shareef H. N., Dimos D.** Leakage and reliability characteristics of lead zirconate titanate thin-film capacitors. *Journal of the American Ceramic Society*. 1997. V. 80, N. 12. P. 3127—3132.

26. **Dietz G. W., Schumacher M., Waser R.** et al. Leakage currents in thin films for ultrahigh-density dynamic random access memories. *Journal of Applied Physics*. 1997. V. 82. P. 2359—2364.

27. **Sze S., Kwok K. Ng.** *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2007. 815 p.

28. **Scott J. F.** Dielectric breakdown in high-s films for ULSI DRAMs: III. Leakage current precursors and electrodes. *Integrated Ferroelectrics*. 1995. V. 9. P. 1—12.

29. **Adirovich E. I.** Elektricheskie polya i toki v dielektrikah. *Fizika tverdogo tela*. 1960. V. 2, N. 7. P. 1410—1415.

УДК 621.38.049.77

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор, **О. С. Матвеев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., unicfive@vandex.ru, **Ю. В. Федоров**, гл. конструктор, зам. директора по НИОКР, **Д. Л. Гнатюк**, канд. техн. наук, зав. лаб., **Д. В. Крапунин**, инж.-исследователь, **А. В. Зуев**, мл. науч. сотр., **С. Л. Бунегина**, помощник директора
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ СО ВСТРОЕННОЙ АНТЕННОЙ ДЛЯ ПЯТИМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Поступила в редакцию 11.04.2014

В статье описана разработанная монолитная интегральная схема (МИС) усилителя со встроенной антенной для использования в системах передачи данных для диапазона 57...64 ГГц. Размеры кристалла $3,4 \times 1,15$ мм, коэффициент усиления более 16 дБ, расчетный коэффициент шума ~6,4 дБ, выходная мощность более 100 мВт. МИС рассчитывалась на НЕМТ-гетероструктурах AlGaIn/GaN на подложке сапфира. Измерение параметров МИС с антенной проводилось непосредственно на пластине с помощью стенда, включающего векторный анализатор и лабораторную (рупорную) антенну, вращаемую по дуге над исследуемой антенной. Проектирование, изготовление и исследование характеристик МИС выполнялось коллективом авторов в ИСВЧПЭ РАН.

Ключевые слова: МИС, интегрированная антенна, V-диапазон, НЕМТ-гетероструктуры

Диапазон пяти миллиметровых длин волн позволяет создавать внутрикомнатные системы связи с высокой помехоустойчивостью и высокой скоростью передачи данных. Помехоустойчивость обусловливается высокой степенью поглощения волн в атмосфере в диапазоне частот 57...64 ГГц [1, 2]. Преимуществом также являются и малые габаритные размеры антенн, что позволяет интегрировать их на один кристалл с активной частью монолитной интегральной схемы (МИС), например, с усилителем [3]. Интеграция МИС на один кристалл, в свою очередь, позволяет уменьшить потери в тракте и увеличить передаваемую мощность.

В ИСВЧПЭ РАН ведутся работы по созданию приемопередающего модуля для диапазона частот

57...64 ГГц на НЕМТ-гетероструктурах AlGaIn/GaN, составной частью которого является усилитель с интегрированной антенной.

Разработанный усилитель состоит из четырех каскадов, построенных по схеме с общим истоком, на двухзатворных НЕМТ-транзисторах с общей шириной затвора 100 мкм. Топологический проект усилителя представлен на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Его размеры составляют $2,26 \times 1,15$ мм. Расчеты проводили в САПР ADS в два этапа: на первом этапе рассчитывалась принципиальная схема, на основании которой был создан топологический проект усилителя. На втором этапе проводилось электродинамическое моделирование топологии усилителя с помощью метода

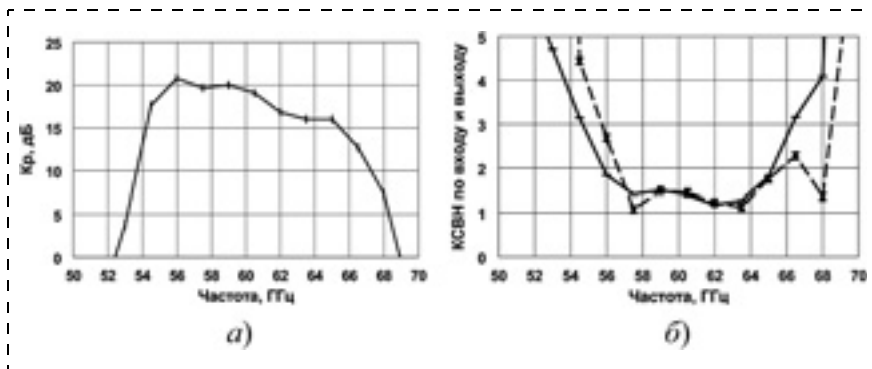


Рис. 2. Расчетные характеристики усилителя:

a — зависимость коэффициента усиления от частоты; *b* — зависимость КСВН по входу (сплошная линия) и по выходу (штриховая линия) от частоты

моментов. Электродинамическое моделирование позволяет более точно оценить согласование цепей усилителя, учитывая их взаимное влияние друг на друга, что невозможно сделать при расчете принципиальной схемы. Полученный расчетный коэффициент усиления в диапазоне 57...64 ГГц составляет 16...21 дБ, КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) по входу и выходу менее 2 (рис. 2). Расчетный коэффициент шума ~6,4 дБ, выходная мощность — более 100 мВт. Полученные параметры позволяют использовать данный усилитель и как усилитель мощности (УМ), и как мал шумящий усилитель (МШУ). Расчетный ток потребления усилителя составляет 70...100 мА для МШУ при напряжении питания 5...10 В и 150 мА для УМ при напряжении питания 15 В.

За основу антенного элемента взят монополярный элемент сложной формы (рис. 3). Диаметр антенного элемента ~0,72 мм. По расчетам, полоса пропускания антенны 56...69 ГГц по уровню потерь отражения -10 дБ на подложке сапфира толщиной 340 мкм. Диаграмма направленности кардиоидная, при этом максимум излучения перпендикулярен поверхности антенного элемента. Взаимное согласование входа (выхода) усилителя и антенного элемента проводилось на нагрузку 50 Ом. При этом в случае использования антенны в приемном тракте она соединяется со входом МШУ, в то время как в передающем тракте антенна соединяется с выходом УМ.

На данном этапе работы для предварительного исследования характеристик антенн были созданы макеты пассивной части МИС со встроенными антенными элементами на подложке арсенида галлия толщиной 385 мкм. Фотография такого антенного элемента, нагруженного на выход усилителя,

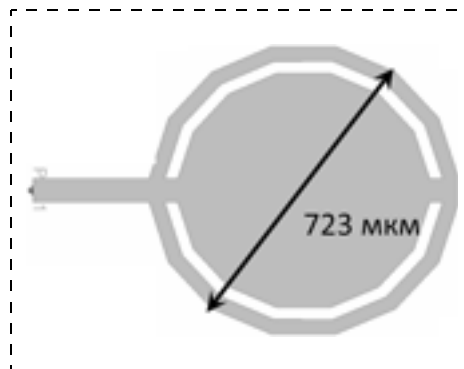


Рис. 3. Антенный элемент для диапазона частот 57...64 ГГц

представлена на рис. 4. Размеры МИС со встроенной антенной и усилителем $3,4 \times 1,15$ мм.

Так как диаграмма направленности не привязана к излучаемой мощности, данная характеристика является относительной, поскольку достаточно измерять уровень излучаемой мощности в дальней зоне в относительных единицах. Диаграмма направленности измеряется с помощью лабораторной антенны, расположенной на расстоянии R от исследуемой антенны. Лабораторная антенна должна перемещаться по дуге окружности, в центре которой расположена исследуемая антенна таким образом, чтобы расстояние R между антеннами оставалось неизменным. При этом диаграмма направленности не зависит от коэффициента усиления встроенного усилителя. Схематическое изображение стенда для измерения диаграммы направленности представлено на рис. 5 [4].

Фотография созданного стенда для измерения диаграммы направленности антенны непосредственно на пластине представлена на рис. 6 (см. третью сторону обложки). В состав стенда входят:

- векторный анализатор Agilent E8361A диапазона 10 МГц...67 ГГц;
- лабораторная рупорная антенна диапазона 50...75 ГГц;

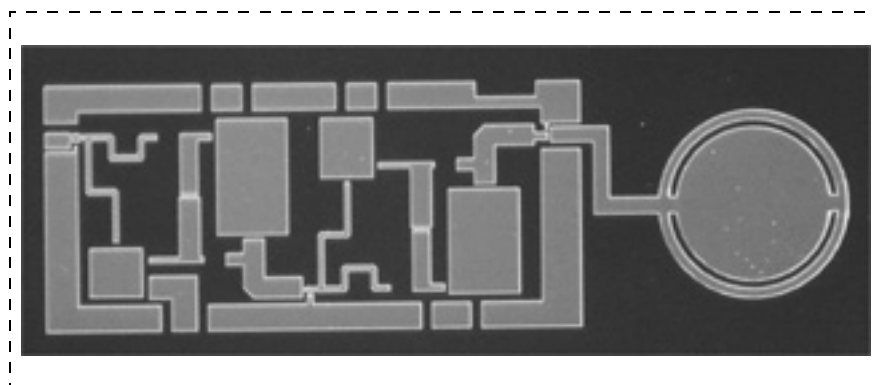


Рис. 4. Фотография антенного элемента, нагруженного на выход усилителя

- СВЧ зонд и зондовый стол Cascade Microtech EP8-150.

Рупорная антенна закреплена на специальном поворотном механизме таким образом, чтобы обеспечить ее движение по дуге с шагом 5° . Расстояние R до исследуемой антенны 22,5 см, что многократно превышает длину волны в миллиметровом диапазоне.

На рис. 7 представлены измеренная и расчетная зависимости потерь отражения антенны (S_{11}) от частоты. Видно, что по уровню -10 дБ ни расчетные, ни измеренные характеристики не дотягивают до 69 ГГц. Это произошло потому, что для изготовления опытных образцов МИС была использована подложка большей толщины и большей диэлектрической проницаемости, в результате чего ухудшилось согласование элементов и максимум излучения сместился по частоте на несколько гигагерц в меньшую сторону. Однако это не является серьезным препятствием для исследования диаграммы направленности антенны.

Измерения диаграммы направленности проводились в двух плоскостях: ZX (вдоль оси симметрии антенны) и ZY (перпендикулярно оси симметрии) (см. рис. 5). При этом в плоскости ZY диапазон вращения рупорной антенны составил 180° , в то время как в плоскости ZX только на 130° . Угол

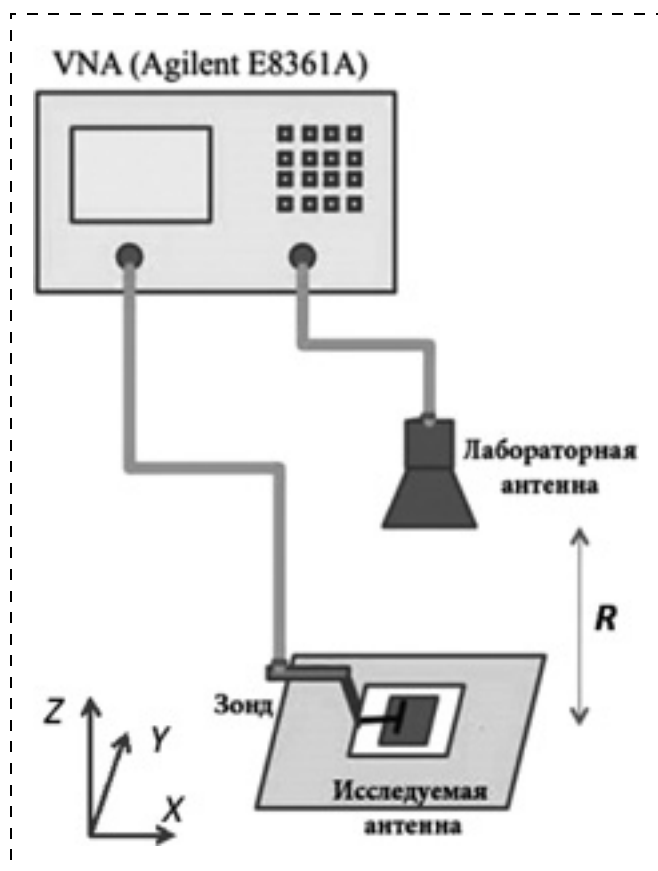


Рис. 5. Схематическое изображение стенда для измерения диаграммы направленности интегрированной антенны

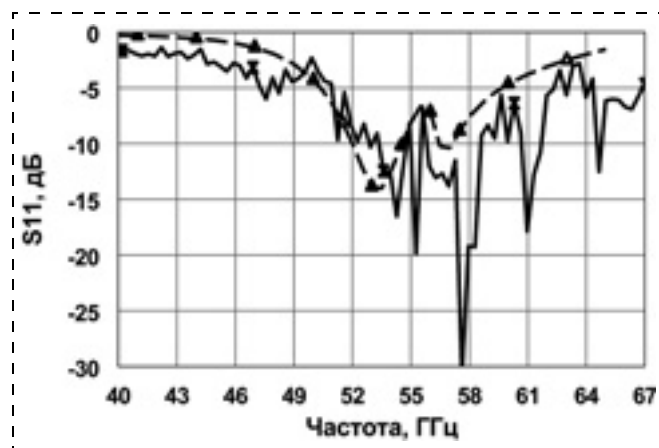


Рис. 7. Зависимость потерь отражения антенны (S_{11}) от частоты. Сравнение расчетных данных (штриховая линия) с измерением (сплошная линия) для подложки GaAs

поворота рупорной антенны ограничивался габаритами зондового стола и расположением зондодержателя.

На рис. 8 (см. третью сторону обложки) представлены измерения диаграммы направленности антенны, нагруженной на усилитель, в минимуме потерь отражения, на частоте 58 ГГц. В плоскости ZY измерения были проведены в двух плоскостях поляризации.

Как видно на рис. 8, антенный элемент слабо поляризован, диаграмма направленности близка к кардиоидной. Необходимо отметить, что измерение опытных образцов проводились непосредственно на пластине. Образцы МИС, расположенные в соседних ячейках, влияли на излучение, чем можно объяснить некоторую неровность полученных характеристик. Несмотря на это, полученные результаты достаточно хорошо соответствуют расчетным данным. В настоящее время в ИСВЧПЭ РАН ведется изготовление данных МИС на гетероструктурах нитрида галлия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-07-12031-офи-м.

Список литературы

1. Вишнеvский В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3с и спецификация Wireless HD // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 70–78.
2. Майская В. Компоненты беспроводной связи — миллиметровая волна // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2011. № 6. С. 42–50.
3. Rappaport T. S., Murdock J. N., Gutierrez F. State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications // Proceedings of the IEEE. 2011. V. 99, N. 8. P. 1390–1436.
4. Huang T.-W. et. al. CMOS MCM for V-Band Phased Array Applications. European Microwave Week, Nurnberg, Germany, 2013.

P. P. Maltsev, Director, **O. S. Matveenko**, Research Associate, e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru,
Yu. V. Fedorov, Deputy Director, **D. L. Gnatyuk**, Head of Laboratory, **D. V. Krapukhin**, Research Engineer,
A. V. Zuev, Junior Research, **S. L. Bunegina**, Assists Director,
Institute Ultra High Frequency Semiconductor Electronics Russian Academy of Sciences

5 mm-Wave Amplifier Monolithic Integrated Circuit with Integrated Antenna

Designed 57–64 GHz amplifier MMIC with integrated antenna for data transmission systems are described in the article. Chip dimensions: 3,4 mm × 1,15 mm, amplifier gain: more than 16 dB, calculated noise factor: ~6,4 dB, output power: more than 100 mW. MMIC was calculated on HEMT heterostructure on a sapphire substrate. On-wafer measurements of a passive part of the MMIC with integrated antenna were produced using the special stand which includes a microwave network analyzer and a laboratory horn antenna. During the measurement horn antenna was being moved along an arc over a measured antenna in 5 degree increments. The radiation patterns shape is close to cardioid. Radiation area is located above the plane of the antenna, the radiation is weakly dependent on the polarization plane. Experimental prototype of the MMIC was designed, manufactured and measured in the IUHFSE RAS.

Keywords: MMIC, integrated antenna, V-band, HEMT heterostructure

References

1. **Vishnevskij V., Frolov S., Shakhnovich I.** Millimetrovyy diapazon kak promyshlennaya real'nost'. Standart IEEE 802.15.3s i spetsifikatsiya. Wireless HD. *EHLEKTRONIKA: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. 2010. N 3. P. 70–78.

2. **Mayskaya V.** Komponenty besprovodnoy svyazi milimetrovaya volna. *EHLEKTRONIKA: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. 2011. N 6. P. 42–50.

3. **Rappaport T. S., Murdock J. N., Gutierrez F.** State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications. *Proceedings of the IEEE*. 2011. V. 99, N. 8. P. 1390–1436.

4. **Huang T.-W.** et. al. *CMOS MCM for V-Band Phased Array Applications. European Microwave Week*, Nürnberg, Germany, 2013.

УДК 54.01

И. А. Пронин¹, аспирант, e-mail: pronin_i90@mail.ru, **И. А. Аверин**¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
В. А. Мошников^{2, 3}, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф., **Н. Д. Якушова**¹, студент,
М. В. Кузнецова¹, аспирант, **А. А. Карманов**¹, аспирант

¹ ФГБОУ ВПО "Пензенский государственный университет";

² ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)"

³ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОВОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ПОР

Поступила в редакцию 29.01.2014

Предложена перколяционная модель газовых сенсоров и проанализировано влияние пористости материала на порог обнаружения газов. Выяснено, что самое большое влияние на характеристики сенсоров оказывают микропоры, которые максимально возможно увеличивают порог перколяции r_c и снижают порог чувствительности сенсоров. Анализ полученных данных указывает, что, в целом, с ростом пористости порог перколяции будет увеличиваться. Однако сильное влияние оказывает вид распределения пор по размерам. Во всех случаях наблюдается максимум значения r_c при заданной пористости, если вклад в нее вносят поры низших рангов. При повышении вклада пор высоких рангов значение порога перколяции уменьшается. Первый случай представляет особый интерес для анализа газочувствительных наноматериалов, полученных методом золь-гель-технологии. Экспериментально установлено, что при наличии пор различного ранга результирующее значение порога перколяции будет получено через сумму соответствующих порогов, полученных для решеток с порами только одного ранга, умноженных на объемную долю пор этого же ранга.

Ключевые слова: газовый сенсор, перколяционная модель сенсоров, иерархическая система пор

Хеморезистивные сенсоры газов состоят из нанокристаллических зерен оксидных полупроводников (чаще диоксида олова SnO_2) с размером кристаллитов в диапазоне 2...200 нм. Изменение

электропроводности газочувствительных слоев связано с хемосорбцией газов-окислителей и восстановителей и последующим изменением концентрации свободных носителей заряда в зернах.