

Рисунки к статье А. В. Корлякова, О. Н. Михайловой, В. В. Трушляковой «МЕМБРАННЫЕ ОКНА ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ВЫВОДА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

Рис. 1. Шкала электромагнитного излучения, от инфракрасного (IR) до рентгеновского диапазона [1]

Рис. 5. Оправка для испытаний рентгеновских окон:

а – конструкция (1 – основание; 2 – вольфрамовая мишень; 3 – электронный луч; 4 – тестируемое окно (мембрана);
 5 – направление прошедшего рентгеновского излучения на фиксирующий детектор);

- $6 \phi o$ тография оправки с основанием 1, согнутым под углом 55°;
- в ренттеновское окно, установленное на оправке в камере электронного микроскопа

Рис. 6. Сравнение спектров рентгеновского характеристического излучения от вольфрама с использованием рентгеновского окна из нитрида кремния толщиной 0,3 мкм и без него (сплошной красный спектр – с окном, синяя линия – без окна)

<u>ТАНО- и МИКРОСИСІЕННАЯ</u> ТЕХНИА Том 22. № 2 \$ 2020

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИН́Ц) и включен в международную базу INSPEC. Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника. Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф. Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь) Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь) Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания) Астахов М. В., д.х.н., проф. Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай) Басаев А. С., к.ф.-м.н. Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф. Дайнеко А. В., к.х.н. Кальнов В. А., к.т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды) Леонович Г. И., д.т.н., проф. Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея) Панич А. Е., д.т.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония) Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия) Сингх К., к.т.н. (Индия) Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н. Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц. Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва) Лысенко А. В. (отв. секретарь) Чугунова А. В. (науч. ред.) Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ ____

Издается с 1999 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Корляков А. В., Михайлова О. Н., Трушлякова В. В. Мембранные окна из нитрида кремния для вывода мягкого рентгеновского излучения 69

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

элементы мнст

Клочков А. Н. InP HEMT-транзисторы и монолитные интегральные схе- мы: обзор	79
Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Майтама М. В., Михалев А. О. Каскодная монолитная интеральная схе-	
роструктуре нитрида галлия	98
Никифоров В. Г., Дайнеко А. В., Гриценко А. Л. Состояние и перспекти- вы развития пьезоэлектрических генераторов	102

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть II 112

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (http://microsystems.ru; http://novtex.ru/nmst/) в разделе "Архив статей с 1999 г.".

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

107076 Москва, Стромынский пер., д. 4 e-mail: nmst@novtex.ru

Адрес для переписки:

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10) е Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2020

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

CHIEF EDITOR

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

Editorial council:

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China) Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.) Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.) Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.) Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof. Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands) Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea) Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof. Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil) Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Singh K., PhD (India) Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.) Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.) Lysenko A. V. (Executive secretary) Chugunova A. V. (Research Editor) Shchetinkin D. A. (site) The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed

in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

Vol. 22

No. 2

2020

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Ryazanov R. M. Schottky Emission in Au Contacts — Carbon Nano- tubes — Ti	59
Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Yaminsky I. V. Processing of the Re- sults of the Study of the Surface Scanning Probe Microscope FemtoScan Online	63

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Abramov I. I. Prospects and Problems of Supermind Development. Part II

Web: www.microsistems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2020

Фланотехнологии и зондовая микроскопия Папотесноооду AND Scanning Probe Microscopy

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.22.59-63

С. В. Булярский, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, ИНМЭ РАН, bulyar2954@mail.ru, В. В. Светухин, директор НПК "Технологический центр", Е. П. Кицюк, нач. лаб., А. А. Шаманаев, науч. сотрудник, Р. М. Рязанов, мл. науч. сотрудник,

НПК "Технологический центр"

ЭМИССИЯ ШОТТКИ В КОНТАКТАХ ЗОЛОТО — УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ — ТИТАН

Поступила в редакцию 10.12.2019

Изучаются механизмы переноса тока в контактах углеродных нанотрубок с металлами. Изучение вольтамперных характеристик структуры золото — углеродные нанотрубки — титан в широком диапазоне температур от -30 до +110 °C позволило установить, что перенос носителей заряда происходит в результате явления термоэлектронной эмиссии, усложненной действием сил зеркального изображения на контакты, которые находятся при обратном смещении. Вычислены высоты потенциального барьера контакта с золотом — 1,0 эВ и контакта с титаном — 0,74 эВ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, контакты металл — углеродная нанотрубка, эмиссия Шоттки, высота потенциального барьера

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются перспективным материалом для создания элементов гибкой и эластичной наноэлектроники [1]. Их применение обусловлено совместимостью технологии синтеза с планарной кремниевой технологией, стабильностью при пропускании тока большой плотности, высокими подвижностью носителей заряда и теплопроводностью [2]. На основе углеродных нанотрубок можно создавать активные элементы, обладающие свойствами усиления, на кремниевых и полимерных эластичных подложках [3, 4]. На основе углеродных нанотрубок создают устройства терагерцевой (ТГц) электроники: детекторы [5, 6], фотовольтаические приборы [7, 8], фототермоэлектрические приборы [9], ТГц антенны [10-13], ТГц излучатели [14, 15]. Такие структуры используют выпрямительные свойства контактов металл углеродная нанотрубка [16, 17], которые часто, без всякого обоснования, называют контактами Шоттки. Контакт можно назвать контактом Шоттки тогда и только тогда, когда механизмом переноса тока в нем является термоэлектронная

эмиссия, которую именуют эмиссией Шоттки. При этом механизме переноса электроны преодолевают контакт над барьером за счет тепловой энергии.

В этой работе описаны базовые эксперименты, которые надо выполнить для выявления механизма термоэлектронной эмиссии. Эти эксперименты проведены на структурах золото (Au) углеродная нанотрубка — титан (Ti). Они позволили выявить механизмы протекания тока в указанной структуре и определить высоты потенциальных барьеров на границах углеродной нанотрубки с металлами.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Структуры формировали на кремниевых подложках, которые были предварительно оксидированы на 0,3 мкм. Слой титана толщиной 0,2 мкм наносили методом магнетронного напыления. После фотолитографии и проведения процесса плазмохимического травления титана наносили маску фоторезиста для напыления золота (0,2 мкм) с подслоем хрома (30 нм) с пос-

ледующим его удалением методом "взрыва" фоторезиста. Таким образом были сформированы встречно-штыревые структуры с расстоянием между электродами из золота и титана в 10 мкм. Одностенные полупроводниковые углеродные нанотрубки (Sigma Aldrich SWCNT 6.5) наносили на поверхность пластин из суспензии. Для изготовления суспензии использовали смесь деионизованной воды и изопропилового спирта в соотношении 1:5. 1 мг УНТ был разведен в 5 мл раствора, далее пробирку выдерживали 20 мин в ультразвуковой ванне, сливали на 9/10, снова разбавляли 5 мл раствора и обрабатывали ультразвуком. Было проведено пять циклов разбавления. Затем дозатором раствор УНТ был нанесен на подложки с металлическими электродами. Сформированные структуры представлены на рис. 1.

Вольт-амперные характеристики контактов измеряли на автоматизированной зондовой установке Cascade Summit 12000 и анализаторе полупроводниковых приборов Keysight B1500. Схема измерений и использованные приборы позволяли проводить измерения с высокой точностью и относительными погрешностями менее 0,1 %. Типичная экспериментальная вольт-амперная характеристика показана на рис. 2.

Результаты, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о хорошем качестве контактов и наличии барьерных слоев на их границах.

Обращает внимание тот факт, что рост тока начинается в области напряжений смещения на структуре, равных около 2 В. Это связано с тем, что как золото, так и титан образуют с углеродной нанотрубкой выпрямляющий контакт с потенциальным барьером. Эти барьеры создают два диода, включенных навстречу друг другу. Поэтому ток через структуру является обратным при

каждой полярности напряжения, и когда к золотому контакту относительно титанового приложено положительное смещение, и когда — отрицательное. В такой ситуации рост тока сквозь структуру с увеличением приложенного напряжения смещения определяется силами зеркального изображения [18-20]. При переходе электрона через границу контакта углеродная нанотрубка металл в металле возникает наведенный заряд, который приводит к появлению электрического поля. Это поле понижает высоту потенциального барьера, что приводит к росту тока контакта, который при этом находится под напряжением обратного смещения. Токи сил зеркального изображения описываются следующей вольт-амперной характеристикой [18-20]:

$$I = sAT^{2} \exp\left(-\frac{\phi_{0}}{kT}\right) \exp\left[\beta \frac{(e|U|)^{1/4}}{kT}\right], \qquad (1)$$

где s — площадь контакта; A — постоянная Ричардсона; T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана; ϕ_0 — высота потенциального барьера контакта под напряжением обратного смещения; β — коэффициент неидеальности контакта; e —заряд электрона; U — напряжение обратного смещения.

Формула (1) предсказывает, что в координатах $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$ вольт-амперная характеристика должна быть линейной. Экспериментальные результаты и потенциальная диаграмма структуры Au — углеродные нанотрубки — Ті приведены на рис. 3.

Экспериментальные результаты показывают, что вольт-амперная характеристика линейна на протяжении четырех порядков изменения значения тока. Это доказывает, что механизм пере-

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика контактов Au — углеродные нанотрубки — Ті

Рис. 4. Зависимость тока насыщения от температуры

носа, который учитывает действие сил зеркального изображения, действительно имеет место для данного эксперимента. Однако это не доказывает, что данная структура снабжена контактами Шоттки. Для проверки этого предположения вольт-амперные характеристики измеряли в диапазоне температур от -30 до +110 °C. При каждой температуре и для каждой полярности приложенного напряжения строили вольт-амперные характеристики, подобные характеристике, приведенной на рис. 3, и вычисляли токи насыщения. Эти токи определяли путем экстраполяции экспериментальной вольт-амперной характеристики к нулевому напряжению смещения.

Ток насыщения, как следует из формулы (1), равен

$$I_S = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right).$$
 (2)

Зависимость $\ln I_S/T^2 = f(1/kT)$ линейна на протяжении нескольких порядков изменения тока (рис. 4). Это свидетельствует о том, что имеет место термоэлектронная эмиссия, и контакты, которые исследованы в данной работе, можно называть контактами Шоттки.

Наклон характеристики (рис. 4) позволяет вычислить высоту потенциальных барьеров контактов структуры Au — углеродные нанотрубки — Тi. Для контакта с золотом высота потенциального барьера равна 1,0 эB, а для контакта с титаном — 0,74 эB.

Таким образом, экспериментально показано, что токи в контактах металла с углеродными нанотрубками, действительно определяются механизмом термоэлектронной эмиссии и их можно называть контактами Шоттки. Разработана методика определения высоты потенциального барьера контактов Шоттки с учетом действия сил зеркального изображения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект № 0004-2019-0002.

Список литературы

1. Le Cai, Chuan Wang. Carbon Nanotube Flexible and Stretchable Electronics // Nanoscale Research Letters. 2015. Vol. 10 (320). P. 1–21. Doi: 10.1186/s11671-015-1013-1.

2. Булярский С. В. Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение. Ульяновск: Стрежень, 2011. 480 с.

3. Cao Y., Che Y., Gui H., Cao X., Zhou C. Radio frequency transistors based on ultra-high purity semiconducting carbon nanotubes with superior extrinsic maximum oscillation frequency // Nano Research. 2016. Vol. 9, N. 2. P. 363–371. URL: Doi.org//10.1007/s12274-015-0915-7.

4. Cao X., Lau C., Liu Y., Wu F. et al. Fully Screen-Printed, Large-Area, and Flexible Active-Matrix Electrochromic Displays Using Carbon Nanotube Thin-Film Transistors // ACS nano. 2016. Vol. 10, N. 11. P. 9816—9822. URL: https:// doi.org//10.1021/acsnano.6b05368.

5. Yang L., Wang S., Zeng Q., Zhang Z., Peng L.-M. Carbon nanotube photoelectronic and photovoltaic devices and their applications in infrared detection // Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany). 2013. Vol. 9, N. 8. P. 1225–1236. Doi.org//10.1002/smll.201203151.

6. **Murakami Y., Kono J.** Nonlinear photoluminescence excitation spectroscopy of carbon nanotubes: exploring the upper density limit of one-dimensional excitons // Physical review letters. 2009. Vol. 102, N. 3. P. 37401. Doi.org//10.1103/PhysRev-Lett.102.037401.

7. **Murakami Y., Kono J.** Existence of an upper limit on the density of excitons in carbon nanotubes by diffusion-limited exciton-exciton annihilation: Experiment and theory // Physical Review B. 2009. Vol. 80, N. 3. P. 35432. Doi.org//10.1103/Phys-RevB.80.035432.

8. Simmons T. J., Vera-Reveles G., González G., Gutiérrez-Hernández J. M. et al. Bolometric Properties of Semiconducting and Metallic Single-Walled Carbon Nanotube Composite Films // ACS Photonics. 2015. Vol. 2, N. 3. P. 334–340. Doi.org//10.1021/ph500285r.

9. Koppens F. H. L., Mueller T., Avouris P., Ferrari A. C. et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems // Nature nanotechnology. 2014. Vol. 9, N. 10. P. 780–793. Doi.org//10.1038/nnano.2014.215.

10. **Hao J., Hanson G. W.** Infrared and Optical Properties of Carbon Nanotube Dipole Antennas // IEEE Transactions on Nanotechnology. 2006. Vol. 5, N. 6. P. 766–775. Doi.org// 10.1109/TNANO.2006.883475.

11. Slepyan G. Y., Shuba M. V., Maksimenko S. A., Lakhtakia A. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas // Physical Review B. 2006. Vol. 73, N. 19. P. 195416. Doi.org//10.1103/Phys-RevB.73.195416.

12. Wang Y., Wang X., Wang Q., Mei J. et al. Terahertz Wave Electric Field Oscillation from Single-Walled Carbon Nanotube Antenna // Integrated Ferroelectrics. 2014. Vol. 153, N. 1. P. 120–125. Doi.org//10.1080/10584587.2014.904131.

13. Muthee M., Carrion E., Nicholson J., Yngvesson S. K. Antenna-coupled terahertz radiation from joule-heated single-wall carbon nanotubes // AIP Advances. 2011. Vol. 1, N. 4. P. 42131. Doi.org//10.1063/1.3660346.

14. Neculoiu D., Bartolucci G., Pons P., Bary L., et al. Lowlosses coupled-lines silicon micromachined band-pass filters for the 45 GHz frequency band. // 2003 International Semiconductor Conference. CAS 2003. Sinaia, Romania: IEEE Oper. Center, 28 Sept. -2 Oct. 2003. P. 109–112.

15. Silan J. L., Niemann D. L., Ribaya B. P., Rahman M., et al. Novel geometry of carbon nanotube field emitter to achieve high current densities for terahertz sources. // 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Rome, Italy: IEEE, 28.04.2009 — 30.04.2009. P. 86–87.

16. **Palacios J. J., Tarakeshwar P., Kim P.** Metal contacts in carbon nanotube field effect transistors // Beyond the Schottky barrier paradigm. arXiv, 2007, 705.1328, v1. P. 1–5.

17. **Ha M., Xia Y., Green A. A., Zhang W.** et al. Printed, sub-3V digital circuits on plastic from aqueous carbon nanotube inks // ACS nano. 2010. Vol. 4, N. 8. P. 4388—4395. Doi.org//10.1021/ nn100966s.

18. Булярский С. В., Кудинцева Г. А. Механизм протекания тока в поверхностно-барьерных диодах $Au-CdIn_2S_4$ // ФТП. 1977. № 10. С. 2021—2025.

19. Булярский С. В., Невский О. А., Желяпов Г. Е. Определение параметров глубоких уровней в эпитаксиальных слоях GaP:ZnO с помощью двойных поверхностно-барьерных структур // ФТП. 1981. Т. 15, № 7. С. 1660—1664.

20. Булярский С. В., Булярская С. А., Вострецова Л. Н., Дудин А. А., Орлов А. П., Павлов А. А., Басаев А. С., Кицюк Е. П., Шаманаев А. А., Шаман Ю. П. Параметры переноса тока контактов металл — углеродные нанотрубки // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 5 (178). С. 3–9.

S. V. Bulyarskiy, D. Sc., Senior Researcher, bulyar2954@mail.ru, Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS, V. V. Svetukhin, Director, E. P. Kitsyuk, Head of the Laboratory,
A. A. Shamanaev, Researcher, R. M. Ryazanov, Junior Researcher,
NPK Technological Center, Moscow

Corresponding author: **Bulyarskiy Sergey V.,** D. Sc., Senior Researcher, Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS, Moscow, Russian Federation E-mail: bulyar2954@mail.ru

Schottky Emission in Au Contacts — Carbon Nanotubes — Ti

Received on December 10, 2019 Accepted on December 13, 2019

The work studies the mechanisms of current transfer in the contacts of carbon nanotubes with metals. A study of the current-voltage characteristics of the structure of Au — carbon nanotubes — Ti in a wide temperature range from -30 to +110 °C allowed us to establish that the transfer mechanism is thermionic emission, which is complicated by the action of mirror image forces on contacts that are under reverse bias. The heights of the potential barrier of contact with gold — 1.0 eV and contact with titanium — 0.74 eV were calculated.

Keywords: carbon nanotubes, metal — carbon nanotube contacts, Schottky emission, potential barrier height

For citation:

Bulyarskiy S. V., Svetukhin V. V., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Ryazanov R. M. Schottky Emission in Au Contacts – Carbon Nanotubes – Ti, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 59–63. DOI: 10.17587/nmst.22.59-63

References

1. Le Cai, Chuan Wang. Carbon Nanotube Flexible and Stretchable Electronics, *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10: 320, pp. 1–21. Doi 10.1186/s11671-015-1013-1.

2. **Bulyarskiy S. V.** Uglerodnyye nanotrubki: tekhnologiya, upravleniye svoystvami, primeneniye, Ul'yanovsk, Strezhen, 2011, 480 p.

3. Cao Y., Che Y., Gui H., Cao X., Zhou C. Radio frequency transistors based on ultra-high purity semiconducting carbon nanotubes with superior extrinsic maximum oscillation frequency, *Nano Research*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 363–371. Doi.org//10.1007/ s12274-015-0915-7.

4. Cao X., Lau C., Liu Y., Wu F., et al. Fully Screen-Printed, Large-Area, and Flexible Active-Matrix Electrochromic Displays Using Carbon Nanotube Thin-Film Transistors, *ACS* *nano*, 2016, vol. 10, no. 11, pp. 9816-9822. Doi.org// 10.1021/acsnano.6b05368.

5. Yang L., Wang S., Zeng Q., Zhang Z., Peng L.-M. Carbon nanotube photoelectronic and photovoltaic devices and their applications in infrared detection, Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2013, vol. 9, no. 8, pp. 1225–1236. Doi.org// 10.1002/smll.201203151.

6. **Murakami Y., Kono J.** Nonlinear photoluminescence excitation spectroscopy of carbon nanotubes: exploring the upper density limit of one-dimensional excitons, *Physical review letters*, 2009, vol. 102, no. 3, pp. 37401. Doi.org//10.1103/PhysRev-Lett.102.037401.

7. **Murakami Y., Kono J.** Existence of an upper limit on the density of excitons in carbon nanotubes by diffusion-limited exciton-exciton annihilation: Experiment and theory, *Physical Review B.*, 2009, vol. 80, no. 3, pp. 35432. Doi.org//10.1103/ Phys-RevB.80.035432.

8. Simmons T. J., Vera-Reveles G., González G., Gutiérrez-Hernández J. M. et al. Bolometric Properties of Semiconducting and Metallic Single-Walled Carbon Nanotube Composite Films *ACS Photonics*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 334–340. Doi.org// 10.1021/ph500285r.

9. Koppens F. H. L., Mueller T., Avouris P., Ferrari A. C., et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems, *Nature nanotechnology*, 2014, vol. 9, no. 10, pp. 780–793. Doi.org//10.1038/nnano.2014.215.

10. **Hao J., Hanson G. W.** Infrared and Optical Properties of Carbon Nanotube Dipole Antennas, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2006, vol. 5, no. 6, pp. 766–775. Doi.org// 10.1109/TNANO.2006.883475.

11. Slepyan G. Y., Shuba M. V., Maksimenko S. A., Lakhtakia A. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas, *Physical Review B*, 2006, vol. 73, no. 19, pp. 195416. Doi.org// 10.1103/Phys-RevB.73.195416.

12. Wang Y., Wang X., Wang Q., Mei J., et al. Terahertz Wave Electric Field Oscillation from Single-Walled Carbon Nanotube

Antenna, *Integrated Ferroelectrics*, 2014, vol. 153, no. 1, pp. 120–125. Doi.org/10.1080/ 10584587.2014.904131.

13. Muthee M., Carrion E., Nicholson J., Yngvesson S. K. Antenna-coupled terahertz radiation from joule-heated single-wall carbon nanotubes, *AIP Advances*, 2011, vol. 1, no. 4, pp. 42131. Doi.org/10.1063/1.3660346.

14. Neculoiu D., Bartolucci G., Pons P., Bary L., et al. Lowlosses coupled-lines silicon micromachined band-pass filters for the 45 GHz frequency band, 2003, International Semiconductor Conference. CAS 2003, Sinaia, Romania, IEEE Oper. Center, 28 Sept. – 2 Oct. 2003, pp. 109–112.

15. Silan J. L., Niemann D. L., Ribaya B. P., Rahman M., et al. Novel geometry of carbon nanotube field emitter to achieve high current densities for terahertz sources, 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Rome, Italy, IEEE, 28.04.2009–30.04.2009, pp. 86–87.

16. **Palacios J. J., Tarakeshwar P., Kim P.** Metal contacts in carbon nanotube field effect transistors: Beyond the Schottky barrier paradigm, arXiv, 2007, 705.1328, v1, pp. 1–5.

17. Ha M., Xia Y., Green A. A., Zhang W., et al. Printed, sub-3V digital circuits on plastic from aqueous carbon nanotube inks // *ACS nano*. 2010, vol. 4, no. 8, pp. 4388–4395. Doi.org// 10.1021/nn100966s.

18. **Bulyarskiy S. V., Kudintseva G. A.** Mekhanizm protekaniya toka v poverkhnostno-bar'yernykh diodakh Au $-CdIn_2S_4$, *Semiconductors*, 1977, no. 10, pp. 2021-2025 (in Russian).

19. **Bulyarskiy S. V., Nevskiy O. A., Zhelyapov G. Ye.** Opredeleniye parametrov glubokikh urovney v epitaksial'nykh sloyakh GaP: ZnO s pomoshch'yu dvoynykh poverkhnostno-bar'yernykh struktur, *Semiconductors*, 1981, vol. 15, no. 7, pp. 1660–1664 (in Russian).

20. Bulyarskiy S. V., Bulyarskaya S. A., Vostretsova L. N., Dudin A. A., Orlov A. P., Pavlov A. A., Basayev A. S., Kitsyuk Ye. P., Shamanayev A. A., Shaman Yu. P. Parametry perenosa toka kontaktov metall — uglerodnyye nanotrubki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 5 (178), pp. 3–9 (in Russian).

УДК 621.385.833

DOI: 10.17587/nmst.22.63-68

Л. Ж. Шугунов, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., ООО "Готовые решения", Чегем, lion.shugunov@mail.ru,

Т. Л. Шугунов, канд. физ.-мат. наук,

ГБУ "Аналитический центр", Москва, tshugunov@yandex.ru,

И. В. Яминский, д-р физ.-мат. наук, проф., МГУ имени М. В. Ломоносова,

физический факультет, химический факультет, yaminsky@nanoscopy.ru

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СКАНИРУЮЩИМ ЗОНДОВЫМ МИКРОСКОПОМ ФЕМТОСКАН ОНЛАЙН

Поступила в редакцию 03.12.2019

Приведены результаты исследования поверхности свежесколотого графита с использованием сканирующего зондового микроскопа ФемтоСкан Онлайн в режиме ACM. Показано, что существующие методы обработки сканов не позволяют провести однозначно интерпретацию полученных результатов. В связи с этим разработанный ранее математико-статистический метод обработки различных случайных процессов, в том числе результатов сканирования на C3M, применен к микроскопу ФемтоСкан Онлайн, показано, что метод позволяет с высокой вероятностью (95 %) провести однозначную интерпретацию полученных результатов сканирования поверхности различных образцов.

Ключевые слова: сканирующий зондовый микроскоп, ФемтоСкан Онлайн, классическая декомпозиция, anпроксимация, критерии случайности, автокорреляционная функция

Тонкие наноразмерные пленки проявляют необычные свойства и в настоящее время находят широкое применение в различных областях народного хозяйства. В последние годы для исследования свойств поверхности тел широко используют сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Существует большое разнообразие СЗМ, которые предназначены для исследования различных физических и химических свойств поверхности тонких пленок, в том числе: механических, электрических, магнитных, акустических и других, которые описаны в работе [1]. Особо хочется отметить оригинальные микроскопы различных моделей ФемтоСкан, в частности ФемтоСкан Онлайн, которые наряду с традиционными исследованиями различных материалов позволяют исследовать процессы, происходящие и в живой природе, а также управлять работой микроскопа дистанционно, через Интернет [2-5].

Методы обработки СЗМ-изображений

Как известно, практически любые экспериментальные результаты подвержены неконтролируемым случайным воздействиям. Любое измерение, в результате которого получается изображение, отличающееся от истинной поверхности образца, является артефактом. Сканирующая зондовая микроскопия также не лишена артефактов. Если они непонятны, то исследователь не может правильно интерпретировать получаемые данные СЗМ. Если артефакты хорошо изучены и выявлена причина их появления, данные СЗМ могут быть правильно интерпретированы, а полученная информация использована с уверенностью. Существует много источников артефактов СЗМ, которые описаны в руководствах по использованию микроскопов [1].

Рассмотрим некоторые основные методы обработки СЗМ-изображений с использованием пакетов программ, приложенных к микроскопу.

Обработка изображений проведена с помощью программного обеспечения ФемтоСкан Онлайн (Центр перспективных технологий, Россия, www.nanoscopy.ru) [2—5].

Сглаживание. Сглаживание изображения в простейшем случае выполняется путем замены значения в каждой точке усредненным значением величин в некоторой окрестности этой точки.

Медианная фильтрация. При медианной фильтрации для каждой точки изображения строится вариационный ряд в некоторой ее окрестности, т. е. все элементы этой окрестности располагаются в порядке возрастания, и значение в этой точке заменяется на значение элемента, занимающего центральное положение в вариационном ряду.

Количественный анализ СЗМ-изображений. Одним из методов анализа изображений является построение гистограммы значений в точках изображения.

Определение параметров шероховатости поверхности. Для количественной характеристики СЗМ-изображений часто используют параметры шероховатости изображения, которые определяют следующим образом:

Средняя шероховатость,

$$S_a = 1/MN \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} |z(x_k, y_i) - \mu|,$$

где *M*, *N* — числа точек сканирования строк и столбцов соответственно; µ — средняя высота изображения:

$$\mu = 1/MN \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} z(x_k, y_i).$$

Для корректного определения шероховатости необходимо предварительно удалить неровность фона изображения, для этого надо вычесть плоскость либо удалить поверхность второго порядка.

Построение Фурье-спектра изображения

Фурье-спектр пространственных частот изображения является его частотным представлением в ортонормальном базисе, состоящем из комплексных экспонент. Представление изображения в таком пространстве дает возможность наблюдать его структурные особенности, связанные с периодичностью повторения элементов, наличием мелких деталей и др. Пространственные частоты имеют размерность, обратную единицам измерения расстояний на изображении.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) изображения, заданного в точках k, l, где k = 0 ... (M - 1), l = 0 ... (N - 1) определяется по формуле

$$F_{m,n} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} f_{k,i} \exp\left[-2i\pi\left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right],$$

где m, n — номера гармоник; $f_{k,i}$ — коэффициенты разложения Фурье.

Так как в преобразовании Фурье содержатся все гармоники, в том числе иницированные слу-

чайными факторами, возникает необходимость фильтрации от случайных помех и выбора основных периодов. Разработан [6—9] математикостатистический метод анализа различных случайных процессов, в том числе результатов сканирования на СЗМ. В настоящей работе, с применением этого метода, приведены результаты обработки и анализа на микроскопе ФемтоСкан Онлайн [2—5] в режиме АСМ.

Результаты обработки СЗМ-изображений

Как хорошо известно из статистики, если уровень полезного сигнала намного порядков выше уровня шума, то влияние шума столь мало, что можно не пользоваться фильтрами для построения структуры поверхности. Однако, когда проводится исследование наноструктур поверхности, что имеет важное научное и практическое значение, ситуация значительно усложняется, так как при этом сама структура, в общем случае, неоднородна (размеры наночастиц могут быть различными) и шумы могут существенно усложнить задачу. Поэтому возникает сложная проблема — корректное отделение случайной части от регулярной, что не является такой тривиальной задачей как в случае исследования системы, заведомо состоящей из одной или почти одной гармоники.

В предлагаемом методе, согласно [6—9], используется аппарат Фурье-преобразования, так как исследуемая система может быть описана полигармонической функцией, дополненный различными критериями случайности ряда-сечения, для отделения шума от регулярной части. Чтобы при этом не ограничиться случаем с малым уровнем шума, используются еще также широко распространенные классические методы анали-

за и обработки рядов в качестве критериев регулярной части ряда. Такое комплексное использование критериев различного характера, как считают авторы [6—9], обеспечивает наиболее точное решение поставленной задачи. В качестве критериев случайностей остатка ряда (в данном случае различные сечения скана) в работе используются зарекомендовавшие себя основные статистические критерии [10]: автокорреляционная функция (АКФ),

критерий Дарбина—Уотсона, коэффициент корреляции Пирсона, число поворотных точек. В качестве критериев регулярной части используют: методы классической декомпозиции, экспоненциального сглаживания и фильтра Ф4253 (4253Н); наличие/отсутствие линейного тренда определяется критериями Краммера-Уэлча и Стьюдента, и наконец невязка совместно с другими (для обеспечения адекватности модели) как основного требования к любой модели. Вначале строят пробные модели по результатам спектрального анализа, затем на основе разработанных программ [6-9] из числа пробных, используя приведенные основные критерии, выделяется адекватная. Так как предлагаемый подход также позволяет решить задачу и в случае атомного разрешения микроскопа, то, в этом смысле, является наиболее общим.

На рис. 1 приведено сечение скана на микроскопе ФемтоСкан Онлайн приведенного выше образца в нанометровом диапазоне.

Видно, что сечение достаточно сложное и может быть аппроксимировано полигармонической моделью вида:

$$Y(x) = m + kx + \sum_{i=0}^{N/2} a_i \cos(\omega_i x) + b_i \sin(\omega_i x) + \varepsilon(x), \qquad (1)$$

где m, k, a_i, b_i — коэффициенты модели, подлежащие определению; $\varepsilon(x)$ — случайная часть с нулевым математическим ожиданием.

В результате спектрального анализа по программе Statistica [11] получим графики, изображенные на рис. 2.

Видно, что спектр содержит несколько пиков, в областях которых проводится поиск значимых гармоник. Сглаживание периодограммы

Рис. 1. Сечение скана на поверхности графита

Рис. 2. Периодограмма (сплошная) и спектр сечения скана (штриховая)

проведено с использованием спектральных окон Хемминга.

На рис. 3 приведены графики остатков значений сечений (фактические минус модельные для подсчета числа поворотных точек).

Ниже приведены некоторые результаты анализа регулярной части сечения с использованием классических методов сглаживания рядов. На рис. 4 приведен вариант аппроксимации с использованием экспоненциального сглаживания.

На рис. 5 приведены фактические (измеренные) значения с результатами метода классической декомпозиции.

В таблице даны значения критериев для различных вариантов (выделенных гармоник), по которым осуществляется выбор основных размеров наночастиц, поверхности образца.

Из данных таблицы следует, что по комплексу параметров наиболее подходит вариант 2 (строка 2), так как большинство критериев более соответствуют теоретическим значениям, кроме того вариант 2 более адекватно моделирует ряд-сечение. Поэтому выбирается вариант 2 с периодами: 102,4; 46,5; 26,9; 18,9; 18,3, соответствующими гармоникам 5, 11, 19, 27, 28. Тогда получим модель сечения скана в виде:

$$Y(x) = 107,3 - 0,033x + 18,06\cos\frac{5\pi x}{512} + 6,28\sin\frac{5\pi x}{512} + 10,62\cos\frac{11\pi x}{512} + 9,28\sin\frac{11\pi x}{512} - 12,11\cos\frac{19\pi x}{512} + 2,61\sin\frac{19\pi x}{512} - 7,18\cos\frac{27\pi x}{512} + 3,24\sin\frac{27\pi x}{512} - 2,82\cos\frac{28\pi x}{512} - 3,97\sin\frac{28\pi x}{512} + 3,22\cos\frac{34\pi x}{512} + 1,35\sin\frac{34\pi x}{512}.$$

Построенная модель позволяет восстановить сечение АСМ-изображения поверхности образца.

После выбора скрытых периодов проверяется адекватность модели, т. е. насколько построенная модель сечения соответствует фактически измеренному сечению АСМ-изображения поверхности образца, результаты которых приведены на рис. 6.

Из сравнения графиков следует, что построенная модель сечения скана достаточно хорошо согласуется с фактическими значениями, что

Рис. 3. График остатка ряда сечений

Рис. 4. Аппроксимация сечения скана с использованием экспоненциального сглаживания

Рис. 5. Графики значений сечения (сплошная) и результатов метода классической декомпозиции (штриховая)

Рис. 6. Фактические (сплошная) и модельные значения (штриховая), построенные по модели

Νο		Критерий Дарбина— Уотсона		итерий Число обина— поворотных отсона точек		Коз корре Пир	офф. ляции сона	
вар.	Гармоники	Факт.	Теор.	Факт.	Teop.	Невязка	Модель клас. деком- позиции	4253Н- модель
1	5, 11, 15, 19, 27, 28, 34, 40, 44	0,2367	2	158	341	348 413	0,682158	0,675587
2	5. 11. 19. 27. 28	0.2372	2	171	341	359 125	0.672251	0.663899
3	5, 11, 19, 27, 34	0,2195	2	161	341	390 922	0,627361	0,62078
4	5, 15, 19, 28	0,2322	2	151	341	374 018	0,654054	0,645182
5	5, 15, 27, 40	0,2178	2	164	341	400 624	0,614806	0,605166
6	5, 11, 19, 28, 34	0,2066	2	160	341	414 930	0,589355	0,583224
7	5, 11, 19	0,2179	2	154	341	396 450	0,620122	0,612225
8	5, 11, 15, 19, 28,	0,2295	2	156	341	371 872	0,654602	0,646214
9	34 5, 11, 19, 34	0,2157	2	158	341	410 178	0,602553	0,592947

Значения критериев случайностей остатка ряда

свидетельствует об адекватности модели. Таким образом, практически по всем критериям построенная структура более вероятна и лучше соответствует фактическим значениям сечения скана.

Анализ значимости тенденции линейного тренда сечения по критерию Крамера—Уэлча (sig. = 0,03994 < 1,96), объясняется случайными факторами, а по критерию Стьюдента (sig. = 0,03994 < 0,05) значима на уровне p = 0,05.

Выводы. Можно отметить некоторые общие, сравнительные характеристики использованных методов, в сравнении с предлагаемым. Методы декомпозиции и Ф4253 (4253Н) дают близкие друг другу альтернативные варианты аппроксимации данных. Однако нельзя твердо установить какой из этих методов дает более адекватные результаты. Больше того, они параметрические, и выбор параметров практически субъективен — значит неоднозначен, в противовес предлагаемому, основанному на использовании основных, проверенных опытом критериев статистики, которые только и способны описать случайные процессы. То есть для обработки различных процессов, подверженных случайным воздействиям, на сегодня нет более подходящей теории случайных процессов, чем статистическая, основанная на критериях случайности.

Используя полученные результаты, можно обычными стандартными методами определить наноструктуру поверхности и ее основные характеристики: размеры зерен (неоднородностей), шероховатость и др. В связи с этим, следует отметить, что программное обеспечение микроскопа ФемтоСкан Онлайн дает возможность проводить обработку и анализ полученных СЗМ-изображений поверхности различных образцов большим числом удобных методов, что выгодно отличает его от аналогичных. Поэтому можно сказать, что внедрение

предложенного математико-статистического метода по исследованию наноструктур поверхности проведено впервые на этом приборе.

Список литературы

1. **Миронов В. Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. Н. Новгород: ИФМ РАН. 2004. 110 с. 2. Яминский И. В., Филонов А. С., Синицына О. В., Мешков Г. Б. Программное обеспечение "ФемтоСкан Онлайн" // Наноиндустрия. 2016. № 2 (64). С. 42—46.

3. Ахметова А. И., Яминский И. В. 20 лет, как "Фемто-Скан" показывает атомы // Наноиндустрия. 2017. № 2 (72). С. 88—89.

4. Филонов А. С., Яминский И. В., Ахметова А. И., Мешков Г. Б. ФемтоСкан Онлайн! Почему он? // Наноиндустрия. 2018. Т. 11, № 5 (84). С. 339—342.

5. Яминский И. В., Ахметова А. И., Мешков Г. Б. Программное обеспечение ФемтоСкан Онлайн и визуализация нанообъектов в микроскопии высокого разрешения // Наноиндустрия. 2018. Т. 11, № 6 (85). С. 414—416.

6. Шугунов Л. Ж. Модели анализа температуры воздуха и количества выпадающих осадков в различных зонах Ставропольского края // Естественные и технические науки. 2008. № 4 (36). С. 212—214.

7. Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Шугунова Л. Э. Методика аппроксимации временных рядов многолетних наблюдений природных процессов. // Естественные и технические науки. 2011. № 1 (51). С. 246—250.

8. Шугунов Т. Л., Шугунов Л. Ж., Хаупшева М. Х. Моделирование природных процессов и анализ наноструктур тонких пленок. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2017. 252 с.

9. Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Хаупшева М. Х. Статистические модели сезонных колебаний температуры в горной зоне Дагестана // Успехи современного естествознания. 2017. № 1.

10. Кендэл М. Временные ряды. М.: Финансы и статистика. 1981. 200 с.

11. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов, 2-е изд. (+CD). СПб.: Питер, 2003. 688 с.

L. Zh. Shugunov, Dc. Sci., Leading Researcher, Ready Solutions LLC, Chegem, lion.shugunov@mail.ru, T. L. Shugunov, Ph. D., State Research Institution "Analytical Center", Moscow, tshugunov@yandex.ru, I. V. Yaminsky, Dc. Sci., Prof., Moscow State University Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, Department of Chemistry, yaminsky@nanoscopy.ru

Corresponding author:

Shugunov Leon Zh., D. Sci. Leading Researcher, "Ready Solutions" LLC, Chegem, Russian Federarion, lion.shugunov@mail.ru

Processing of the Results of the Study of the Surface Scanning Probe Microscope FemtoScan Online

Received on December 02, 2019 Accepted on December 10, 2019

The results of the investigation of the surface of freshly ground graphite using the scanning probe microscope FemtoScan Online in AFM mode are presented. It is shown that the existing methods of processing scans do not allow for unambiguous interpretation of the results. In this regard, the previously developed mathematical and statistical method of processing various random processes, including the results of scanning on SPM, is applied to The FemtoScan Online microscope, it is shown that the method allows for a high probability (95%) to carry out an unambiguous interpretation of the obtained results of scanning the surface of various samples.

Keywords: scanning probe microscope, FemtoScan Online, classical decomposition, approximation, randomness criteria, autocorrelation function

For citation:

Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Yaminsky I. V. Processing of the Results of the Study of the Surface Scanning Probe Microscope FemtoScan Online, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 63–68. DOI: 10.17587/nmst.22.63-68

References

1. **Mironov V. L.** Fundamentals of scanning probe microscopy: studies. a manual for students of senior courses of higher educational institutions. N. Novgorod: IPM RAS. 2004. 110 p.

2. Yaminsky I. V., Filonov A. S., Sinitsyna O. V., Meshkov G. B. Software "FemtoScan Online". *Nanoindustry*, 2016, no. 2 (64), pp. 42–46.

3. Akhmetova A. I., Yaminsky I. V. 20 years, as "FemtoScan" shows atoms, *Nanoindustry*, 2017, no. 2 (72), pp. 88–89.

4. Filonov A. S., Yaminsky I. V., Akhmetova A. I., Meshkov G. B. FemtoScan Online! Why him? *Nanoindustry*, 2018, vol. 11, no. 5 (84), pp. 339–342.

5. Yaminsky I. V., Akhmetova A. I., Meshkov G. B. Software FemtoScan Online and visualization of nanoobjects in high-resolution microscopy, *Nanoindustry*, 2018, vol. 11, no. 6 (85), pp. 414–416.

6. **Shugunov L. Zh.** Models of analysis of air temperature and amount of precipitation in different zones of Stavropol territory, *Natural and technical Sciences*, 2008, no. 4 (36), pp. 212–214.

7. Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Shugunova L. E. Method of approximation of time series of long-term observations of natural processes. *Natural and technical Sciences*. 2011, no. 1 (51), pp. 246–250.

8. **Shugunov T. L., Shugunov L. Zh., Haupsheva M. H.** Modeling of natural processes and analysis of nanostructures of thin films. Nalchik, Publishing house of M. and V. Kotlyarov, 2017, 252 p.

9. Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Haupsheva M. H. A Statistical model for seasonal variations of temperature in the mountain area of Dagestan. *Successes of modern natural science*, 2017, no. 1.

10. Kendal M. Time series. Moscow, Finance and statistics. 1981, 200 p.

11. **Borovikov V.** STATISTICA. The art of data analysis on the computer: for professionals, 2nd ed. (+CD). SPb.: Peter, 2003, 688 p.

Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 621.386.032, 621.389

DOI: 10.17587/nmst.22.69-74

А. В. Корляков, д-р техн. наук, проф., akorl@yandex.ru,

О. Н. Михайлова, канд. техн. наук, науч. сотр., novaja.tasamaya@yandex.ru,

В. В. Трушлякова, канд. техн. наук, науч. сотр., clic2004@mail.ru,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)" (СПбГЭТУ "ЛЭТИ")

МЕМБРАННЫЕ ОКНА ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ВЫВОДА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 16.12.2019

Разработаны конструкции вакуумно-плотных рентгеновских окон на основе пленок нитрида кремния. Определены условия, обеспечивающие необходимую прочность и прозрачность мембранных окон. Проведено исследование изготовленных мембранных окон на механическую прочность и коэффициент пропускания в зависимости от энергии фотонов.

Ключевые слова: рентгеновские окна, нитрид кремния, мембраны

Введение

Разработка элементной базы миниатюрных рентгеновских источников является актуальной задачей, так как позволяет решить проблемы миниатюризации технических средств, использующих элементы рентгеновской микрооптики. Современные разработки в данной области, нацеленные на создание миниатюрных функциональных элементов, основаны на интегральногрупповых процессах микро- и нанотехнологии.

Для излучения в области так называемого "мягкого рентгеновского излучения" (МРИ) особые требования предъявляются к окнам для выпуска излучения рентгеновских трубок. Создание источников МРИ связано, прежде всего, с проблемой получения окон с толщиной доли микрометров, обладающих вакуумной плотностью и достаточной прочностью, которые могли бы выдерживать интенсивные световые потоки и (или) потоки электронов (при использовании прострельных анодов). Использование тонких окон требует минимизации размеров рентгеновской трубки (РТ), что оказывается возможным также за счет снижения ускоряющих напряжений для заданного диапазона излучения.

Специфика применения МРИ обладает рядом особенностей, делающих его крайне сложным для исследований. Особенно остро такая проблема стоит для области энергий фотонов МРИ 0,1...2,0 кэВ. Эта область спектра характеризуется высоким поглощением излучения. Малая длина пробега фотонов МРИ во всех веществах, включая воздушную среду, требует применения специальной техники и методик для исследования эффективности мембранных окон.

Область мягкого рентгеновского излучения

Область мягкого рентгеновского излучения имеет весьма условные границы, равно как и любой другой из диапазонов, на которые разбивается шкала энергий фотонов. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлена шкала электромагнитного излучения от инфракрасного (IR) до рентгеновского диапазона, отражающая современный уровень понимания проблемы.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) видимый свет представлен красной (650 нм), зеленой (530 нм) и синей (470 нм) длинами волн. В более коротковолновой области располагаются, соответственно, ультрафиолетовое (UV), экстремально далекое ультрафиолетовое (EUV), мягкое (SXR) и жесткое рентгеновское излучения. Для наглядности показаны: L-край поглощения кремния Si_L при 99,2 эВ (длина волны — 12,5 нм); *К*-края поглощения углерода C_K (284 эB, 4,37 нм), кислорода O_K (543 эВ, 2,28 нм), кремния Si_K (1,84 кэВ, 0,674 нм) и меди Cu_K (8,98 кэВ, 0,138 нм), а также эмиссионная К_а-линия меди CuK_{α} и удвоенное значение боровского радиуса $2a_0 = 1,06$ Е. Вертикальными штриховыми линиями обозначены границы пропускания окон из наиболее распространенных вакуумно-плотных материалов, а именно, плавленого кварца (SiO₂) обычно используемой миллиметровой толщины (прозрачен примерно до 200 нм), пленки нитрида кремния (Si₃N₄) толщиной 0,1 мкм (пропускает волны короче 15 нм) и 8-микрометровой бериллиевой фольги (область прозрачности начинается вблизи 1 нм).

Если считать, что экстремально далекий ультрафиолет простирается от 30 до 250 эВ, а мягкое рентгеновское излучение, соответственно, от 250 эВ до нескольких килоэлектрон-вольт, автор далее объединяет оба эти диапазона в более широкую область на том основании, что в ней сосредоточены края поглощения практически всех не слишком тяжелых химических элементов и, следовательно, в этом спектральном интервале любой материал является непрозрачным. В соседних же областях коэффициент поглощения для многих веществ становится столь малым, что необходимость в использовании вакуумного оборудования отпадает.

Из этого следует, что до настоящего времени создание наиболее технологичных, а именно, отпаянных источников излучения в мягком рентгеновском диапазоне было весьма затруднительно. В течение многих лет коротковолновая граница длин волн, пропускаемых известными материалами, задавалась двумя материалами [1], способными обеспечить вакуумную прочность при площади выходного окна в 1 см²: плавленым кварцем миллиметровой толщины, прозрачным в ультрафиолетовой области длин волн, и 8-микрометровой бериллиевой фольгой, пропускающей фотоны с энергией более 1,5 кэВ. Кварц перестал быть материалом, определяющим коротковолновую границу УФ-источников много десятков лет назад, уступив ее фторидам щелочных металлов, в том числе фториду лития, прозрачному до 105 нм (11,9 эВ). Это способствовало появлению отпаянных источников вакуумного ультрафиолетового излучения. Только относительно недавно появление структур на основе пленок нитрида кремния (Si₃N₄) толщиной порядка 0,1 мкм позволило радикально понизить верхний предел вплоть до 100 эВ.

Здесь необходимо отметить, что использование нитрида кремния в качестве окон и подложек до сих пор имело место в основном для нужд рентгеновской микроскопии, а не при создании источников МРИ.

Главные направления развития малогабаритных рентгеновских трубок связаны с переходом на новую элементную базу и тонкие окна из нитрида и карбида кремния, позволяющие вплотную подойти к длинноволновой границе рентгеновского диапазона.

Таким образом, использование нитрида кремния в качестве материалов в технике мягкого рентгеновского излучения представляется чрезвычайно актуальной задачей.

Конструкции рентгеновских окон на основе тонких пленок нитрида кремния

Для вывода рентгеновского излучения с низкой энергией необходимо использование окон, выполненных из материалов с малым атомным номером Z, имеющих малую толщину, достаточную механическую прочность, позволяющую выдержать перепад давления в 1 бар, а также возможность закрепления окна на трубке для проведения обработки трубки в процессе изготовления.

Разработка окон для вывода длинноволнового рентгеновского излучения затруднена в связи с высоким коэффициентом поглощения излучения во многих материалах. Уменьшение толщины окна ограничено его прочностью для удержания атмосферного давления в отпаянных РТ. Тонкие пленки нитрида и карбида кремния в силу особенностей кристаллической структуры имеют повышенную механическую прочность $\sigma_{\rm kp} \approx 2 \cdot 10^9$ Па. Отчасти это связано с толщиной пленки *h* от 0,1 до 0,4 мкм, где отсутствуют про-

Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания пленки Si₁N₄ толщиной 0,2 мкм от длины волны, энергии квантов излучения [3]

Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания пленки Si₃N₄ толщиной 0,1 мкм от длины волны, энергии квантов излучения [3]

тяженные структурные дефекты. С точки зрения технологии наиболее стабильные результаты получены на пленках Si_3N_4 [2], где остаточные механические напряжения находятся в диапазоне 50...700 МПа.

Прозрачность окна зависит от толщины *h* и определяется коэффициентом затухания $\mu(\lambda)$, который, в свою очередь, зависит от длины волны λ (или энергии квантов) излучения [3]. Коэффициент пропускания окна $I/I_0 = \exp(-\mu(\lambda) \cdot h)$.

Из рис. 2 и 3 видно, что в нашем диапазоне наилучший коэффициент пропускания пленки Si_3N_4 находится в районе длин волн до 5 нм и после 12 нм, что с учетом особенностей спектра тормозного излучения соответствует напряжениям на аноде 250...2000 В. Предпочтительна меньшая толщина пленки (0,1 мкм).

Анализ прочности мембран определяется областью значительных (нелинейных) прогибов мембранных элементов [4] с учетом остаточных механических напряжений в пленках. Критические давления $P_{\rm kp}$ зависят от толщины h и радиуса r (для круглой) мембраны, а также от значений остаточных механических напряжений σ_0 :

$$P_{\rm Kp} \approx 4 \frac{h \cdot \sigma_{\rm Kp}}{r} \sqrt{\frac{(\sigma_{\rm Kp} - \sigma_0)(1 - v^2)}{E}}$$

где E — модуль упругости материала пленки; v — коэффициент Пуассона. Из этого выражения находим размеры окон для атмосферного перепада давлений P_0 (10⁵ Па) с учетом $\sigma_{\rm kp}$ и необходимого запаса прочности η :

$$r \leq 4 \frac{h \cdot \sigma_{\mathrm{KP}}}{P_0 \cdot \eta} \sqrt{\frac{(\sigma_{\mathrm{KP}} - \sigma_0)(1 - \nu^2)}{E}}.$$

В соответствии с приведенным выражением при σ_0 в диапазоне 50...700 МПа и $\sigma_{\rm kp} \approx 2 \cdot 10^3$ МПа необходимые размеры окон при h < 0,1 мкм

Рис. 4. Варианты конструкций мембранных окон для вывода рентгеновского излучения

очень малы (менее 0,5 мм в диаметре), поэтому желательно выбирать толщины мембран от 0,1 до 0,2 мкм для обеспечения прочности и необходимой прозрачности.

Конструкция окна может быть многоэлементной — из множества отдельных близкорасположенных окон. Форма углубления определяется технологией травления подложки кремния. Предлагаемые варианты конструкции рентгеновских окон представлены на рис. 4.

В перспективе перемычки между отдельными окнами могут быть сделаны тоньше, тогда размеры элементов можно уменьшить, увеличив их число. Следует учесть, что реальная прочность мембран зависит от технологии, как и остаточное напряжение, поэтому необходимо экспериментальное определение этих параметров.

Присоединение окна к корпусу РТ должно обеспечивать герметичность при перепаде температур, сопутствующих рабочим режимам эксплуатации. Сами пленки в окнах должны быть надежно защищены от случайных механических повреждений.

Технология формирования рентгеновских окон на основе тонких мембран

Технологическая последовательность основных операций изготовления рентгеновских мембранных окон соответствовала унифицированной технологии объемной микромеханики. Мембраны формировали методом жидкостного анизотропного травления подложки с обратной стороны до поверхности пленки.

В качестве исходной структуры для мембранных окон по групповой технологии использовали стандартную пластину кремния ориентацией (100), а в качестве маскирующего покрытия при глубоком травлении кремния для создания мембраны — композицию SiO₂/Si₃N₄. Толщина пленки Si₃N₄ составляла 0,1...0,3 мкм.

Травление защитного слоя Si_3N_2/SiO_2 выполняли на установке ВЧ магнетронного травления в плазме SF_6 на всю глубину изоляционного слоя до поверхности кремния.

Глубокое анизотропное травление кремния до получения

мембраны остаточной толщины проводилось в щелочном растворе до слоя Si_3N_4/SiO_2 , выступающего в качестве "стоп-слоя". После этого выполняли удаление слоя SiO_2 и разделение пластины на кристаллы.

Также при изготовлении мембранных окон была реализована технология с использованием ионного вертикального травления, которая позволяет проводить травление мембран с одновременным их разделением. При этом вертикальное ионное травление на всю глубину пластины используется вместо жидкостного анизотропного. Данная технология позволяет также формировать мембраны любой удобной формы, с учетом требования прочности.

Целостность мембраны и ее способность выдерживать давление в 1 бар проверяли экспериментальным путем.

Определение коэффициента пропускания мембран из нитрида кремния

Исследования проводили в колонне растрового электронного микроскопа Quanta Inspect с возможностью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Выбор методики испытаний определялся, в первую очередь, необходимостью вакуумных методов измерения для исключения значительного воздушного поглощения в исследуемом диапазоне. Развертка по энергетической шкале в методе РСМА позволяет изучить спектральную зависимость показателя поглощения различных окон. Наличие высокоэнергетичного фокусированного электронного пучка позволяет реализовать высоколокальный источник рентгеновского излучения в широком диапазоне длин волн.

Для проведения испытаний рентгеновских окон была изготовлена специальная оправка (рис. 5, см. вторую сторону обложки), позволяющая фиксировать рентгеновским детектором излучение, прошедшее через тестовое окно.

Поворот оправки в сторону от направления детектора позволял фиксировать рентгеновское излучение, инициированное электронным пучком, без прохождения через окно. Отношение интенсивностей прошедшего через окно рентгеновского излучения к первичному потоку от ми-

Рис. 8. Зависимость коэффициента пропускания (пропускной способности) рентгеновского окна из нитрида кремния толщиной 0,2 мкм от энергии фотонов

Рис. 9. Готовые миниатюрные рентгеновские трубки с окнами из Si₃N₄ толщиной 0,2 мкм

шени позволяет оценить коэффициент пропускания k окна в заданном диапазоне длин волн.

Спектры рентгеновского излучения, проходящего через испытуемое окно и без него, представлены на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

На основании полученных спектров (рис. 6) был рассчитан коэффициент пропускания рентгеновского окна из нитрида кремния, как отношение интенсивности рентгеновского излучения, проходящего через окно, к интенсивности рентгеновского излучения без окна в интересующем нас диапазоне энергий. По полученным данным была построена зависимость коэффициента пропускания от энергии (рис. 7).

Были также получены спектры рентгеновского излучения от вольфрама с использованием рентгеновского окна из нитрида кремния толщиной 0,2 мкм и без него, по которым была построена зависимость коэффициента пропускания (пропускной способности) рентгеновского окна из нитрида кремния толщиной 0,2 мкм от энергии фотонов (рис. 8).

Характер полученных зависимостей несколько отличается от расчетных (см. рис. 2, 3), что, в первую очередь, связано с погрешностями измерения в области низких энергий для используемой методики.

При формировании образцов рентгеновских трубок использовали стеклянные баллоны, что оправдано с технологической и эксплуатационной позиции, так как позволяет визуализировать и контролировать процесс сборки, осуществлять эффективную электрическую изоляцию и герметизацию конструкции рентгеновской трубки. Готовые рентгеновские трубки представлены на рис. 9.

Заключение

Разработаны варианты конструкций мембранных окон на основе пленок Si_3N_4 для вывода излучения миниатюрных рентгеновских систем,

а также технология их формирования, основанная на технологии объемной микромеханики.

Получены экспериментальные образцы рентгеновских окон на основе тонких мембран из нитрида кремния для оценки параметров миниатюрных рентгеновских систем. Получена зависимость коэффициента пропускания (пропускной способности) рентгеновского окна из нитрида кремния толщиной 0,3 и 0,2 мкм от энергии фотонов.

Авторы выражают благодарность Будовичу В. Л. и сотрудникам фирмы Бюро аналитического приборостроения "Хромдет-Экология" за содействие в реализации данной разработки.

Список литературы

1. **Attwood D. T.** Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications. Cambridge, Cambridge University Press, 2007.

2. Белик В. П., Задиранов Ю. М., Ильинская Н. Д., Корляков А. В., Лучинин В. В., Маркосов М. А., Сейсян Р. П., Шер Э. М. Разработка свободных оптических фильтров на область спектра 12—15 nm для источника излучения нанолитографа // Письма в ЖТФ. 2007. Том. 33. Вып. 12. С. 29—36.

3. Henke B. L., Gullikson E. M., Davic J. C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50-30\ 000\ eV$, Z = 1-92 // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. Vol. 54, N. 2. P. 181–343.

4. **Корляков А. В.** Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8 (85). С. 17—26.

A. V. Korlyakov, D. Sc., Professor, Director of Nanotechnologies, e-mail: akorl@yandex.ru,

O. N. Mikhailova, Ph. D., Researcher, e-mail: novaja.tasamaya@yandex.ru,

V. V. Trushlyakova, Ph. D., Researcher, e-mail: clic2004@mail.ru,

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), Saint-Petersburg, Russian Federation

Corresponding author:

Mikhailova Olga N., Ph. D., Researcher, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: novaja.tasamaya@yandex.ru

Membrane Windows of Silicon Nitride for Output Soft X-Ray Radiation

Received on December 16, 2019 Accepted on December 20, 2019

Designed vacuum-dense X-ray windows based on silicon nitride films. The conditions providing the necessary strength and transparency of membrane windows are determined. A study of manufactured membrane windows on mechanical strength and transmittance depending on the photon energy was carried out.

Keywords: X-ray windows, silicon nitride, membranes

For citation:

Korlyakov A. V., Mikhailova O. N., Trushlyakova V. V. Membrane Windows of Silicon Nitride for Output Soft X-Ray Radiation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 69–74.

DOI: 10.17587/nmst.22.69-74

References

1. **Attwood D. T.** Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications. Cambridge, Cambridge University Press, 2007.

2. Belik V. P., Zadiranov Ju. M., Il'inskaja N. D., Korljakov A. V., Luchinin V. V., Markosov M. A., Sejsjan R. P., Sher Je. M. Razrabotka svobodnyh opticheskih fil'trov na oblast' spektra 12–15 nm dlja istochnika izluchenija nanolitografa, *Pis'ma v ZhTF*, 2007, vol. 33, is. 12. pp. 29—36. (in Russian).

3. Henke B. L., Gullikson E. M., Davic J. C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50-30\ 000\ eV$, Z = 1-92, *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* 1993, vol. 54, no. 2, pp. 181–343.

4. **Korljakov A. V.** Sverhtonkie membrany v mikrosistemnoj tehnike, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 8 (85), pp. 17–26 (in Russian).

Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 620.179.1

DOI: 10.17587/nmst.22.75-78

В. М. Юров, канд. физ.-мат. наук, доц., директор НИЦ, e-mail: exciton@list.ru, Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова, Караганда, Казахстан

ТОЛШИНА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ФТОРИДОВ ШЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И МАГНИЯ И ФТОРИДОВ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Поступила в редакцию 26.11.2019

Рассмотрены фториды щелочноземельных металлов и фториды природных минералов. Экспериментально и эмпирически определена толщина поверхностного слоя этих соединений. Толщина поверхностного слоя d(I) определяется одним фундаментальным параметром — молярным (атомным) объемом элемента, который периодически изменяется в соответствии с таблицей Д. И. Менделеева.

Ключевые слова: размерный эффект, наноструктура, фториды, атомарно-гладкий кристалл, поверхностный слой

Введение

Фториды щелочноземельных металлов (ЩЗМ) находят все большее применение в разных отраслях науки и техники. Наиболее важной и обширной областью применения фторидов магния, кальция, стронция и бария является оптическая промышленность [1, 2]. Фториды ЩЗМ и магния успешно применяют для изготовления активных и пассивных элементов фотоники, при конструировании технических устройств. Разностороннее изучение свойств фторидов металлов важно и с позиций развивающихся фторидных технологий [2]. В работе [3] введено представление о поверхностном слое магнитных наноструктур. В настоящей работе будет рассмотрена толщина поверхностного слоя фторидов магния и ЩЗМ, а также фторидов некоторых минералов.

Методика эксперимента и его результаты

Для размерной зависимости некоторого физического свойства твердого тела A(r) были использованы следующие соотношения [3]:

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right), \quad r \gg d;$$

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d+r}\right), \quad r \le d.$$
 (1)

Параметр *d*, который мы отождествляем с поверхностным слоем атомарно-гладкого кристалла, связан с поверхностным натяжением о формулой

$$d = \frac{2\sigma v}{RT},\tag{2}$$

где σ — поверхностное натяжение массивного образца, Дж/м²; v — молярный (атомный) объем, см³/моль; R — газовая постоянная, Дж/(кг · K); T — температура, K.

Размерная зависимость интенсивности люминесценции *I*/*I*₀ от размера зерна люминофора

В работах [3] и [4] было показано, что с большой точностью выполняется соотношение:

$$\sigma = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m,\tag{3}$$

где T_m — температура плавления твердого тела, К. Соотношение выполняется для всех металлов и для других кристаллических соединений. Если его подставить в (2), то при $T = T_m$ получим для поверхностного слоя I:

$$d(\mathbf{I}) = 0,17 \cdot 10^{-3} v. \tag{4}$$

Уравнение (4) показывает, что толщина поверхностного слоя d(I) определяется одним фундаментальным параметром — молярным (атомным) объемом элемента ($v = M/\rho$, M — молярная масса, г/моль, ρ — плотность, г/см³), который периодически изменяется в соответствии с таблицей Д. И. Менделеева. Используя параметр кристаллической решетки [5], можно определить число монослоев *n* в слое металлов d(I).

В соответствии с соотношениями (1) исследовали зависимость интенсивности рентгенолюминесценции фторидов металла от размера зерна люминофора [6]. Интенсивность рентгенолюминесценции образцов определяли стандартным фотоэлектрическим методом. Размер зерна *r* образца определяли с помощью металлографического микроскопа. В координатах $I/I_0 \sim 1/r$ экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с уравнением (1), давая значение *d* в соответствии с уравнением (2). В качестве примера зависимость I/I_0 от размера зерна фторида металла показана на рисунке. Используя уравнения (3) и (4), определяем d(I) и d(II).

В табл. 1 показаны расчетные значения поверхностных слоев I и II d(I) и d(II) фторидов магния и ЩЗМ. Значения d(I) не превышают толщину поверхностного слоя чистых металлов [3]. При h = d происходит структурный фазовый переход, связанный с реконструкцией или релаксацией поверхности (на рисунке он не показан) [7].

Слой d(II) простирается примерно до размера, равного $\approx 10 \ d$, где начинается объемная фаза. С этого размера начинаются размерные свойства. Исследование размерных эффектов было начато примерно в 80-х годах прошлого века [8—10]. Затем в связи со стремительным развитием нанотехнологий эти исследования стали их краеугольным камнем. Под наноматериалами принято понимать материалы, основные структурные элементы которых не превышают нанотехнологической границы — 100 нм, по крайней мере в одном направлении [11].

Ряд исследователей высказывают мнение, что верхний предел (максимальный размер элементов) для наноструктур должен быть связан с неким критическим характерным параметром: длиной свободного пробега носителей в явлениях переноса; размерами доменов/доменных стенок; диаметром петли Франка—Рида для скольжения дислокаций и т. п. [12]. Значит в слое *d*(II) должно быть много размерных эффектов, связанных с оптикой, магнетизмом и другими физическими свойствами согласно уравнению (1).

Однако целый ряд кристаллических минералов имеют толщину d(II), превышающую 100 нм. Такая ситуация показана в табл. 2, где представлены природные фториды. Известно около 35 природных фторидов. Различают простые природные фториды: группа виллиомита — NaF; флюорита — CaF₂; селлаита — MgF₂; и комплексные, в которых комплексообразователями являются B, Al, Mg, TR, Si, а роль аддента выпол-

Таблица 1

Толщина поверхностного слоя фторидов магния и щелочноземельных металлов

Фторид	М, г/моль	р, г/см ³	<i>d</i> (I), нм	п	<i>d</i> (II), нм
MgF ₂	62,30	3,14	3,4	a/c = 7/11	34
CaF ₂	78,08	3,18	4,2	8	42
SrF ₂	125,62	4,23	5,1	9	51
BaF ₂	175,34	4,83	6,2	10	62

Таблица 2

Толщина поверхностного слоя фторидов сложных минералов

Фторид	М, г/моль	ρ, г/см ³	<i>d</i> (I), нм	п	<i>d</i> (II), нм
Na ₂ SiF ₆ малладрит	188,06	2,714	11,8	14	118
Na ₃ AlF ₆ криолит	209,94	3,01	11,9	a/c = 26/38	119
Na ₂ MgAlF ₇ веберит	230,25	2,96	13,2	a/b/c = 18/19/13	132
K ₂ SiF ₆ гиератит	220,27	2,668	14,0	17	140
$(NH_4)_2SiF_6$ криптогалит	178,15	2,004	15,1	18	151
Na ₅ Al ₃ F ₁₄ хиолит	461,87	2,998	26,2	a/c = 37/26	262
$NaSr_2Al_2(FOH)_{11}$ ярлит	1393,6	3,78-3,93	60,7	a/b/c = 38/56/84	607

няет фтор (см. табл. 2). О простых фторидах мы говорили выше. Комплексные фториды бесцветны или окрашены в светлые тона, прозрачные или просвечивающие, со стеклянным блеском, низкой твердостью (2...5 по минералогической шкале), плотностью (2000...3180 кг/м³). Комплексные фториды возникают в возгонках вулканов (криптогалит, малладрид и др.), встречаются как акцессорные минералы гранитов, щелочных пород и их эффузивных аналогов (флюорит). Многие алюмофториды возникают при гидротермальном изменении криолита (веберит, хиолит и др.). Практическое значение имеют флюорит и криолит.

Самой большой толщиной поверхностного слоя d(I) обладает ярлит — 60,7 нм, а его слой d(II) равен 607 нм. Ярлит — это редкий минерал, представляющий собой мелкие сферические кристаллы.

Чем лучше объект отражает радиоволны, тем на большем расстоянии его можно засечь. Это и есть радиолокационная заметность. Технология "стелс" основывается на двух приемах: во-первых, максимальном поглощении радиоизлучения поверхностью корпуса самолета, во-вторых, на отражении радиоволн в таком направлении, чтобы они уже не могли вернуться назад к радиолокационной станции. Этот эффект достигается с помощью специального покрытия и специфической формы корпуса самолета.

По мнению исследователей, стелс-покрытие — это слои соединений металлов толщиной 70...90 нм. Кроме того, что покрытие делает самолет менее заметным, оно защищает летчиков от воздействия ультрафиолета. Как видно из табл. 2, такая толщина покрытия наблюдается у редкого минерала — ярлит, но такие соединения возможно синтезировать. При h = d в поверхностном слое происходит фазовый переход, что и приводит к стелс-эффекту.

Заключение

Чем выше молярная масса металлических соединений и меньше их плотность [формула (4)], тем больше толщина их поверхностного слоя. Фториды магния и ЩЗМ имеют малую толщину поверхностного слоя d(I) < 10 нм. Комплексные фториды имеют поверхностные слои d(II) > 100 нм, характерные для наноструктур. Такие отличия сказываются на их свойствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты № 0118РК000063 и № Ф.0781.

Список литературы

1. Щеулин А. С., Ангервакс А. Е., Рыскин А. И. Голографические среды на основе кристаллов со структурой флюорита с центрами окраски. СПб.: ИТМО, 2009. 127 с.

2. Минакова Т. С., Екимова И. А. Фториды и оксиды щелочноземельных металлов и магния. Поверхностные свойства. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 148 с.

3. Юров В. М., Лауринас В. Ч., Гученко С. А. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 6. С. 347—352.

4. Рехвиашвили С. Ш., Киштикова Е. В., Кармокова Р. Ю., Кармоков А. М. К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 2. С. 1–7.

5. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. СПб.: Химиздат, 2007. 783 с.

6. Юров В. М. Пат. 23223 Республика Казахстан, МПК-2010.01 G 01 N 27/76. Способ измерения поверхностного натяжения люминофоров; заявитель и патентообладатель Республиканское государственное казенное предприятие "Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова". № 2009/0712.1; заявл. 27.05.09; опубл. 11.2010, Бюл. № 11. 3 с.

7. **Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А.** и др. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.

8. Алукер Э. Д., Нестерова С. Н., Нечаев А. Ф. Влияние поверхности на объемную радиолюминесценцию щелочно-галоидных кристаллов // Физика твердого тела. 1988. Т. 30, вып. 4. С. 1028—1033.

9. Екимов А. И., Кудрявцев И. А., Иванов М. Г., Элфрос Ал. Л. Фотолюминесценция квазинульмерных полупроводниковых структур // Физика твердого тела. 1989. Т. 31, вып. 8. С. 192—207.

10. Валов П. М., Лейман В. И. Размерные эффекты в энергии экситонов и фазовых переходах первого рода в

V. M. Yurov, Associate Professor, exciton@list.ru,

Karaganda State University named after E. A. Buketov, Karaganda, 100028, Kazakhstan

Corresponding author:

Yurov Viktor M., Associate Professor, Karaganda State University named after E. A. Buketov, Karaganda, 100028, Kazakhstan, exciton@list.ru

Thickness of the Surface Layer of Fluorides Alkaline Metals and Magnesium and Fluorides of Natural Minerals

Received on November 26, 2019 Accepted on December 02, 2019

In the work, fluorides of alkaline earth metals and fluorides of natural minerals are considered. The thickness of the surface layer of these compounds was experimentally and empirically determined. The thickness of the surface layer d(I) is determined by one fundamental parameter — the molar (atomic) volume of the element, which periodically changes in accordance with the table D. I. Mendeleev.

Keywords: size effect, nanostructure, fluorides, atomically smooth crystal, surface layer

For citation:

Yurov V. M. Thickness of the Surface Layer of Fluorides Alkaline Metals and Magnesium and Fluorides of Natural Minerals, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 75–78.

DOI: 10.17587/nmst.22.75-78

References

1. **Sheýlin A. S., Angervaks A. E., Ryskin A. I.** Golograficheskie sredy na osnove kristallov so strýktýroi fliýorita s tsentrami okraski. St-Petersburg, ITMO, 2009. 127 p. [in Russian].

2. **Minakova T. S., Ekimova I. A.** Ftoridy i oksidy elochnozemelnyh metallov i magniia. Poverhnostnye svoistva. Tomsk: Izdatelskii Dom Tomskogo gosýdarstvennogo ýniversiteta, 2014. 148 p. [in Russian].

3. **Iýrov V. M., Laýrinas V. Ch., Gýchenko S. A**. Tolschina poverhnostnogo sloya atomarno-gladkikh magnitnykh nanostrýktýr, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 347—352 [in Russian].

4. Rehviashvili S. Sh., Kishtikova E. V., Karmokova R. Iý., Karmokov A. M. K raschetý postoiannoi Tolmena, *Pisma v JTF*, 2007, vol. 33, is. 2, pp. 1–7 [in Russian].

5. Solntsev Yu. P., Pryahin E. I. Materialovedenie. St-Petersburg, Himizdat, 2007. 783 p. [in Russian].

6. **Iýrov V. M.** Pat. 23223 Respýblika Kazahstan, MPK-2010.01 G 01 N 27/76. Sposob izmereniia poverhnostnogo natiajeniia liýminoforov; zaiavitel i patentoobladatel Respýblikanskoe gosýdarstvennoe kazennoe predpriiatie "Karagan-

dinskii gosýdarstvennyi ýniversitet im. E. A. Býketova". № 2009/0712.1; zaiavl. 27.05.09; opýbl. 11.2010, Biýl. № 11. 3 p. [in Kazahstan].

нанокристаллах CuCl в стекле // Физика твердого тела.

11. Гусев А. И., Ремпель А. А. Нанокристаллические

12. Сергеев Г. Б. Размерные эффекты в нанохимии //

Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева).

1999. Т. 41, вып. 2. С. 310-318.

2002. T. XLVI, № 5. C. 22-29.

материалы. М.: Физматлит, 2000. 224 с.

7. **Oýra K., Lifshits V. G., Saranin A. A.** et al. Vvedenie v fiziký poverhnosti. Moscow, Naýka, 2006. 490 p. [in Russian].

8. Alýker E. D., Nesterova S. N., Nechaev A. F. Vliianie poverhnosti na obemnýiý radioliýminestsentsiiý elochno-galoidnyh kristallov, *Fizika tverdogo tela*, 1988, vol. 30, is. 4, pp. 1028–1033 [in Russian].

9. Ekimov A. I., Kýdriavtsev I. A., Ivanov M. G., Elfros Al. L. Fotoliýminestsentsiia kvazinýlmernyh polýprovodnikovyh strýktýr, *Fizika tverdogo tela*, 1989, vol. 31, is. 8, pp. 192–207 [in Russian].

10. **Valov P. M., Leiman V. I.** Razmernye effekty v energii eksitonov i fazovyh perehodah pervogo roda v nanokristallah CuCl v stekle, *Fizika tverdogo tela*, 1999, vol. 41, is. 2, pp. 310—318 [in Russian].

11. Gýsev A. I., Rempel A. A. Nanokristallicheskie materialy, Moscow, Fizmatlit, 2000, 224 p. [in Russian].

12. Sergeev G. B. Razmernye effekty v nanohimii, *Ros. him. j. (J. Ros. him. ob-va im. D. I. Mendeleeva)*, 2002, vol. XLVI, no. 5, pp. 22–29 [in Russian].

Элементы MHCT *M*icro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.382.323;621.375.4

DOI: 10.17587/nmst.22.79-97

А. Н. Клочков, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: klochkov_alexey@mail.ru, Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук, Москва

INP НЕМТ-ТРАНЗИСТОРЫ И МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ: ОБЗОР

Поступила в редакцию 05.12.2019

Приведен обзор современного состояния и основных направлений развития технологии создания миллиметровых и субмиллиметровых СВЧ приборов на узкозонных HEMT-гетероструктурах (In, Ga, Al)As/InP. Рассмотрены параметры наногетероструктур, транзисторов и СВЧ МИС для терагерцевого диапазона частот на основе InP HEMT-технологии.

Ключевые слова: наногетероструктура InGaAs/InAlAs, подложка InP, HEMT-транзистор, монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, усилитель мощности, терагерцевый диапазон

Введение

На основе InP HEMT-(high electron mobility transistor, — транзистор с высокой подвижностью электронов) технологии с наногетероструктурами InGaAs/InAlAs/InP с высокой подвижностью электронов получены сверхвысокочастотные (СВЧ) полевые транзисторы с максимальной частотой генерации $f_{\text{max}} > 1,5$ ТГц [1]. В последние годы это стимулировало разработку малошумящих усилителей (МШУ) и других СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) для субмиллиметрового диапазона длин волн. В 2015 г. была преодолена психологическая черта в 1 ТГц для частоты работы МИС усилителя на InP НЕМТ [1]. Тенденция к продвижению в область терагерцевых частот (от 100 ГГц и выше) связана с развитием современных систем передачи информации (беспроводные системы связи, сотовая и спутниковая связь): увеличение скорости, объема и разнообразия передаваемой информации (цифровой, аналоговой, звуковой, ТВ-изображения и др.). Перспективно использование InP

НЕМТ МИС в системах радиоастрономии, ТГц спектроскопии, системах пассивной и активной ТГц визуализации, радиолокации и др.

Монолитные интегральные схемы широко используют в СВЧ диапазоне в приложениях, требующих небольших габаритных размеров и высокой надежности. Примерами СВЧ МИС являются малошумящие усилители, смесители, усилители мощности, модуляторы, используемые для построения СВЧ систем: приемных и передающих модулей систем связи, детекторов СВЧ излучения. МИС на основе НЕМТ обеспечивают малый коэффициент шума и высокое усиление. Традиционными являются НЕМТ МИС на основе арсенида галлия GaAs и более мощные МИС на нитриде галлия GaN. Однако использование этих МИС ограничено диапазоном частот от 1 до 100 ГГц.

InP HEMT имеют преимущества перед другими HEMT-гетероструктурами (GaAs PHEMT, GaN HEMT) по коэффициенту усиления, ширине полосы рабочих частот и по коэффициенту шума. Наиболее перспективно использование

InP НЕМТ МИС на частотах *W*-диапазона и выше (от 90 ГГц), а также в приложениях с низким напряжением питания и малой потребляемой мощностью. Кроме униполярных НЕМТтранзисторов, на основе системы материалов InP/InGaAs/InAlAs широко разрабатываются гетеробиполярные транзисторы (англ. heterobipolar transistors, HBT) [2, 3]. На сегодняшний день продемонстрированы InP HBT с частотой $f_{\max} > 1,1$ ТГц с шириной эмиттерного перехода 130 нм. По сравнению с InGaAs HEMT, HBTтранзисторы имеют большое напряжение пробоя за счет широкозонного коллектора из InP. В сочетании с высокой плотностью управляющего тока это делает InP HBT подходящими для генерации ТГц электромагнитных волн и создания усилителей мощности (УМ). Например, были созданы InP HBT УМ на частоты свыше 200 ГГц с выходной мощностью 200 мВт [4], усилитель для частот свыше 600 ГГц [5]. InGaAs HEMTтранзисторы по своим характеристикам, напротив, более подходят для создания МИС МШУ в системах приема ТГц сигналов. Возможность создания компактных и эффективных источников или приемников ТГц излучения в однокристальном исполнении является движущим фактором развития технологий InP HEMT и HBT.

Целью данной статьи является обзор достигнутых параметров, новых технологий и перспективных приложений в области InP HEMT МИС. Рассмотрены особенности строения HEMT-наногетероструктур InGaAs/InAlAs, описаны современные конструкции и особенности технологии НЕМТ-транзисторов с субстананометровыми затворами. Рассмотрены характеристики полученных на сегодняшний момент InP НЕМТ МИС для милимметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Наногетероструктуры InGaAs/InAlAs/InP для HEMT

Канал наногетероструктур InGaAs/InAlAs для НЕМТ представляет собой квантовую яму InGaAs/InAlAs, модулированно легированную электронами. На рис. 1, а приведена схема современной InGaAs/InAlAs/InP наногетероструктуры и InP HEMT-транзистора [6]. Для повышения быстродействия транзисторов InP HEMT стремятся использовать канал на основе In_xGa_{1-x}As с повышенным содержанием индия x > 50 %. Это обеспечивает увеличение подвижности и концентрации, максимальной дрейфовой скорости электронов [7]. Однако диапазон возможных толщин и составов слоя In_xGa_{1-x}As ограничен вследствие отличия параметров решетки канала и подложки. Повышение содержания индия в канале осуществляется либо до $x \le 75$ % путем псевдоморфного роста упруго напряженного слоя In_xGa_{1-x}As [8], либо использованием составного канала In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs/In_{0.53}Ga_{0.47}As с нанометровым слоем-вставкой InAs толщиной

а — схема; *б* — изображение канала InGaAs/InAs/InGaAs наногетероструктуры [10]

(3...5) нм [9]. Во втором случае можно считать, что содержание индия в канале $x \approx 100$ %, поскольку электроны практически полностью локализуются в узкозонном слое-вставке InAs [10].

Типичные значения электрофизических параметров InGaAs/InAlAs/InP наногетероструктур: слоевая концентрация электронов — $(3...4) \cdot 10^{12}$ см⁻² и подвижность — $(10\ 000...$ 15 000) см²/($B \cdot c$). Одновременно высокая концентрация и подвижность электронов достигаются за счет двустороннего дельта-легирования барьерных слоев InAlAs, причем легированные слои отделены от канала тонкими (2...4 нм) нелегированными прослойками InAlAs. В ИСВЧПЭ РАН были проведены исследования и определены оптимизированные условия выращивания гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP с мольной долей InAs в канале транзистора 0,53...1,0 методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [11—14]. В разработанных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InP с составным каналом In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs/In_{0.53}Ga_{0.47}As (2 нм/4 нм/4 нм) подвижность электронов при 300 К составляла более 11 000 см²/(В · с) при концентрации двумерных электронов более 3 · 10¹² см⁻². Использование слоя-вставки InAs толщиной 4 нм повысило скорость насыщения электронов в канале от 2,4 \cdot 10⁷ до 3,1 \cdot 10⁷ см/с. На рис. 1, б приведен снимок с атомным разрешением с просвечивающего электронного микроскопа составного канала InGaAs/InAs/InGaAs/InP полученной наногетероструктуры.

Наногетероструктуры InGaAs/InAlAs/InP для НЕМТ получают вакуумными методами роста: МЛЭ или газофазной металлорганической эпитаксией. Это позволяет соблюдать толщины слоев с точностью до 1 нм и минимизировать концентрацию ненамеренных примесей. Обычно составы и толщины слоев гетероструктур изменяются в зависимости от требований технологии НЕМТ-транзистора и, в первую очередь, от длины затвора. Ключевыми параметрами конструкции наногетероструктур InGaAs/InAlAs/InP для HEMT (рис. 1, *a*) являются содержание In в канале, толщина барьера InAlAs L_B, толщина канала $L_{\rm C}$, концентрация и положение δ -легирующего слоя(-ев), толщина и состав контактного слоя.

НЕМТ-гетероструктуры InGaAs/InAlAs с высоким ($x \ge 0,5$) содержанием индия можно получать не только на подложках InP, являющихся естественным материалом для эпитаксии ввиду подходящего параметра решетки. Параллельно

с InP НЕМТ развивалась технология метаморфных НЕМТ (МНЕМТ) на подложках GaAs [15, 55]. К преимуществам МНЕМТ можно отнести большую прочность GaAs, меньшую цену и больший диаметр подложек GaAs. Различие параметра решетки подложки GaAs и активных слоев InGaAs/InAlAs MHEMT-гетероструктуры компенсируют с помощью толстого буферного слоя — метаморфного буфера (МБ) [16]. В МБ в зависимости от толщины плавно или ступенчато изменяется состав твердого раствора In_xGa_yAl_zAs и, соответственно, параметр решетки. С помощью МБ создается "искусственная подложка", на которой можно получать $In_xGa_{1-x}As/In_xAl_{1-x}As$ структуры с практически любым составом в диапазоне x = 0...1. На практике при создании приборов толщина и составы слоев активной области МНЕМТ-канала, легирующих и контактных слоев очень напоминают InP HEMT. В итоге технологии транзисторов и МИС на основе InP НЕМТ и GaAs MHEMT очень близки. Характеристики GaAs MHEMT МИС обычно немного хуже аналогичных приборов на основе InP. Это связано с тем, что часть структурных дефектов, формирующихся в МБ вследствие релаксации механических напряжений, частично проникает в канал и вызывает дополнительное рассеяние электронов, что впоследствии влияет на характеристики приборов. Для улучшения характеристик МНЕМТ МБ должен быть достаточно толстым (более 1 мкм), в структуру МБ добавляются различные слои для "фильтрации" дислокаций [17, 18]. Ввиду сходства InP HEMT- и GaAs MHEMT-технологий в данной работе иногда будет использоваться обобщающий термин InGaAs HEMT.

Транзисторы InP НЕМТ для терагерцевых СВЧ МИС

Транзисторы InGaAs/InAlAs/InP НЕМТ являются самыми высокочастотными из всех существующих твердотельных трехэлектродных приборов. Продемонстрированы частоты $f_T > 700$ ГГц и $f_{\rm max} > 1,5$ ТГц [1] при длине затвора 25 нм. Основной метод повышения быстродействия InP НЕМТ состоит в снижении длины затвора L_G с одновременной оптимизацией геометрии контактов истока/стока, толщин и составов слоев наногетероструктуры InGaAs/InAlAs/InP для минимизации паразитных параметров и короткоканальных эффектов.

В табл. 1 приведен обзор основных параметров InP HEMT с длиной затвора 25...100 нм, согласно литературным данным [19], где L_G — длина затвора; f_T — частота отсечки; f_{max} — максимальная частота генерации; g_m — максимальная крутизна; I_{DSmax} — максимальный ток стока.

На рис. 2 схематически показаны ключевые этапы получения InP HEMT терагерцевого транзистора. Технологический процесс получения InP HEMT с длиной затвора $L_G < 100$ нм оптимизирован и практически идентичен во многих исследовательских лабораториях [23, 28, 29, 55]. На первом этапе с помощью фотолитографии и жидкостного травления осуществляется мезаизоляция приборов путем травления канала до буферного слоя InAlAs. Затем наносятся несплавные омические контакты стока и истока из Ti/Pt/Au (рис. 2, *a*).

Контактные слои InGaAs/InAlAs гетероструктуры легированы до предельных концентраций примеси [32] для снижения сопротивления омических контактов. Под узкозонным контактным слоем n^+ -InGaAs располагают сильнолегированный слой n^+ -InAlAs, чтобы уменьшить ширину потенциального барьера в зоне проводимости при переходе из InGaAs в InAlAs.

Затвор транзистора обычно формируют за два процесса электронно-лучевой литографии. Сначала создается подзатворный рецесс (заглубление) для того, чтобы можно было сформировать барьер Шоттки между затвором и слоем InAlAs

Параметры InP НЕМТ-транзисторов						
<i>L_G</i> , нм	<i>f_T</i> , ГГц	f_{\max} , ГГц	<i>g_m</i> , мСм/мм	I _{DSmax} , мА/мм	Ссылка	
100	305	340	1550	500	[20]	
100	249	415	1051	724	[40]	
87	559	671	3000	1200	[21]	
80	310	330	2630	700	[22]	
75	270	910	2190	800	[23]	
75	313	1300	2270	800	[24]	
60	710	478	2114	650	[25]	
50	496	400	2000	1200	[26]	
50	490	_	1900	1400	[27]	
50	557	718	1650	700	[28]	
50	385	1100	2300	_	[29]	
40	491	402	2000	800	[30]	
30	547	400	1500	1000	[31]	
30	644	681	1900	850	[9]	
30	600	1200	2400	900	[54]	
25	610	1500	3100	1180	[1]	

Ianaметры InP HEMT-транзисторов

Рис. 2. Последовательность получения InP НЕМТ

(рис. 2, δ). В окрестности затвора селективно стравливается сильнолегированная контактная область гетероструктуры до стоп-слоя травления из InP. InP обеспечивает селективность, гладкую морфологию поверхности рецесса, прецизионный контроль глубины травления и барьерной толщины слоя между затвором и каналом. Затем поверхность структуры и рецесса пассивируют тонким (~10 нм) слоем диэлектрика SiN_x методом плазмохимического осаждения.

Второй процесс электронно-лучевой литографии проводится с многослойной системой резистов для формирования Y- или T-образной формы затвора. Пассивационный слой SiN_x под затвором удаляется методом реактивного ионного травления и напыляется затвор (Ti/Pt/Au). Формирование HEMT-транзистора завершается нанесением пассивирующего слоя SiN_x (рис. 2, e). Перед нанесением слоев золотых межсоединений на структуру наносится пленка диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью, например, из бензоциклобутена.

В работе [41] показано, что СВЧ параметры НЕМТ можно существенно улучшить, если вокруг затвора сформировать полость в диэлектрике (рис. 2, *г*) по методу, описанному в работе [33].

Таблица 1

Эффект достигается за счет снижения паразитных емкостей затвор-исток и затвор-сток. В работе [24] на основе этой технологии продемонстрированы НЕМТ с длиной затвора 75 нм и частотой $f_{\text{max}} = 1300$ ГГц.

В табл. 2 приведена эволюция характеристик InP HEMT, разработанных в компании Northrop Grumman, при уменьшении длины затвора от 100 до 25 нм. При масштабировании длины затвора постепенно изменялась конструкция гетероструктуры: вместо псевдоморфного канала из In_xGa_{1-x} As с x = 0, 6...0, 75 стали использовать составной канал In_{0 53}Ga_{0 47}As/InAs/In_{0 53}Ga_{0 47}As толщиной всего 10 нм. Для 25-нанометрового транзистора расстояние затвор — верхний б-легирующий слой составляло всего 2 нм. Из табл. 2 наблюдаем тенденцию к уменьшению значений паразитных параметров и расстояния исток-сток до субмикронных размеров, а также необходимость минимизации сопротивления омических контактов ниже 0,1 мОм · мм. Аналогичное исследование зависимости DC и RF параметров от длины затвора $L_G = 50...20$ нм для МНЕМТтранзисторов приведено в работе [15] (Fraunhofer Institute for ASSP, Germany). В работе использовалась МНЕМТ GaAs-гетероструктура с составным каналом $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs/In_{0.53}Ga_{0.47}As$. Транзисторы с $L_G = 20$ нм имели внешнюю крутизну $g_{m, \text{max}} = 2,85$ См/мм, ток стока $I_{D, \text{max}} = 1400$ мА/мм, контактное сопротивление $R_{\rm C} = 0.04$ Ом · мм, сопротивление истока 0,12 Ом · мм. Предельные частоты МНЕМТ $f_T = 660 \ \Gamma \Gamma$ ц и $f_{\text{max}} > 1 \ \Gamma \Gamma$ ц были немного ниже, чем у аналогичных НЕМТ на подложках InP (табл. 1 и 2).

НЕМТ — это униполярный полевой транзистор, в котором проводимостью канала управляет напряжение на затворе. Частота отсечки НЕМТ

Рис. 3. Эквивалентная схема InP НЕМТ

может быть оценена на основе эквивалентной схемы НЕМТ, приведенной на рис. 3 [34]:

$$f_{T} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{mi}}{\left\{ \begin{array}{c} C_{GS} + C_{GD} + g_{mi}(R_{S} + R_{D}) \times \\ \times \left[C_{GD} + (C_{GS} + C_{GD}) \frac{g_{oi}}{g_{mi}} \right] \end{array} \right\}}, \quad (1)$$

где g_{oi} — выходная проводимость транзистора; g_{mi} — внутренняя крутизна, символы *G*, *S*, *D* обозначают, соответственно, затвор, сток и исток. Предельная частота передачи по току f_T определяется суммарным временем перезарядки τ внутренних и внешних емкостей, которое можно разбить на три компоненты:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_T} = \tau_t + \tau_{ext} + \tau_{par},$$

где τ_t определяется временем пролета электрона под затвором транзистора и приближенно равно отношению длины затвора L_G к средней скоро-

Таблица 2

Параметр	Год				
Парамстр	1998	2003	2007	2010	2013
Ширина затвора L _{G,} нм	100	70	35	30	25
Состав канала In_xGa_{1-x} As x, %	60	75	100	100	100
Расстояние исток-сток, мкм	2	2	1,5	1,0	0,5
Сопротивление омических контактов R_c , мОм · мм	0,12	0,1	0,04	0,04	0,04
Крутизна g _m , См/мм	1,0	1,4	2,0	2,5	3,0
Максимальная частота генерации f _{max} , ТГц	0,4	0,6	1,1	1,3	1,5
Частота отсечки f _T , ТГц	0,2	0,25	0,4	0,5	0,61
Предельная частота усиления МШУ, ТГц	0,19	0,24	0,48	0,85	1,0
Ширина МШУ, мкм	30	30	20	14	8

Развитие InP HEMT-технологии в компании Northrop Grumman [1]

сти дрейфа электронов. Время т_{ехt} — внешнее время задержки, связанное с перезарядкой внешних паразитных емкостей C_{GSext} и C_{GDext} (первые два слагаемых в знаменателе выражения (1)). Время т_{раг} обусловлено конечными сопротивлениями истока и стока (третье слагаемое в знаменателе (1)). Согласно данным работы [34] при $L_G > 100$ нм $\tau_T \gg \tau_{\text{ext}}$, τ_{par} . Таким образом, при большой длине затвора f_T определяется временем пролета электрона под затвором и линейно зависит от L_G . При уменьшении $L_G < 100$ нм, и, особенно, ниже 50 нм, вклады паразитных времен τ_{ext} и τ_{par} в f_T становятся определяющими. Таким образом, паразитные элементы C_{GS} и C_{GD} , R_S и R_D существенно замедляют рост характеристик НЕМТ по быстродействию при снижении L_G в области размеров затворов менее 100 нм.

Основные параметры геометрии НЕМТ, определяющие его характеристики на постоянном и переменном токе, — длина грибообразного затвора L_G , расстояние исток-сток, расстояние затвор-канал L_B , ширина рецесса L_R . Толщина L_B барьера InAlAs критически влияет на характеристики транзистора, поскольку она напрямую определяет значение емкости затвора, пропорциональное крутизне транзистора. Поэтому желательно снижать L_B . Вместе с тем аспектное отношение длины затвора к толщине L_B должно составлять не более 5 для предотвращения так называемых короткоканальных эффектов [35, 36].

Влияние ширины рецесса L_R на поведение InP НЕМТ исследовали в работе [37]. С одной стороны, уменьшение L_R может привести к росту тока стока и крутизны транзистора, поскольку сопротивление канала под рецессом R_R дает вклад в сопротивление транзистора в открытом состоянии:

$$R_R = \frac{L_R}{q \cdot \mu_n \cdot n_S},$$

где μ_n — подвижность электронов в канале; n_S — слоевая концентрация. С другой стороны, уменьшение L_R может увеличить субпороговые утечки и токи утечки затвора. Снижение L_R может приводить к увеличению f_T и f_{max} [38]. Также в последнее время широко используется асимметричный рецесс, ширина которого со стороны истока L_{RS} меньше, чем со стороны стока L_{RD} . Это позволяет одновременно снизить выходную проводимость и емкость затвор-сток C_{GD} , что приводит к увеличению f_{max} транзистора InP HEMT [23, 39]. В работе [40] показано, что увеличение расстояния затвор-сток по сравнению с расстоянием затвор-исток позволяет улучшить напряжение пробоя.

Соотношение между коэффициентом шума (NF_{\min}) и паразитными параметрами НЕМТ было построено на основе уравнения Фукуи в работе [41]:

$$NF_{\rm min} = 10\log[1 + 2\pi Kf(C_{GS} + C_{GD}) \sqrt{(R_G + R_S)/g_{mi}}],$$

где K — подгоночный множитель; f — частота; C_{GS} и C_{GD} — емкости затвор-исток и затворсток; R_G и R_S — сопротивления затвора и истока, соответственно. Паразитные емкости существенно влияют на f_T и NF_{min} . Между электрическими межсоединениями НЕМТ обычно используются диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k), например, бензоциклобутен. Однако в области затвора такие диэлектрики могут привести к серьезной деградации СВЧ характеристик.

В работе [30] исследовано влияние толщины L_B на характеристики InP HEMT. Масштабирование в сторону снижения длины затвора и толщины барьера приводило к увеличению крутизны и тока стока транзисторов. Уменьшение толщины барьера приводит к смещению порогового напряжения в положительную сторону, т. е. при малой L_B InP HEMT будет работать в режиме обогащения канала. При снижении L_B проявляются подпороговые и затворные токи утечки. По-видимому, именно токи утечки через тонкий барьерный слой InAlAs являются основным ограничением, препятствующим масштабированию InP HEMT в сторону уменьшения длины затвора менее 25 нм.

Согласно авторам работы [42] дальнейшее совершенствование параметров InP HEMT возможно только с применением новых технологий, например, использование подзатворных диэлектриков.

InGaAs HEMT МИС коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн

Успехи технологии InP НЕМТ-транзисторов позволили создавать монолитные МИС для коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн и субмиллиметрового диапазона. За счет большей подвижности и скорости электронов в канале InGaAs HEMT, InP МИС превосходят устройства на основе GaAs PHEMT по большинству параметров: коэффициенту шума $K_{\rm m}$; коэффициенту усиления $K_{\rm y}$; частоте отсечки; ширине полосы усиления и КПД суммирования мощности [43, 44]. К преимуществам InP HEMT относят низкую потребляемую мощность, которая объясняется большой крутизной транзистора. Низкое потребление наиболее важно в приложениях на основе автономных источников питания. Среди всех СВЧ технологий InP HEMT обеспечивает наибольшее отношение коэффициента усиления на 1 мВт потребляемой мощности.

В основном InP НЕМТ МИС разрабатывают для частот *W*-диапазона (90...110 ГГц) и выше. В коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн наиболее интересными являются частоты вокруг атмосферных окон прозрачности: 94 ГГц (*W*-диапазон), 140 и 220 ГГц. МИС МШУ для *W*-диапазона частот на основе InGaAs HEMT могут быть использованы в сенсорах, радарах, системах построения изображений, коротких высокопроизводительных беспроводных линиях связи. На сайте многих мировых производителей СВЧ МИС в сети Интернет есть спецификации на НЕМТ МШУ И-диапазона. В табл. 3 приведены ключевые характеристики серийных МШУ И-диапазона, а также результаты из научной литературы [45—53].

МШУ для *W*-диапазона обычно состоят из 3—5 каскадов по схеме с общим истоком и имеют коэффициент усиления 20...30 дБ и коэффициент шума менее 3,5 дБ. МШУ потребляют порядка 50 мВт мощности при напряжении питания 1...1,5 В. В работе [51] разработан усилитель с рекордно малым энергопотреблением 7,2 мВт. Как видно из табл. 3, для получения МШУ МИС *W*-диапазона можно использовать транзисторы с относительно длинным затвором 70...100 нм.

Использование в схемах InGaAs HEMT-транзисторов с длиной затвора менее 50 нм позволяет разрабатывать МИС для частот свыше 500 ГГц [54, 55] и может показаться избыточным для более низкочастотных схем. Однако использование таких короткоканальных транзисторов при разработке МИС милимметрового диапазона, например *Е*- (60...90 ГГц) или *W*-диапазонов (90...110 ГГц), позволяет существенно расширить рабочий частотный диапазон МИС либо оптимизировать коэффициент шума на уровне менее 2 дБ. В публикации [49] продемонстрированы два МШУ на основе технологии 35 нм InP НЕМТ-транзисторов с f_T и f_{max} , равными 480 и 1200 ГГц, соответственно. Трехкаскадный МШУ в диапазоне 81...86 ГГц обеспечивал коэффициент усиления 28 ± 1 дБ при коэффициенте шума менее 1,9 дБ. Балансный МШУ с коэффициентом усиления не менее 20 дБ и коэффициентом шума 2,7 дБ работал в широком диапазоне 56...110 ГГц.

При построении широкополосных InGaAs НЕМТ МШУ для частот *W*-диапазона и выше обычно используют две топологии усилительных каскадов: усилитель с общим истоком и каскодный усилитель. МШУ на основе InGaAs/InAlAs гетероструктур обычно содержат 3—5 усилительных каскадов с широкополосными согласующими линиями передачи. Преимущества каскодного МШУ состоят в большем коэффициенте изоляции схемы по выходу, большем выходном импедансе и обычно большем коэффициенте усиления [56]. Вместе с тем топология МШУ с общим истоком обычно характеризуется меньшим значением коэффициента шума и большей шириной полосы усиления. Поэтому для оптимизации соотношения коэффициентов шума и

Таблица 3

Разработчик, модель	Длина затвора, нм	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент шума, дБ	Потребляемая мощность, мВт	Площадь, мм ²
Northrop Grumman (CША), ALP280	100	80100	29	23,5	35	1,7
<i>ОММІС</i> (Франция), CGY2190UH/C2	70	75110	23	2,83,3	33	6,0
BAE Systems (CIIIA)	50	8597	1718	3,03,4	_	_
HRL Laboratories (США), LN4-110	50	75110	2227	3,5	42	1,8
QuinStar Technology (CIIIA)	35	56110	20	2,7	60	3,0
BAE Systems (CIIIA)	50	6090	25	1,6	45	3,6
Fraunhofer IAF (Германия)	50	74110	14,518,5	2,83,3	7,2	1,75
United Monolithic Semiconductors	100	7186	20	2,8		
Fraunhofer IAF (Германия)	50	80100	20	1,9	—	1,13

Сравнение	технических	характеристик	МШУ	<i>W</i> -диапазона
-----------	-------------	---------------	-----	---------------------

усиления в МШУ могут одновременно использоваться усилительные каскады по каскодной схеме и по схеме с общим истоком [97]. Наиболее важная задача при построении каскодной схемы состоит в стабилизации транзистора, подключенного по схеме с общим затвором [57]. Как показано в работе [58], на стабильность работы существенно влияет выбор размера и реализации конденсатора, заземляющего затвор этого транзистора. В работе [97] для этой цели использовали маленькие заземляющие конденсаторы в копланарном исполнении. В качестве дополнительной меры использовали высокоимпедансную копланарную линию передачи между двумя транзисторами каскода.

Окна прозрачности атмосферы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах могут быть использованы для высокоскоростной передачи данных благодаря большой ширине полосы частот. При этом InP HEMT МИС являются компактными и малопотребляющими устройствами, обеспечивающими большую свободу в выборе возможных параметров по расстоянию, скорости и направленности передающих и приемных систем. Далее в этом разделе рассмотрены разработки приемных и передающих МИС для окна прозрачности 220 ГГц, а в следующем разделе — для 300 ГГц. В работе [59] продемонстрирован МШУ с коэффициентом усиления 30 дБ при частотах 230...240 ГГц для коммуникационных систем со скоростью передачи данных свыше 10 Гбит/с. В работе [60] разработаны однокристальные приемный и передающий модули на 220 ГГц, способные обеспечить передачу данных со скоростью 25 Гбит/с на расстояния до 50 см. В работе [61] была осуществлена направленная передача информации на расстояние 850 м со скоростью 65 Гбит/с на частоте 240 ГГц.

Использование диапазонов с частотами свыше 100 ГГц для передачи данных связано с возрастающими с частотой потерями во всех компонентах приемных и передающих систем. На частотах *H*-диапазона (от 200 до 300 ГГц) и выше напряжение пробоя является основным фактором, ограничивающим достижимую выходную мощность УМ. В *H*-диапазоне максимальная продемонстрированная выходная мощность УМ на основе InP HEMT составляет 18 дБм [62]. При этом рекордная выходная мощность УМ более 20 дБм в полосе частот шириной 50 ГГц была продемонстрирована для технологии InP HBT, поскольку HBT-транзисторы имеют большее напряжение пробоя, чем HEMT. Для MHEMT продемонстрированная выходная мощность на порядок ниже и составляет 10 дБм в полосе 235...250 ГГц [63]. Для увеличения напряжения питания и размаха сигнала InGaAs HEMT УМ можно использовать специальные топологии с применением многотранзисторных усилительных ячеек [63, 64]. В работе [65] описана эффективная методика расчета и оптимизации схем InGaAs HEMT УМ для миллиметрового диапазона.

InP HEMT МИС субмиллиметрового диапазона длин волн ($f \ge 300 \ \Gamma \Gamma \mu$)

Разработка НЕМТ с $f_{\text{max}} > 1$ ТГц стимулировала продвижение рабочих частот усилителей в субмиллиметровый диапазон. Были продемонстрированы МШУ и другие МИС для атмосферного окна прозрачности 340 ГГц [66, 67], для частот в окрестности 480 ГГц [68], 670 ГГц [69], 850 ГГц [70, 71] и свыше 1 ТГц [1]. Для реализации этих схем был решен целый ряд новых научных и прикладных задач, включающих получение HEMT с высокой f_{max} , проектирование согласующих и питающих цепей, технологии сборки МИС для ввода и вывода сигналов из схемы. Вследствие увеличения рабочих частот характерные размеры элементов МИС пропорционально снижаются, что усложняет задачу получения воспроизводимого технологического процесса. Поэтому МИС для субмиллиметрового диапазона выделяют в отдельный класс схем терагерцевые МИС (ТМИС).

На данный момент активно разрабатывают терагерцевые коммуникационные системы в том числе с использованием InGaAs HEMT ТМИС. Увеличение частоты позволяет повысить скорость передачи данных до 100 Гбит/с и выше. При использовании частот свыше 100 ГГц максимальное расстояние беспроводной передачи информации составляет порядка нескольких десятков метров и ограничено атмосферным поглошением электромагнитных волн, зависящим от влажности. В работе [72] осуществлена передача информации со скоростью 20 Гбит/с на частоте 300 ГГц на расстояние ~80 см. Источник и приемник ТГц излучения были изготовлены на основе InP HEMT-технологии 80 нм. Источник включал 8-кратный умножитель частоты, амплитудный модулятор и УМ с выходной мощностью 10 дБм [73]. Приемный модуль состоял из МШУ (*K*_v = 30 дБ, *K*_ш = 9,8 дБ при 270...310 ГГц), некогерентного детектора и усилителя на основ-

ной частоте. В работе [74] продемонстрирован приемопередатчик, способный передавать данные со скоростью 100 Гбит/с на расстояния до 2 м на частоте 300 ГГц. Обычно приемные и передающие системы формируют из отдельных корпусированных модулей МИС, соединенных между собой волноводами. Такие системы являются громоздкими и дорогими. Решением может быть либо интеграция всей приемной/передающей системы на едином кристалле, что уменьшает размеры системы, но увеличивает стоимость разработки, либо объединение нескольких МИС на одной печатной плате с использованием флип-чип или проводных соединений. В работе [75] создан передающий InGaAs HEMT модуль на 300 ГГц, содержащий две МИС, кварцевую патч-антенну и диэлектрическую линзу на печатной плате.

Усилители мощности в передающих ТМИС используют для увеличения выходной мощности сигнала. Большая мощность УМ может компенсировать затухание сигнала с увеличением расстояния до приемника и низкие значения коэффициента усиления антенны. Кроме большой выходной мощности, УМ должен обладать широким диапазоном рабочих частот, а также высоким значением линейной выходной мощности. Так, ширина полосы пропускания УМ на 300 ГГц для обеспечения пропускной способности 25 ГБод должна составлять не менее 50 ГГц. Так как типичные значения выходной мощности преобразователей с повышением частоты составляют 16 дБм [74], то коэффициент усиления УМ должен быть порядка 20 дБ. Современное состояние технологии МИС УМ на 300 ГГц отражено в работах [76-78, 64]. Достигнутые значения среднего коэффициента линейного усиления УМ составляют 12...19 дБ, выходной мощности порядка 8...10 дБм. В работах [78, 64] приведены схемы широкополосных УМ на 300 ГГц с полосой пропускания более 100 ГГц. InGaAs HEMT УМ потребляют 150...300 мВт мощности при напряжении питания 1,5...2 В.

Только две организации на сегодняшний момент разработали InGaAs МИС для частот, существенно превышающих 300 ГГц. Компания *Northrop Grumman* с использованием технологии InP HEMT (см. табл. 2) за последние годы демонстрировала МИС МШУ, УМ, миксеры и преобразователи частоты, приемные и передающие модули для частот 300 ГГц [66], 480 ГГц [68], 670 ГГц [69, 54, 79, 80], 850 ГГц [70] и 1 ТГц [1]. Разработки Фраунгоферовского Института при-

Рис. 4. Схема приемника и передатчика 850 ГГц сигналов [71]

кладной физики твердого тела (Германия) сфокусированы на использовании МНЕМТ InGaAs гетероструктур. Были получены МИС МШУ и УМ для частот 300 ГГц [67, 76, 81], 600 ГГц [82—84] и 750 ГГц [85].

В работе [71] подробно описаны особенности технологии фирмы Northrop Grumman для приемных и передающих ТМИС диапазона частот 850 ГГц. Блок-диаграммы разработанных ТМИС приведены на рис. 4. Приемный модуль содержал два МШУ, за которыми размещался субгармонический миксер с понижением частоты. Миксер преобразовывал ТГц полосу 830...865 ГГц в промежуточную полосу 16...51 ГГц. Миксером управляла цепочка автогенераторных умножителей с множителем 9, на вход которой подавался гармонический сигнал 45,22 ГГц от внешнего источника с низкими фазовыми шумами. Модуль передачи преобразует сигнал промежуточной частоты 16...51 ГГц в ТГц область, а затем усиливает сигнал с помощью трех модулей-усилителей. Все схемы МИС были получены с использованием InP HEMT технологии 25 нм транзисторов (табл. 2) с максимальной крутизной 3050 мСм/мм и максимальной частотой генерации 1,5 ТГц. Усилители содержали 10 усилительных каскадов по схеме с общим эмиттером транзисторов с шириной затвора 10 мкм. Коэффициент усиления МШУ составлял 13,6...14,8 дБ в рабочем диапазоне. Рассеиваемая мощность МШУ составляла 55 мВт при напряжении питания 1,2 В. Процесс ТМИС включал следующие пассивные элементы: тонкопленочные резисторы NiCr сопротивлением 100 и 20 Ом/, металлдиэлектрик-металл конденсаторы 600 п Φ /мм² и два слоя металлизации. Подложки InP утоняли до 18 мкм. В подложках выполняли полностью металлизированные сквозные отверстия. Особенности обработки пластин InP с обратной стороны (утонение, создание сквозных отверстий) рассмотрены в работе [86].

Важным аспектом технологии ТГц МИС является корпусирование и интеграция. В Northrop Grumman высокочастотные ТМИС размещают в компактном модуле с прямоугольными интерфейсами в интегральной схеме. Это осуществляется с помощью монолитно-интегрированной на кристалле дипольной структуры, которая является копланарным волноводом до перехода в прямоугольный волновод. Для согласования элементов на кристалле использовались заземленные копланарные линии передачи. Они позволяли заземлять с низкой индуктивностью исток транзисторов, что является критически важным в дизайне ТГц МИС. При расчете схем обычно МІМ-конденсаторы и ТFТ-резисторы считались сосредоточенными элементами, а эффекты распределенной цепи и электрической длины учитывались с использованием модели копланарной линии передачи.

Криогенные приложения InP HEMT

Криогенное охлаждение НЕМТ-усилителей и других МИС приводит к снижению шума этих схем на один или несколько порядков. Поэтому для некоторых приложений, например, астрофизических наблюдений с помощью радиометрических приемников, систем интерферометрии и спектроскопии, было предложено охлаждать приемные СВЧ МИС до температур около 4,2 К (температура кипения жидкого гелия) или 27 К (температура кипения неона) [87, 88]. В таких системах коэффициент шума МШУ обычно выражают не в децибеллах, а в шумовой температуре $T_{\rm un}$, т. е. выраженной в кельвинах спектральной плотности мощности шума. $T_{\rm un}$ связана с коэффициентом шума следующими выражениями:

$$T_{\rm III} = T_0 (10^{K_{\rm III}/10} - 1); \quad K_{\rm III} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_{\rm III}}{T_0} + 1 \right),$$

где $T_0 = 290$ К. Типичные значения шумовой температуры корпусированных InGaAs HEMT МШУ *W*-диапазона (75...110 ГГц) при 300 К лежат в диапазоне 230...400 К [89, 90]. После криогенного охлаждения средняя шумовая темпера-

тура МШУ опускается ниже 40 К, а минимальные значения шумовой температуры достигают 22...25 К в более узких диапазонах частот [91—94]. Таким образом, охлаждение улучшает чувствительность приемных МИС до значений, близких к квантовому пределу. По своим характеристикам InP HEMT МШУ сравнимы с детекторами миллиметровых волн на основе сверхпроводящего туннельного перехода [95]. Были проведены исследования функционирования МШУ более высокочастотных диапазонов при низких температурах: 110...160 ГГц [96]; 160...270 ГГц [97—100]; 300 ГГц [101, 102] и 600 ГГц [101, 103]. Коэффициент шума InP НЕМТ снижается вместе с увеличением частоты отсечки и при минимизации паразитных сопротивлений затвора и истока [104]. Поэтому общей тенденцией криогенных МИС является использование как можно более короткозатворных транзисторов с $L_G \approx 25...35$ нм.

Приемные InGaAs HEMT-модули имеют рекордно низкие значения шума по сравнению с GaAs или GaN HEMT. Поэтому в ряде приложений, например, в радиоастрономии и спутниковой связи, для которых чувствительность приемных устройств является критическим параметром, желательно использовать InP НЕМТ МШУ в более низких диапазонах частот. Так, в последнее время широко разрабатывали криогенные InGaAs HEMT МШУ для частот в диапазонах 0,5...24 ГГц [105—108] и 24...52 ГГц [109]. Например, в работе [105] разработаны трехкаскадный МШУ для 0,3...14 ГГц с коэффициентом усиления 41 дБ и средней шумовой температурой 3,5 К, а также МШУ для 16...28 ГГц с усилением 32 дБ и шумовой температурой 6,3 К при охлаждении до температуры кипения гелия.

В работе [110] предложено использовать InP НЕМТ-транзистор с $L_G = 70$ нм для создания LC-генератора (генератор Колпитца) на частоту 11 ГГц, работающего при криогенных температурах. Преимуществом такого генератора по сравнению с другими технологиями (Si, GaAs) являлось рекордно низкое энергопотребление, составлявшее 4 мкВт при температуре 1,4 К и 90 мкВт при 300 К.

Современные направления совершенствования НЕМТ-технологии InGaAs/InAlAs МИС

Технология металл-диэлектрик-полупроводник (англ. *metal-oxede-semiconductor* — MOS) полевых транзисторов (англ. *field-effect transistor* — FET) на основе InGaAs позволяет преодолеть не-

Рис. 5. Схема СВЧ MOSFET на основе InGaAs/InAlAs наногетероструктур

которые ограничения НЕМТ-технологии. Подзатворный диэлектрик MOS-транзистора имеет значительно большую высоту потенциального барьера, чем затворный барьер Шоттки в НЕМТ, а также большее критическое поле пробоя. Поэтому, размещая диэлектрик между гетероструктурой и затвором, можно приблизить канал к затвору путем уменьшения толщины верхнего барьерного слоя InAlAs без увеличения токов утечки, а также уменьшить длину затвора. Это приводит к увеличению внутренней крутизны транзистора g_{m i} и снижению выходной проводимости. В качестве диэлектриков используются материалы с высокой диэлектрической проницаемостью Al_2O_3 , HfO_2 , ZrO_2 для увеличения емкости затвора [111]. В случае MOS-HEMT между каналом и затвором сохраняют нанометровый слой InAlAs [112]. Этот слой, во-первых, обеспечивает атомарно-гладкую верхнюю гетерограницу канала InGaAs/InAlAs, и, во-вторых, легируется. В случае технологии MOSFET барьерный слой InAlAs не используется вовсе.

На рис. 5 приведена схема InGaAs MOSFETтранзистора с $L_G = 20$ нм из работы [117], частоты работы которого составили $f_T = 275$ ГГц и $f_{max} = 640$ ГГц. В отличие от InGaAs HEMT, канал в MOSFET-гетероструктурах легирован только со стороны подложки, а верхний барьерный слой InAlAs оставляют очень тонким. Перед нанесением затвора формируется рецесс: контактные слои гетероструктуры удаляются травителями до поверхности канала InGaAs. Затем канал покрывается двухслойной системой диэлектриков Al₂O₃/HfO₂. Al₂O₃ обладает лучшей адгезией к InGaAs и обеспечивает более качественный интерфейс, а оксид HfO₂ имеет большую диэлектрическую проницаемость. Непосредственно

на диэлектрик наносят грибообразный затвор. К преимуществам технологии MOSFET над НЕМТ можно отнести более простую интеграцию полевых электродов для работы при больших напряжениях питания. Подзатворный диэлектрик при существенно меньшей толщине, чем барьерный слой InAlAs в HEMT, обеспечивает меньшие затворные токи утечки. Недостатком является снижение подвижности электронов в канале в результате рассеяния на границе диэлектрик — канал [113]. При наличии глубоких уровней в диэлектрике усложняется влияние затворного напряжения на концентрацию электронов в канале вследствие перезарядки этих дефектов. В последние годы прогресс технологии атомно-слоевого осаждения (англ. atomic layer deposition — ALD) диэлектриков на материалы АЗВ5 снял большинство вопросов к качеству подзатворного диэлектрика.

До недавнего времени разработки в области InGaAs MOSFET были сфокусированы на цифровых, а не аналоговых приложениях [42]. Однако после нескольких демонстраций MOSFETтранзисторов с f_{max} , превышающих 400 ГГц [114, 115], стали появляться сообщения о разработке МИС на их основе. В работе [116] продемонстрирован МШУ на основе MOSFET InGaAs технологии 80 нм для *W*-диапазона. Двухкаскадный МШУ был построен по каскодной схеме. Линейное усиление МШУ превышало 18 дБ в диапазоне 71...103 ГГц при коэффициенте шума 3,3...4,5 дБ. Для сравнения на такой же гетероструктуре по аналогичной схеме и технологии был изготовлен НЕМТ МШУ, коэффициент шума которого на ~1 дБ ниже во всем *W*-диапазоне. Данные результаты демонстрируют перспективы MOSFET МИС с учетом недостаточной проработанности технологии и вопросов проектирования схем. В работе [117] разработан четырехкаскадный MOSFET МШУ с коэффициентом усиления более 10 дБ в диапазоне 227...278 ГГц. В работе [118] продемонстрирован каскодный МОЅFET МШУ, содержащий три каскада, с коэффициентом усиления более 18 дБ в диапазоне 222...274 ГГц.

Заключение

В последние годы проводится активная работа по освоению терагерцевого диапазона частот для целей коммуникации, радиолокации, ТГц визуализации и спектроскопии. ТМИС на основе InGaAs HEMT-гетероструктур способны

эффективно принимать, испускать и преобразовывать СВЧ электромагнитные сигналы с частотой 1 ГГц...1 ТГц. На основе InP HEMT разработаны разнообразные модули малошумящих усилителей и усилителей мощности, преобразователей частоты, смесителей для различных частотных диапазонов, продемонстрированы системы для сверхбыстрой беспроводной передачи данных, детекторы для радиолокации и астрономических наблюдений. Для многих приложений существуют конкурирующие технологии. Так, InGaAs HEMT МИС в приложениях телекоммуникации часто сравнивают с более мощными InP HBT МИС, более дешевыми Si CMOS МИС или SiGe HBT-технологиями. Каждая технология имеет свои преимущества и недостатки. InP НЕМТ МИС имеют преимущества в тех областях, где критическими являются коэффициент усиления, ширина полосы рабочих частот и коэффициент шума.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-17-50030.

Список литературы

1. **Mei X., Yoshida W., Lange M.** et al. First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process // IEEE Electron Dev. Lett. 2015. Vol. 36. P. 327—329.

2. Urteaga M., Griffith Z., Seo M. et al. InP HBT technologies for THz integrated circuits // Proceedings of the IEEE. 2017. Vol. 105 (6). P. 1051–1067.

3. **Rodwell M. J., Le M., Brar B.** InP bipolar ICs: Scaling roadmaps, frequency limits, manufacturable technologies // Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96 (2). P. 271–286.

4. Griffith Z., Urteaga M., Rowell P., Pierson R. A 23.2 dBm at 210 GHz to 21.0 dBm at 235 GHz 16-way PA-cell combined InP HBT SSPA MMIC // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (2014, October).

5. Hacker J., Urteaga M., Seo M. et al. InP HBT amplifier MMICs operating to 0.67 THz // IEEE MTT-S Microw. Symp. Dig. (Seattle, USA, Jun. 2013).

6. **Ajayan J., Nirmal D.** A review of InP/InAlAs/InGaAs based transistors for high frequency applications // Superlattices and Microstructures. 2015. Vol. 86. P. 1–19.

7. Jesus A. del Alamo. Nanometre-scale electronics with III—V compound semiconductors // Nature. 2011. Vol. 479. P. 317—323.

8. Yamashita Y., A Endoh., Shinohara K. et al. Pseudomorphic InAlAs/InGaAs HEMTs with an ultrahigh f_T of 562 GHz // IEEE Electron Device Letters. 2002. Vol. 23. P. 573–575.

9. Kim D. H., Del Alamo J. A. 30-nm InAs PHEMTs With $f_T = 644$ GHz and $f_{max} = 681$ GHz // IEEE Electron Device Letters. 2010. Vol. 31. P. 806–808. 10. Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Klimov E. A. et al. Electrophysical and structural properties of the composite quantum wells InAlAs/InGaAs/InAlAs with ultrathin InAs inserts // J. Materials Research. 2015. Vol. 30, N_{2} 20. P. 3020–3025.

11. Galiev G. B., Vasilevskii I. S., Klimov E. A. et al. Effect of (1 0 0) GaAs substrate misorientation on electrophysical parameters, structural properties and surface morphology of metamorphic HEMT nanoheterostructures InGaAs/InAlAs // Journal of Crystal Growth. 2014. Vol. 392. P. 11–19.

12. **Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Klimov E. A.** et al. Specific features of the photoluminescence of HEMT nanoheterostructures containing a composite InAlAs/InGaAs/InAs/ InGaAs/InAlAs quantum well // Semiconductors. 2015. Vol. 49 (2). P. 234–241.

13. **Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Klimov E. A.** et al. Photoluminescence properties of modulation-doped InAlAs/ InGaAs/InAlAs structures with strained InAs and GaAs nanoinserts in the quantum well // Semiconductors. 2015. Vol. 49 (9). P. 1207—1217.

14. **Kulbachinskii V. A., Yuzeeva N. A., Galiev G. B.** et al. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts // Semicond. Sci. Technol. 2012. Vol. 27. P. 035021.

15. Schlechtweg M., Tessmann A., Leuther A. et al. Advanced building blocks for (Sub-) millimeter-wave applications in space, communication, and sensing using III/V mHEMT technology // Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications. 2016. June.

16. Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Мальцев П. П. и др. Полупроводниковые гетероструктуры InAlAs/InGaAs с метаморфным буфером $In_x(Al_yGa_{1-y})_{1-x}As$: конструкция, технология, применение // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10 (147). С. 14—24.

17. Galiev G. B., Klimov E. A., Klochkov A. N. et al. Photoluminescence Studies of InAlAs/InGaAs/InAlAs Metamorphic Heterostructures on GaAs Substrates // Semiconductors. 2014. Vol. 48 (5). P. 640–648.

18. **Chen C., Farrer I., Holmes S. N.** et al. Growth variations and scattering mechanisms in metamorphic InGaAs/InAlAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy // Journal of Crystal Growth. 2015. Vol. 425. P. 70–75.

19. **Ajayan J., Nirmal D., Ravichandran T.** et al. InP high electron mobility transistors for submillimetre wave and terahertz frequency applications: A review // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2018. Vol. 94. P. 199–214.

20. **Wojtowicz M., Lai R., Streit D.** et al. 0.10- μ m graded InGaAs channel InP HEMT with 305 GHz f_T and 340 GHz f_{max} // IEEE Electron Device Lett. 1994. Vol. 15. P. 477–479.

21. Jo H. B., Baek J. M., Yun D. Y. et al. 87 nm InAlAs/ InGaAs High-Electron-Mobility Transistors With a g_{m_max} of 3 S/mm and f_T of 559 GHz // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol. 39 (11). P. 1640–1643.

22. Chang C.-Y., Hsu H.-T., Chang E. Y. et al. Investigation of impact ionization in InAs-channel HEMT for high-speed and low-power applications // IEEE Electron Device Lett. 2007. Vol. 28. P. 856–858.

23. Takahashi T., Kawano Y., Makiyama K. et al. Enhancement of f_{max} to 910 GHz by adopting asymmetric gate recess and doubleside-doped structure in 75-nm-Gate

InAlAs/InGaAs HEMTs // IEEE Trans Electron Dev. 2017. Vol. 64. P. 89–95.

24. Takahashi T., Kawano Y., Makiyama K. et al. Maximum frequency of oscillation of 1.3 THz obtained by using an extended drain-side recess structure in 75-nm-gate In-AlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors // Applied Physics Express. 2017. Vol. 10 (2). P. 024102.

25. Chang E.-Y., Kuo C.-I., Hsu H.-T. et al. InAs thinchannel high electron-mobility transistors with very high current-gain cutoff frequency for emerging submillimeter-wave applications // Applied Physics Express. 2013. Vol. 6. P. 034001.

26. **Matsuzaki H., Maruyama T., Koasugi T.** et al. Lateral scale down of InGaAs/InAs composite-channel HEMTs with tungsten-based tiered ohmic structure for 2-S/mm g_m and 500-GHz f_T // IEEE Trans Electron Dev. 2007. Vol. 54. P. 378–384.

27. Moran D. A., McLelland H., Elgaid K. et al. 50-nm self-aligned and "standard" T-gate InP pHEMT comparison: the influence of parasitics on performance at the 50-nm node // IEEE Trans. Electron Dev. 2006. Vol. 53. P. 2920—2925.

28. **Kim D.-H., Del Alamo J. A.** 30-nm InAs pseudomorphic HEMTs on an InP substrate with a current-gain cutoff frequency of 628 GHz // IEEE Electron Dev. Lett. 2008. Vol. 29. P. 830–833.

29. Lai R., Mei X. B., Deal W. R. et al. Sub 50 nm InP HEMT device with fmax greater than 1 THz // IEEE International Electron Devices Meeting. 2007. P. 609–611.

30. **Kim D.-H., Del Alamo J. A.** Scalability of sub-100 nm InAs HEMTs on InP substrate for future logic applications // IEEE Trans. Electron Dev. 2010. Vol. 57. P. 1504—1511.

31. Shinohara K., Yamashita Y., Endoh A. et al. 547-GHz f_T InGaAs-InAlAs HEMTs with reduced source and drain resistance // IEEE Electron Dev. Lett. 2004. Vol. 25. P. 241–243.

32. Aldridge Jr. H., Lind A. G., Bomberger C. C. et al. N-type doping strategies for InGaAs // Materials Science in Semiconductor Processing. 2017. Vol. 62. P. 171–179.

33. **Makiyama K., Takahashi T., Suzuki T.** et al. Improvement of circuit-speed of HEMTs IC by reducing the parasitic capacitance // IEEE International Electron Devices Meeting. 2003. December.

34. **Kim D.-H., Brar B., del Alamo J. A.** $f_T = 688$ GHz and $f_{\text{max}} = 800$ GHz in Lg = 40 nm In_{0.7}Ga_{0.3}As MHEMTs with $g_{m_{\text{max}}} > 2.7$ mS/mm. // IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2011, 13.6.1–13.6.4.

35. **Федоров Ю. В., Михайлович С. В.** Нитридные НЕМТ против арсенидных: последняя битва? // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 16—22.

36. Galiev G. B., Klochkov A. N., Vasil'evskii I. S. et al. Electron properties of surface InGaAs/InAlAs quantum wells with inverted doping on InP substrates // Semiconductors. 2017. Vol. 51 (6). P. 760–765.

37. Kim D.-H., Del Alamo J. A., Lee J.-H., Seo K.-S. The impact of side-recess spacing on the logic performance of 50 nm InGaAs HEMTs // In: International conference on indium phosphide and related materials conference proceedings. 2006. P. 177–180.

38. Zhong Y., Wang X., Su Y. et al. Impact of the lateral width of the gate recess on the DC and RF characteristics of InAlAs/InGaAs HEMTs // Journal of Semiconductors. 2012. Vol. 33, N_{\odot} 5. P. 054007.

39. Xu D., Yang X., Kong W. M. T. et al. Gate-Length Scaling of Ultrashort Metamorphic High-Electron Mobility Transistors With Asymmetrically Recessed Gate Contacts for Millimeter- and Submillimeter-Wave Applications // IEEE Transactions El. Dev. 2011. Vol. 58. Is. 5. P. 1408–1417.

40. **Li-Dan W., Peng D., Yong-Bo S.** et al. 100-nm T-gate InAlAs/InGaAs InP-based HEMTs with $f_{\rm T}$ = 249 GHz and $f_{\rm max}$ = 415 GHz // Chinese Phys. B. 2014. Vol. 23. P. 038501.

41. **Takahashi T., Sato M., Nakasha Y., Hirose T., Hara N.** Improvement of RF and noise characteristics using a cavity structure in InAlAs/InGaAs HEMTs // IEEE Trans. Electron Dev. 2012. Vol. 59. P. 2136–2141.

42. **Kim D. H., Kim T. W., Baek R. H.** et al. High-performance III—V devices for future logic applications // IEEE International Electron Devices Meeting. 2014. P. 25.2.1— 25.2.4.

43. **Ingram D. L., Chen Y. C., Krauset J.** et al. A 427 mW, 20 % compact W-band InP HEMT MMIC power amplifier // IEEE MTT-S Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symp. Dig., Jun. 1999. P. 95–98.

44. **Tessmann A., Leuther A., Schwoerer C.** et al. A coplanar 94 GHz low-noise amplifier MMIC using 0.07 m metamorphic cascode HEMTs // IEEE MTT-S Int. Micro-wave Symp. Dig. Jun. 2003. Vol. 3. P. 1581–1584.

45. **Northrop** Grumman ALP280. URL: http:// www.northropgrumman.com/BusinessVentures/Microelectronics/Products/Pages/WBandProducts.aspx

46. **OMMIC CGY2190UH/C2.** URL: https://www.om-mic.com/low-noise-amplifiers/

47. Komiak J. J., Smith P. M., Duh K. H. G. et al. Metamorphic HEMT Technology for Microwave, Millimeter-Wave, and Submillimeter-Wave Applications. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2013.

48. **HRL** laboratories LN4-110. URL: http://mmics.hrl.com/InP.html

49. Estella N., Bui L., Camargo E., Schellenberg J. 35 nm InP HEMT LNAs at E/W-Band Frequencies // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). 2016.

50. Smith P. M., Ashman M., Xu D. et al. A 50 nm MHEMT millimeter-wave MMIC LNA with wideband noise and gain performance // IEEE MTT-S International Micro-wave Symposium (IMS2014), 2014, June.

51. **Thome F., Massler H., Wagner S.** et al. Comparison of two W-band low-noise amplifier MMICs with ultra low power consumption based on 50 nm InGaAs mHEMT technology // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). 2013, June.

52. **Byk E., Couturier A. M., Camiade M.** et al. An e-band very low noise amplifier with variable gain control on 100 nm GaAs PHEMT technology // 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. 2012, October. P. 111–114.

53. Leuther A., Tessmann A., Kallfass I. et al. Metamorphic HEMT technology for low-noise applications // IEEE International Conference on Indium Phosphide & Related Materials. 2009. May. P. 188–191.

54. **Deal W. R., Mei X. B., Leong K. M. K. H.** et al. THz monolithic integrated circuits using InP high electron mobility transistors // IEEE Trans. THz Sci. Technol. 2011. Vol. 1. P. 25–32.

55. **Tessmann A., Leuther A., Hurm V.** et al. Metamorphic HEMT MMICs and Modules Operating Between 300 and

500 GHz // IEEE J. Solid-State Circuits. 2011. Vol. 46. P. 2193–2202.

56. **Majidi-Ahy R., Nishimoto C., Riaziat M.** et al. 100-GHz high-gain InP MMIC cascode amplifier // IEEE journal of solid-state circuits. 1991. Vol. 26 (10). P. 1370–1378.

57. Shigematsu H., Sato M., Suzuki T. et al. A 49-GHz preamplifier with a transimpedance gain of 52 dB/spl Ome-ga/using InP HEMTs // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2001. Vol. 36 (9). P. 1309–1313.

58. **Tessmann A.** 220-GHz metamorphic HEMT amplifier MMICs for high-resolution imaging applications // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2005. Vol. 40 (10). P. 2070–2076.

59. Kawano Y., Matsumura H., Shiba et al. 230–240 GHz, 30 dB gain amplifier in InP-HEMT for multi-10 Gb/s data communication systems // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). 2013, October.

60. **Kallfass I., Antes J., Schneider T.** et al. All active mmic-based wireless communication at 220 GHz // IEEE Transactions on Tera-hertz Science and Technology. 2011. Vol. 1, N. 2. P. 477–487.

61. **Kallfass I., Boes F., Messinger T.** et al. 64 Gbit/s transmission over 850 m fixed wireless link at 240 GHz carrier frequency // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2015. Vol. 36 (2). P. 221–233.

62. **Radisic V., Leong K. M., Sarkozy S.** et al. A 75 mW 210 GHz power amplifier module // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. 2011, October.

63. **Amado-Rey A. B., Campos-Roca Y., Van Raay F.** et al. Analysis and Development of Submillimeter-Wave Stacked-FET Power Amplifier MMICs in 35-nm mHEMT Technology // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2018. Vol. 8, N. 3. P. 357–364.

64. **Amado-Rey B., Campos-Roca Y., Friesicke C.** et al. A 280 GHz stacked-FET power amplifier cell using 50 nm metamorphic HEMT technology // Proc. Eur. Microw. Integr. Circuits Conf., Oct. 2016. P. 189–192.

65. **Pahl P., Wagner S., Massler H.** et al. Efficiency optimized distributed transformers for broadband monolithic millimeter-wave integrated power amplifier circuits // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 65 (12). P. 4901–4913.

66. **Deal W. R., Mei X. B., Radisic V.** et al. Demonstration of a S-MMIC LNA with 16-dB gain at 340-GHz // in Proc. IEEE CSIC Conf. Dig. 2007. P. 1–4.

67. **Tessmann A., Leuther A., Hurm V.** et al. A 300 GHz mHEMT amplifier module // Proc. IEEE IRPM Conf. Dig., May 2009. P. 196—199.

68. **Deal W. R., Leong K., Radisic V.** et al. Demonstration of a 0.48 THz Amplifier module using InP HEMT Transistors // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2010. Vol. 19, N. 5. P. 289–291.

69. **Deal W. R., Leong K., Radisic V.** et al. Low noise amplification at 0.67 THz using 30 nm InP HEMTs // IEEE Microwave Wireless Comp. Lett. 2011. Vol. 21. P. 368–370.

70. Leong K. M., Mei X., Yoshida W. et al. A 0.85 THz low noise amplifier using InP HEMT transistors // IEEE Microwave Wireless Comp. Lett. 2015. Vol. 25. P. 397–409.

71. Leong K. M., Mei X., Yoshida W. H. et al. 850 GHz receiver and transmitter front-ends using InP HEMT // IEEE

Transactions on Terahertz Science and Technology. 2017. Vol. 7 (4). P. 466-475.

72. Song H. J., Kosugi T., Hamada H. et al. Demonstration of 20-Gbps wireless data transmission at 300 GHz for KIOSK instant data downloading applications with InP MMICs // In 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2016, May.

73. Hamada H., Kosugi T., Song H.-J. et al. 300-GHz band 20-Gbps ASK transmitter module based on InP-HEMT MMICs // Proc. Compound Semiconductor IC Symposium (CSICS), 2015.

74. **Hamada H., Fujimura T., Abdo I.** et al. 300-GHz. 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300-GHz fundamental mixer // In 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS, 2018, June. P. 1480–1483.

75. Dyck A., Rosch M., Tessmann A. et al. A Transmitter System-in-Package at 300 GHz With an off-Chip Antenna and GaAs-Based MMICs // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2019. Vol. 9 (3). P. 335–344.

76. Schoch B., Tessmann A., Leuther A. et al. 300 GHz broadband power amplifier with 508 GHz gain-bandwidth product and 8 dBm output power // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, June, 2019.

77. **Radisic V., Deal W. R., Leong K. M.** et al. A 10-mW submillimeter-wave solid-state power-amplifier module // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010. Vol. 58 (7). P. 1903–1909.

78. **Tessmann A., Leuther A., Hurm V.** et al. A broadband 220–320 ghz medium power amplifier module // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). 2014, October.

79. **Deal W. R., Leong K., Zamora A.** et al. A low-power 670-GHz InP HEMT receiver // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2016. Vol. 6 (6). P. 862–864.

80. **Deal W. R., Zamora A., Leong K.** et al. A 670 GHz low noise amplifier with <10 dB packaged noise figure // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016. Vol. 26 (10). P. 837–839.

81. John L., Tessmann A., Leuther A. et al. Investigation of Compact Power Amplifier Cells at THz Frequencies using InGaAs mHEMT Technology // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. P. 1261–1264.

82. **Tessmann A., Leuther A., Massler H.** et al. A 600 GHz low-noise amplifier module // In 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), 2014, June.

83. Lewark U. J., Tessmann A., Massler H. et al. An active 600 GHz frequency multiplier-by-six S-MMIC // In 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2013, June.

84. Leuther A., Tessmann A., Doria P. et al. 20 nm Metamorphic HEMT Technology for Terahertz Monolithic Integrated Circuits // Proceedings of the 9th European Microwave Integrated Circuits Conference, 2014.

85. **Tessmann A., Leuther A., Ohlrogge M.** et al. Submillimeter-wave amplifier circuits based on thin film microstrip line front-side technology // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2015, October.

86. **Tsutsumi T., Hamada H., Sano K.** et al. Feasibility Study of Wafer-Level Backside Process for InP-Based ICs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2019. Vol. 66, N. 9. P. 3771–3776.

87. Erickson N., Grosslein R., Erickson R., Weinreb S. A cryogenic focal plane array for 85–115 GHz using MMIC

preamplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47, N. 12. P. 2212–2219.

88. **Dewdney P. E., Hall P. J., Schilizzi R. T., Lazio T. J. L. W.** The square kilometre array // Proc. IEEE. 2009. Vol. 97, N. 8. P. 1482–1496.

89. Varonen M., Reeves R., Kangaslahti P. et al. An MMIC Low-Noise Amplifier Design Technique // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2016. Vol. 64, N. 3. P. 826–835.

90. Tang Y., Wadefalk N., Kooi J. W. et al. Cryogenic W-band LNA for ALMA band 2 + 3 with average noise temperature of 24 K // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2017, June. P. 176–179.

91. Thome F., Leuther A., Gallego J. D. et al. 70– 116-GHz LNAs in 35-nm and 50-nm Gate-Length Metamorphic HEMT Technologies for Cryogenic and Room-Temperature Operation // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS, 2018, June. P. 1495–1498.

92. Bryerton E. W., Mei X., Kim Y. M. et al. A W-band low-noise amplifier with 22K noise temperature // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2009, June. P. 681—684.

93. Varonen M., Reeves R., Kangaslahti P. et al. A 75– 116-GHz LNA with 23-K noise temperature at 108 GHz // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2013, June.

94. **Samoska L., Varonen M., Reeves R.** et al. W-Band cryogenic InP MMIC LNAs with noise below 30 K // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012, June.

95. **Billade B., Nystrom O., Meledinet D.** et al. Performance of the first alma band 5 production cartridge // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2012. Vol. 2, N. 2. P. 208–214.

96. Larkoski P. V., Kangaslahti P., Samoska L., Lai R., Sarkozy S., Church S. E. Low noise amplifiers for 140 GHz wide-band cryogenic receivers // IEEE MTT-S Int.Microw. Symp., Seattle, WA, USA, Jun. 2013.

97. Varonen M., Samoska L., Fung A. et al. A WR4 amplifier module chain with an 87 K noise temperature at 228 GHz // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2014. Vol. 25 (1). P. 58–60.

98. Varonen M., Larkoski P., Fung A. et al. 160–270-GHz InP HEMT MMIC low-noise amplifiers // IEEE CSICS Dig., La Jolla, CA, Oct. 2012. P. 1–4.

99. Zamora A., Leong K. M., Reck T. et al. A 170–280 GHz InP HEMT low noise amplifier // 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2014, September.

100. **Reck T., Zemora A., Schlecht E.** et al. A 230 GHz MMIC-based sideband separating receiver // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. Vol. 6 (1). P. 141–147.

101. **Reck T. J., Deal W., Chattopadhyay G.** Cryogenic performance of HEMT amplifiers at 340 GHz and 670 GHz // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2014, June.

102. **Chattopadhyay G., Reck T., Kooi J.** et al. A 340 GHz cryogenic amplifier based spectrometer for space based at-mospheric science applications // 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2017.

103. **Reck T. J., Schlecht E., Deal W., Chattopadhyay G.** A 640 GHz MMIC-based sideband-separating receiver for at-

mospheric science // 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2016, September.

104. **Pospieszalski M. W.** Extremely low-noise amplification with cryogenic FETs and HFETs: 1970–2004 // IEEE Microw. Mag., 2005. Vol. 6, N. 3. P. 62–75.

105. **Cha E., Wadefalk N., Nilsson P. A.** et al. 0.3–14 and 16–28 GHz Wide-Bandwidth Cryogenic MMIC Low-Noise Amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66 (11). P. 4860–4869.

106. **Pospieszalski M. W.** On the dependence of FET noise model parameters on ambient temperature // Proc. IEEE Radio Wireless Symp., Jan. 2017. P. 159–161.

107. Schleeh J., Wadefalk N., Nilsson P. et al. Cryogenic broadband ultra-low-noise MMIC LNAs for radio astronomy applications // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2013. Vol. 61, N. 2. P. 871–877.

108. **Pandian J. D., Baker L., Cortes G.** et al. Low-noise 6–8 GHz receiver // IEEE Microwave Magazine. 2006. Vol. 7 (6). P. 74–84.

109. **Cha E., Moschetti G., Wadefalk N.** et al. Two-finger InP HEMT design for stable cryogenic operation of ultralow-noise Ka-and Q-band LNAs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 65 (12). P. 5171-5180.

110. **Matheoud A. V., Solmaz N. S., Boero G.** A Low-Power Microwave HEMT LC Oscillator Operating Down to 1.4 K // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67 (7). P. 2782–2792.

111. **Robertson J.** High dielectric constant oxides // The European Physical Journal-Applied Physics. 2004. Vol. 28 (3). P. 265–291.

112. **Kim T.-W., Kim J. S., Kim D.-K.** et al. High-frequency characteristics of $L_g = 60$ nm InGaAs MOS high-electron-mobility-transistor (MOS-HEMT) with Al₂O₃ gate insulator // Electronics Letters. 2016. Vol. 52 (10). P. 870–872.

113. **Park J. H., Kim D. K., Son S. W.** et al. A new unified mobility extraction technique of $In_{0.7}Ga_{0.3}As$ QW MOSFETs // IEEE Electron Device Letters. 2016. Vol. 37 (9). P. 1096–1099.

114. Zota C. B., Lindelow F., Wernersson L. E., Lind E. High-frequency InGaAs tri-gate MOSFETs with f_{max} of 400 GHz // Electronics Letters. 2016. Vol. 52 (22). P. 1869–1871.

115. **Wu J., Fang Y., Markman B.** et al. $L_G = 30$ nm InAs Channel MOSFETs Exhibiting $f_{max} = 410$ GHz and $f_T = 357$ GHz // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol. 39 (4). P. 472–475.

116. **Leuther A., Ohlrogge M., Czornomaz L.** et al. 80 nm InGaAs MOSFET W-band low noise amplifier // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2017, June. P. 1133–1136.

117. Leuther A., Ohlrogge M., Czornomaz L. et al. A 250 GHz millimeter wave amplifier MMIC based on 30 nm metamorphic InGaAs MOSFET technology // 12th European Microwave Integrated Circuits Conference, 2017, October. P. 130–133.

118. **Tessmann A., Leuther A., Heinz F.** et al. High Gain 220–275 GHz Amplifier MMICs Based on Metamorphic 20 nm InGaAs MOSFET Technology // IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium, 2018, October. P. 156–159.

A. N. Klochkov, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: klochkov_alexey@mail.ru, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS (IUHFSE RAS), 117105 Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Klochkov Alexey N., Ph. D., Senior Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS (IUHFSE RAS), 117105 Moscow, Russian Federation, e-mail: klochkov_alexey@mail.ru

InP HEMT Transistors and Monolithic Integrated Circuits: Review

Received on December 5, 2019 Accepted on December 10, 2019

The paper presents an overview of the rapid progress of InGaAs high electron mobility transistors and monolithic integrated circuits for high speed applications. The InGaAs HEMTs on the InP substrates with record maximum oscillation frequency of 1.5 THz were demonstrated lately. This progress stimulated recent activities in the development of HEMT microwave monolitic integrated circuits (MMIC) for short-wavelength millimeter and submillimeter electromagnetic waves. Various new applications of InGaAs HEMT MMIC were proposed including wireless short-distance high-rate communications, radars, THz detection in astronomy, spectroscopy, active and passive THz imaging. Some of these application directions emerged only recently due to appearance of MMICs with record parameters. The InP HEMT MMIC are compact and reliable microwave devices. They are advantageous over classical GaAs PHEMT and GaN HEMT technologies in higher gain, operating frequency, bandwidth and lower noise figure. This work presents review of the demonstrated parameters and technologies in the field of InGaAs InP MMICs.

Keywords: nanoheterostructure InGaAs/InAlAs, substrate InP, HEMT transistor, monolithic integrated circuit, lownoise amplifier, power amplifier, terahertz frequency

For citation:

Klochkov A. N. InP HEMT Transistors and Monolithic Integrated Circuits: Review, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 79–97.

DOI: 10.17587/nmst.22.79-97

References

1. **Mei X., Yoshida W., Lange M.** et al. First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process, *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2015, vol. 36, pp. 327–329.

2. Urteaga M., Griffith Z., Seo M. et al. InP HBT technologies for THz integrated circuits, *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105 (6), pp. 1051–1067.

3. Rodwell M. J., Le M., Brar B. InP bipolar ICs: Scaling roadmaps, frequency limits, manufacturable technologies, *Proceedings of the IEEE*, 2008, vol. 96 (2), pp. 271–286.

4. Griffith Z., Urteaga M., Rowell P., Pierson R. A 23.2 dBm at 210GHz to 21.0 dBm at 235GHz 16-way PA-cell combined InP HBT SSPA MMIC. *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, 2014, October.

5. Hacker J., Urteaga M., Seo M. et al. InP HBT amplifier MMICs operating to 0.67 THz, *IEEE MTT-S Microw. Symp. Dig.* Seattle, USA, Jun. 2013.

6. Ajayan J., Nirmal D. A review of InP/InAlAs/InGaAs based transistors for high frequency applications, *Superlattices and Microstructures*, 2015, vol. 86, pp. 1–19.

7. **Del Alamo J. A.** Nanometre-scale electronics with III–V compound semiconductors, *Nature*, 2011, vol. 479, pp. 317–323.

8. Yamashita Y., Endoh A., Shinohara K. et al. Pseudomorphic InAlAs/InGaAs HEMTs with an ultrahigh f_T of 562 GHz, *IEEE Electron Device Letters*, 2002. vol. 23, pp. 573–575.

9. Kim D. H., Del Alamo J. A. 30-nm InAs PHEMTs With $f_T = 644$ GHz and $f_{max} = 681$ GHz, *IEEE Electron Device Letters*, 2010, vol. 31, pp. 806–808. 10. Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Klimov E. A. et al. Electrophysical and structural properties of the composite quantum wells InAlAs/InGaAs/InAlAs with ultrathin InAs inserts. *J. Materials Research*. 2015. vol. 30, no. 20, pp. 3020–3025.

11. Galiev G. B., Vasilevskii I. S., Klimov E. A. et al. Effect of (1 0 0) GaAs substrate misorientation on electrophysical parameters, structural properties and surface morphology of metamorphic HEMT nanoheterostructures InGaAs/InAlAs, *Journal of Crystal Growth*, 2014, vol. 392, pp. 11–19.

12. Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Klimov E. A. et al. Specific features of the photoluminescence of HEMT nanoheterostructures containing a composite InAlAs/InGaAs/ InAs/InGaAs/InAlAs quantum well, *Semiconductors*, 2015, vol. 49 (2), pp. 234–241.

13. **Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Klimov E. A.** et al. Photoluminescence properties of modulation-doped InAlAs/InGaAs/InAlAs structures with strained InAs and GaAs nanoinserts in the quantum well, *Semiconductors*, 2015, vol. 49 (9), pp. 1207–1217.

14. **Kulbachinskii V. A., Yuzeeva N. A., Galiev G. B.** et al. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts, *Semicond. Sci. Technol*, 2012, vol. 27, pp. 035021.

15. Schlechtweg M., Tessmann A., Leuther A. et al. Advanced building blocks for (Sub-) millimeter-wave applications in space, communication, and sensing using III/V mHEMT technology, *Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications*, 2016, June.

16. **Bugaev A. S., Galiev G. B., Maltsev P. P.** et al. Semiconductor Heterostructures InAlAs/InGaAs with Metamorphic Buffer $In_x(Al_yGa_{1-y})_{1-x}As$: Design, Technology, Application, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 14–24 (in Russian).

17. Galiev G. B., Klimov E. A., Klochkov A. N. et al. Photoluminescence Studies of InAlAs/InGaAs/InAlAs Metamorphic Heterostructures on GaAs Substrates, *Semiconductors*, 2014, vol. 48 (5), pp. 640–648.

18. Chen C., Farrer I., Holmes S. N. et al. Growth variations and scattering mechanisms in metamorphic In-GaAs/InAlAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy, *Journal of Crystal Growth*, 2015, vol. 425, pp. 70–75.

19. Ajayan J., Nirmal D., Ravichandran T. et al. InP high electron mobility transistors for submillimetre wave and terahertz frequency applications: A review. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2018, vol. 94, pp. 199–214.

20. **Wojtowicz M., Lai R., Streit D**. et al. 0.10- μ m graded InGaAs channel InP HEMT with 305 GHz f_T and 340 GHz f_{max} , *IEEE Electron Dev. Lett.*, 1994, vol. 15, pp. 477–479.

 f_{max} , *IEEE Electron Dev. Lett.*, 1994, vol. 15, pp. 477–479. 21. **Jo H. B., Baek J. M., Yun D. Y.** et al. 87 nm In-AlAs/InGaAs High-Electron-Mobility Transistors With a $g_{m \text{ max}}$ of 3 S/mm and f_T of 559 GHz, *IEEE Electron Device Letters*, 2018, vol. 39 (11), pp. 1640–1643.

22. Chang C.-Y., Hsu H.-T., Chang E. Y. et al. Investigation of impact ionization in InAs-channel HEMT for high-speed and low-power applications, *IEEE Electron Dev Lett.*, 2007, vol. 28, pp. 856–858.

23. Takahashi T., Kawano Y., Makiyama K. et al. Enhancement of $f_{\rm max}$ to 910 GHz by adopting asymmetric gate recess and doubleside-doped structure in 75-nm-Gate In-AlAs/InGaAs HEMTs, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2017, vol. 64, pp. 89–95.

24. Takahashi T., Kawano Y., Makiyama K. et al. Maximum frequency of oscillation of 1.3 THz obtained by using an extended drain-side recess structure in 75-nm-gate In-AlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors, *Applied Physics Express*, 2017, vol. 10 (2), pp. 024102.

25. Chang E.-Y., Kuo C.-I., Hsu H.-T. et al. InAs thinchannel high electron-mobility transistors with very high current-gain cutoff frequency for emerging submillimeter-wave applications, *Applied Physics Express*, 2013, vol. 6, pp. 034001.

26. Matsuzaki H., Maruyama T., Koasugi T. et al. Lateral scale down of InGaAs/InAs composite-channel HEMTs with tungsten-based tiered ohmic structure for 2-S/mm g_m and 500-GHz f_T , *IEEE Trans Electron Dev*, 2007, vol. 54, pp. 378–384.

27. Moran D. A., McLelland H., Elgaid K. et al. 50-nm self-aligned and "standard" T-gate InP pHEMT comparison: the influence of parasitics on performance at the 50-nm node, *IEEE Trans Electron Dev*, 2006, vol. 53, pp. 2920–2925.

28. **Kim D.-H., Del Alamo J. A.** 30-nm InAs pseudomorphic HEMTs on an InP substrate with a current-gain cutoff frequency of 628 GHz, *IEEE Electron Dev Lett.*, 2008, vol. 29, pp. 830–833.

29. Lai R., Mei X. B., Deal W. R. et al. Sub 50 nm InP HEMT device with fmax greater than 1 THz, *IEEE International Electron Devices Meeting*, 2007, pp. 609–611.

30. **Kim D.-H., Del Alamo J. A.** Scalability of sub-100 nm InAs HEMTs on InP substrate for future logic applications, *IEEE Trans Electron Dev.*, 2010, vol. 57, pp. 1504–1511.

31. Shinohara K., Yamashita Y., Endoh A. et al. 547-GHz f_t InGaAs-InAlAs HEMTs with reduced source and drain resistance, *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2004, vol. 25, pp. 241–243.

32. Aldridge Jr. H., Lind A. G., Bomberger C. C. et al. N-type doping strategies for InGaAs. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, vol. 62, pp. 171–179.

33. **Makiyama K., Takahashi T., Suzuki T.** et al. Improvement of circuit-speed of HEMTs IC by reducing the parasitic capacitance, *IEEE International Electron Devices Meeting*, 2003, December.

34. **Kim D.-H., Brar B., Del Alamo J. A.** $f_T = 688$ GHz and $f_{\text{max}} = 800$ GHz in $L_G = 40$ nm In_{0.7}Ga_{0.3}As MHEMTs with $g_{m \text{ max}} > 2.7$ mS/mm, in *IEEE International Electron Devices Meeting* (IEDM), 2011, 13.6.1–13.6.4.

35. Fedorov Y. V., Mikhaylovich S. V. Nitride HEMTs VS Arsenides: the Ultimate Battle?, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki*, 2015, vol. 18 (1), pp. 16–22 (in Russian).

36. Galiev G. B., Klochkov A. N., Vasil'evskii I. S. et al. Electron properties of surface InGaAs/InAlAs quantum wells with inverted doping on InP substrates, *Semiconductors*, 2017, vol. 51 (6), pp. 760–765.

37. **Kim D.-H., Del Alamo J. A., Lee J.-H., Seo K.-S.** The impact of side-recess spacing on the logic performance of 50 nm InGaAs HEMTs, *In: International conference on in-dium phosphide and related materials conference proceedings*, 2006, pp. 177–180.

38. **Zhong Y., Wang X., Su Y.** et al. Impact of the lateral width of the gate recess on the DC and RF characteristics of InAlAs/InGaAs HEMTs, *Journal of Semiconductors*, 2012, vol. 33, no. 5, pp. 054007.

39. Xu D., Yang X., Kong W. M. T. et al. Gate-Length Scaling of Ultrashort Metamorphic High-Electron Mobility Transistors With Asymmetrically Recessed Gate Contacts for Millimeter- and Submillimeter-Wave Applications, *IEEE Transactions El. Dev.*, 2011, vol. 58, no. 5, pp. 1408–1417.

40. **Li-Dan W., Peng D., Yong-Bo S.** et al. 100-nm T-gate InAlAs/InGaAs InP-based HEMTs with $f_T = 249$ GHz and $f_{max} = 415$ GHz, *Chinese Phys. B*, 2014, vol. 23, pp. 038501.

41. Takahashi T., Sato M., Nakasha Y., Hirose T., Hara N. Improvement of RF and noise characteristics using a cavity structure in InAlAs/InGaAs HEMTs, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2012, vol. 59, pp. 2136–2141.

42. Kim D. H., Kim T. W., Baek R. H. et al. High-performance III—V devices for future logic applications, *IEEE International Electron Devices Meeting*, 2014, pp. 25.2.1–25.2.4.

43. Ingram D. L., Chen Y. C., Krauset J. et al. A 427mW, 20 % compact W-band InP HEMT MMIC power amplifier, *IEEE MTT-S Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC)* Symp. Dig., Jun. 1999, pp. 95–98.

44. **Tessmann A., Leuther A., Schwoerer C.** et al. A coplanar 94 GHz low-noise amplifier MMIC using 0.07 m metamorphic cascode HEMTs. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* Jun. 2003, vol. 3, pp. 1581–1584.

45. **Northrop** Grumman ALP280, available at: http:// www.northropgrumman.com/BusinessVentures/Microelectronics/Products/Pages/WBandProducts.aspx

46. **OMMIC** CGY2190UH/C2, available at: https://www.ommic.com/low-noise-amplifiers/

47. Komiak J. J., Smith P. M., Duh K. H. G. et al. Metamorphic HEMT Technology for Microwave, Millimeter-Wave, and Submillimeter-Wave Applications, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, 2013.

48. **HRL** laboratories LN4-110, available at: http://mmics.hrl.com/InP.html

49. Estella N., Bui L., Camargo E., Schellenberg J. 35nm InP HEMT LNAs at E/W-Band Frequencies, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2016. 50. Smith P. M., Ashman M., Xu D. et al. A 50nm MHEMT millimeter-wave MMIC LNA with wideband noise and gain performance, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 2014.

51. Thome F., Massler H., Wagner S. et al. Comparison of two W-band low-noise amplifier MMICs with ultra low power consumption based on 50nm InGaAs mHEMT technology, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013.

52. Byk E., Couturier A. M., Camiade M. et al. An e-band very low noise amplifier with variable gain control on 100 nm GaAs PHEMT technology. *7th European Microwave Integrat-ed Circuit Conference*, 2012, October, pp. 111–114.

53. Leuther A., Tessmann A., Kallfass I. et al. Metamorphic HEMT technology for low-noise applications, *IEEE International Conference on Indium Phosphide & Related Materials*, 2009, May, pp. 188–191.

54. **Deal W. R., Mei X. B., Leong K. M. K. H.** et al. THz monolithic integrated circuits using InP high electron mobility transistors, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, 2011, vol. 1, pp. 25–32.

55. **Tessmann A., Leuther A., Hurm V.** et al. Metamorphic HEMT MMICs and Modules Operating Between 300 and 500 GHz, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2011, vol. 46, pp. 2193–2202.

56. Majidi-Ahy R., Nishimoto C., Riaziat M. et al. 100-GHz high-gain InP MMIC cascode amplifier, *IEEE journal of solid-state circuits*, 1991, vol. 26 (10), pp. 1370–1378.

57. Shigematsu H., Sato M., Suzuki T. et al. A 49-GHz preamplifier with a transimpedance gain of 52 dB/spl Omega/using InP HEMTs, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, vol. 36 (9), pp. 1309–1313.

58. **Tessmann A.** 220-GHz metamorphic HEMT amplifier MMICs for high-resolution imaging applications, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, vol. 40 (10), pp. 2070–2076.

59. Kawano Y., Matsumura H., Shiba et al. 230–240 GHz, 30 dB gain amplifier in InP-HEMT for multi-10 Gb/s data communication systems, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2013.

60. Kallfass I., Antes J., Schneider T. et al. All active mmic-based wireless communication at 220 GHz, *IEEE Transactions on Tera-hertz Science and Technology*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 477–487.

61. **Kallfass I., Boes F., Messinger T.** et al. 64 Gbit/s transmission over 850 m fixed wireless link at 240 GHz carrier frequency. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, vol. 36 (2), pp. 221–233.

62. Radisic V., Leong K. M., Sarkozy S. et al. A 75 mW 210 GHz power amplifier module, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, 2011, October.

63. Amado-Rey A. B., Campos-Roca Y., Van Raay F. et al. Analysis and Development of Submillimeter-Wave Stacked-FET Power Amplifier MMICs in 35-nm mHEMT Technology. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 357–364.

64. Amado-Rey B., Campos-Roca Y., Friesicke C. et al. A 280 GHz stacked-FET power amplifier cell using 50 nm metamorphic HEMT technology. *Proc. Eur. Microw. Integr. Circuits Conf.*, Oct. 2016, pp. 189–192.

65. Pahl P., Wagner S., Massler H. et al. Efficiency optimized distributed transformers for broadband monolithic millimeter-wave integrated power amplifier circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 65 (12), pp. 4901–4913. 66. **Deal W. R., Mei X. B., Radisic V.** et al. Demonstration of a S-MMIC LNA with 16-dB gain at 340-GHz, *Proc. IEEE CSIC Conf. Dig.*, 2007, pp. 1–4.

67. Tessmann A., Leuther A., Hurm V. et al. A 300 GHz mHEMT amplifier module, *Proc. IEEE IRPM Conf. Dig.*, May 2009, pp. 196–199.

68. Deal W. R., Leong K., Radisic V. et al. Demonstration of a 0.48 THz Amplifier module using InP HEMT Transistors, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 289–291.

69. Deal W. R., Leong K., Radisic V. et al. Low noise amplification at 0.67 THz using 30 nm InP HEMTs, *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, 2011, vol. 21, pp. 368–370.

70. Leong K. M., Mei X., Yoshida W. et al. A 0.85 THz low noise amplifier using InP HEMT transistors, *IEEE Mi*crowave Wireless Comp. Lett., 2015, vol. 25, pp. 397–409.

71. Leong K. M., Mei X., Yoshida W. et al. 850 GHz receiver and transmitter front-ends using InP HEMT, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, vol. 7 (4), pp. 466–475.

72. Song H. J., Kosugi T., Hamada H. et al. Demonstration of 20-Gbps wireless data transmission at 300 GHz for KIOSK instant data downloading applications with InP MMICs, *In 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium.* 2016, May.

73. Hamada H., Kosugi T., Song H.-J. et al. 300-GHz band 20-Gbps ASK transmitter module based on InP-HEMT MMICs, *Proc. Compound Semiconductor IC Symposium* (CSICS), 2015.

74. Hamada H., Fujimura T., Abdo I. et al. 300-GHz. 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300-GHz fundamental mixer, *In 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS*, June 2018, pp. 1480–1483.

75. Dyck A., Rosch M., Tessmann A. et al. A Transmitter System-in-Package at 300 GHz With an Off-Chip Antenna and GaAs-Based MMICs. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, vol. 9 (3), pp. 335–344.

76. Schoch B., Tessmann A., Leuther A. et al. 300 GHz broadband power amplifier with 508 GHz gain-bandwidth product and 8 dBm output power, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, June 2019.

77. Radisic V., Deal W. R., Leong K. M. et al. A 10-mW submillimeter-wave solid-state power-amplifier module, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, vol. 58 (7), pp. 1903–1909.

78. **Tessmann A., Leuther A., Hurm V.** et al. A broadband 220–320 ghz medium power amplifier module, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, October 2014.

79. Deal W. R., Leong K., Zamora A. et al. A low-power 670-GHz InP HEMT receiver, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, vol. 6 (6), pp. 862–864.

80. Deal W. R., Zamora A., Leong K. et al. A 670 GHz low noise amplifier with < 10 dB packaged noise figure, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26 (10), pp. 837–839.

81. John L., Tessmann A., Leuther A. et al. Investigation of Compact Power Amplifier Cells at THz Frequencies using InGaAs mHEMT Technology. *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2019, pp. 1261–1264.

82. Tessmann A., Leuther A., Massler H. et al. A 600 GHz low-noise amplifier module, *In 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, June 2014.

83. Lewark U. J., Tessmann A., Massler H. et al. An active 600 GHz frequency multiplier-by-six S-MMIC, *In 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (*MTT*), June 2013. 84. Leuther A., Tessmann A., Doria P. et al. 20 nm Metamorphic HEMT Technology for Terahertz Monolithic Integrated Circuits. *Proceedings of the 9th European Microwave Integrated Circuits Conference*, 2014.

85. **Tessmann A., Leuther A., Ohlrogge M.** et al. Submillimeter-wave amplifier circuits based on thin film microstrip line front-side technology, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2015.

86. **Tsutsumi T., Hamada H., Sano K.** et al. Feasibility Study of Wafer-Level Backside Process for InP-Based ICs, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, vol. 66, no. 9, pp. 3771–3776.

87. Erickson N., Grosslein R., Erickson R., Weinreb S. A cryogenic focal plane array for 85–115 GHz using MMIC preamplifiers, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, vol. 47, no. 12, pp. 2212–2219.

88. Dewdney P. E., Hall P. J., Schilizzi R. T., Lazio T. J. L. W. The square kilometre array, *Proc. IEEE*, 2009, vol. 97, no. 8, pp. 1482–1496.

89. Varonen M., Reeves R., Kangaslahti P. et al. An MMIC Low-Noise Amplifier Design Technique, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 826–835.

90. **Tang Y., Wadefalk N., Kooi J. W.** et al. Cryogenic W-band LNA for ALMA band 2 + 3 with average noise temperature of 24 K, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, June 2017, pp. 176–179.

91. Thome F., Leuther A., Gallego J. D. et al. 70–116-GHz LNAs in 35-nm and 50-nm Gate-Length Metamorphic HEMT Technologies for Cryogenic and Room-Temperature Operation. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS*, June 2018, pp. 1495–1498.

92. Bryerton E. W., Mei X., Kim Y. M. et al. A W-band low-noise amplifier with 22K noise temperature, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, June 2009, pp. 681–684.

93. Varonen M., Reeves R., Kangaslahti P. et al. A 75– 116-GHz LNA with 23-K noise temperature at 108 GHz. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (*MTT*), 2013.

94. Samoska L., Varonen M., Reeves R. et al. W-Band cryogenic InP MMIC LNAs with noise below 30K, *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, June 2012.

95. **Billade B., Nystrom O., Meledinet D.** et al. Performance of the first alma band 5 production cartridge, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 208–214.

96. Larkoski P. V., Kangaslahti P., Samoska L. et al. Low noise amplifiers for 140 GHz wide-band cryogenic receivers, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.*, Seattle, WA, USA, June 2013.

97. Varonen M., Samoska L., Fung A. et al. A WR4 amplifier module chain with an 87 K noise temperature at 228 GHz, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, vol. 25 (1), pp. 58–60.

98. Varonen M., Larkoski P., Fung A. et al. 160–270-GHz InP HEMT MMIC low-noise amplifiers, *IEEE CSICS Dig.*, La Jolla, CA, Oct. 2012, pp. 1–4.

99. Zamora A., Leong K. M., Reck T. et al. A 170–280 GHz InP HEMT low noise amplifier. *39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, September 2014.

100. Reck T., Zemora A., Schlecht E. et al. A 230 GHz MMIC-based sideband separating receiver, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, vol. 6 (1), pp. 141–147.

101. Reck T. J., Deal W., Chattopadhyay G. Cryogenic performance of HEMT amplifiers at 340 GHz and 670 GHz, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, June 2014.

102. Chattopadhyay G., Reck T., Kooi J. et al. A 340 GHz cryogenic amplifier based spectrometer for space based atmospheric science applications, 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2017.

103. Reck T. J., Schlecht E., Deal W., Chattopadhyay G. A 640 GHz MMIC-based sideband-separating receiver for atmospheric science, *41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, September 2016.

104. **Pospieszalski M. W.** Extremely low-noise amplification with cryogenic FETs and HFETs: 1970-2004, *IEEE Microw. Mag.*, 2005, vol. 6, no. 3, pp. 62–75.

105. **Cha E., Wadefalk N., Nilsson P. A.** et al. 0.3–14 and 16–28 GHz Wide-Bandwidth Cryogenic MMIC Low-Noise Amplifiers, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, vol. 66 (11), pp. 4860–4869.

106. **Pospieszalski M. W.** On the dependence of FET noise model parameters on ambient temperature, *in Proc. IEEE Radio Wireless Symp.*, Jan. 2017, pp. 159–161.

107. Schleeh J., Wadefalk N., Nilsson P. et al. Cryogenic broadband ultra-low-noise MMIC LNAs for radio astronomy applications, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 2013, vol. 61, no. 2, pp. 871–877.

108. **Pandian J. D., Baker L., Cortes G.** et al. Low-noise 6–8 GHz receiver, *IEEE Microwave Magazine*, 2006, vol. 7 (6), pp. 74–84.

109. **Cha E., Moschetti G., Wadefalk N.** et al. Two-finger InP HEMT design for stable cryogenic operation of ultra-lownoise Ka-and Q-band LNAs, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 65 (12), pp. 5171–5180.

110. Matheoud A. V., Solmaz N. S., Boero G. A Low-Power Microwave HEMT LC Oscillator Operating Down to 1.4 K, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, vol. 67 (7), pp. 2782–2792.

111. **Robertson J.** High dielectric constant oxides, *The European Physical Journal-Applied Physics*, 2004, vol. 28 (3), pp. 265–291.

112. **Kim T.-W., Kim J. S., Kim D.-K.** et al. High-frequency characteristics of $L_G = 60$ nm InGaAs MOS high-electron-mobility-transistor (MOS-HEMT) with Al₂O₃ gate insulator, *Electronics Letters*, 2016, vol. 52 (10), pp. 870–872.

113. **Park J. H., Kim D. K., Son S. W.** et al. A new unified mobility extraction technique of $In_{0.7}Ga_{0.3}As$ QW MOSFETs, *IEEE Electron Device Letters*, 2016, vol. 37 (9), pp. 1096–1099.

114. Zota C. B., Lindelow F., Wernersson L. E., Lind E. High-frequency InGaAs tri-gate MOSFETs with f_{max} of 400 GHz, *Electronics Letters*, 2016, vol. 52 (22), pp. 1869–1871.

115. Wu J., Fang Y., Markman B. et al. $L_G = 30$ nm InAs Channel MOSFETs Exhibiting $f_{max} = 410$ GHz and $f_T = 357$ GHz, *IEEE Electron Device Letters*, 2018, vol. 39 (4), pp. 472–475.

116. Leuther A., Ohlrogge M., Czornomaz L. et al. 80 nm In-GaAs MOSFET W-band low noise amplifier, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, June 2017, pp. 1133–1136.

117. Leuther A., Ohlrogge M., Czornomaz L. et al. A 250 GHz millimeter wave amplifier MMIC based on 30 nm metamorphic InGaAs MOSFET technology, *12th European Microwave Integrated Circuits Conference*, October 2017, pp. 130–133.

118. **Tessmann A., Leuther A., Heinz F.** et al. High Gain 220–275 GHz Amplifier MMICs Based on Metamorphic 20 nm InGaAs MOSFET Technology, *IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium*, October 2018, pp. 156–159.

УДК 621.38.049.77

С. А. Гамкрелидзе, д-р техн. наук, директор, П. П. Мальцев, д-р техн. наук, научный руководитель института, Ю. В. Федоров, гл. констр., зам. директора, Д. Л. Гнатюк, канд. техн. наук, зав. лаб., А. В. Зуев, науч. сотр., М. В. Майтама, науч. сотр., А. О. Михалев, мл. науч. сотр., m2lkeny@yandex.ru, Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

КАСКОДНАЯ МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА МАЛОШУМЯШЕГО УСИЛИТЕЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 8—12 ГГЦ НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 11.10.2019

Разработана конструкция монолитной интегральной схемы (МИС) малошумящего усилителя диапазонов частот 8...12 ГГц. МИС усилителя изготовлена на гетероструктуре AlGaN/AlN/GaN на подложке из карбида кремния. Приведены результаты измерений параметров МИС.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, наногетероструктура AlGaN/AlN/GaN, каскодная схема включения транзисторов

Теоретические исследования

Создание электронной компонентной базы для обеспечения работоспособности робототехнических комплексов и космических аппаратов в экстремальных условиях эксплуатации является чрезвычайно актуальной задачей. При этом большое значение имеет повышение энергетической эффективности монолитных интегральных схем (МИС) и снижение массогабаритных характеристик. Одним из эффективных способов снижения тока потребления МИС является уменьшение числа каскадов усиления (в идеале — до одного) путем повышения коэффициента усиления единичного каскада. Такими возможностями обладает каскодная схема включения транзисторов, которая особенно интересна при использовании нитрид-галлиевой технологии, применяемой для создания микропотребляющих усилителей мощности (УМ) и однокристальных приемопередающих модулей (ППМ) с минимальными массогабаритными характеристиками.

В данной работе приведены результаты, полученные в ИСВЧПЭ РАН, при разработке и исследовании МИС МШУ диапазона частот 8...12 ГГц с каскодным включением транзисторов на гетероструктуре AlGaN/AlN/GaN на подложках из карбида кремния (SiC) и сапфира (Al₂O₃). В процессе работы спроектирована МИС МШУ, выполненная по двухкаскадной схеме по отечественной технологии для микропотребляющих усилителей мощности.

Проектирование усилителя выполняли под разработанную в ИСВЧПЭ РАН технологию [1], заключающуюся в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10...14 мкм, что позволяет избежать необходимости формирования сквозных отверстий в подложке из карбида кремния. Заземление элементов схемы выполнено через отверстия в слое диэлектрика (рис. 1).

Для работы в классическом режиме без проявления короткоканальных эффектов транзисторы должны иметь аспектное отношение длины затвора к толщине барьерного слоя $L_g/t_{\text{bar}} > 10...15$ [1—4]. В МИС использованы гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN отечественного производства (ЗАО "Элма-Малахит") на подложке из SiC с толщиной барьерного слоя 14,7 нм и на подложке из Al₂O₃ с толщиной барьерного слоя 13,0 нм. Длина затворов транзисторов выбрана 0,25 мкм, что обеспечило аспектное отношение 17 и 19, соответственно.

Электрическая схема МИС МШУ показана на рис. 2. МИС выполнена по двухкаскадной схеме. В первом каскаде использованы два каскодно

Рис. 1. Основные этапы технологического маршрута с металлизацией на лицевой стороне пластины

Рис. 2. Электрическая схема МИС МШУ

включенных транзистора T1 и T2 с шириной затвора $W_g = 2 \times 100$ мкм. Для повышения коэффициентов стабильности и усиления применена обратная связь. Во втором каскаде использовался транзистор с шириной затвора $W_g = 2 \times 50$ мкм. Использована технология изготовления HEMT на гетероструктуре AlGaN/AlN/GaN и подложке из SiC.

По схеме, показанной на рис. 2, был проведен схемотехнический расчет параметров МИС МШУ. Расчетный коэффициент усиления МИС МШУ достигает 24 дБ. Усилитель имеет хорошее согласование как по входу, так и по выходу, обеспечивая безусловную стабильность в диапазоне частот 8...12 ГГц. Среда разработки: AWR Microwave office и Agilent Technologies ADS. Основой к расчетам послужили S-параметры изготовленных ранее тестовых транзисторов с шириной затвора $W_g = 4 \times 50$ мкм. На основе результатов измерений тестовых транзисторов были построены нелинейная модель Fujii и линейная шумовая модель Поспешальского, которые были использованы для дальнейших расчетов.

На основании разработанной принципиальной схемы был проведен полный электродинамический анализ схемы усилителя в среде Agilent Technologies Advanced Design System (ADS). Такой анализ позволяет точнее, чем простой схемотехнический анализ в MWO, симулировать параметры МИС, так как при данном типе расчетов учитывается взаимное влияние элементов друг на друга.

На основе принципиальной схемы был разработан топологический проект (рис. 3, см. третью сторону обложки) и выполнен его электромагнитный расчет методом моментов для верификации полученных результатов. На основе полученного топологического проекта был разработан комплект рабочих фотошаблонов для изготовления МИС.

Экспериментальные исследования

Проведено сравнение характеристик МИС МШУ, изготовленных по одинаковой топологии, на подложках двух типов — карбиде кремния и сапфире.

На рис. 4, *а* (см. третью сторону обложки) показано, что при напряжении питания 10 В, которое соответствует заложенному при проектировании, коэффициент усиления достигает 24 дБ на частоте 9 ГГц, что соответствует расчетному значению для МИС на подложке из карбида кремния. Уменьшение напряжения питания с 10 до 3 В приводит к снижению максимума коэффициента усиления до 18 дБ и перемещению его на частоту 8 ГГц. Для МИС МШУ на карбиде

Сравнение технических характеристик МИС МШУ

МИС (габаритные размеры)	Диапазон	Коэффициент	Коэффициент	Ток потреб-	КСВН*	КСВН
	частот, ГГц	шума, дБ	усиления дБ	ления мА	по входу	по выходу
GaN/Al_2O_3 (1,9 × 1,3 мм) ИСВЧПЭ РАН GaN/SiC (1,9 × 1,3 мм) ИСВЧПЭ РАН GaN/SiC (2,1 × 1,5) TriQuint, США GaAs (1,5 × 1,5) United monolithic semiconductors, Франция * KCBH — коэффициент стоячей волны	812 812 612 617 нормированн	45 34 1,8 1,8	1217 1424 22 21	80 80 100 80	2 2,6 2,5	2 2 2 2

кремния коэффициент шума находится в диапазоне 3...4 дБ при напряжении питания 10 и 3 В (рис. 4, δ).

Замена подложки из карбида кремния на сапфировую также приводит к снижению максимума коэффициента усиления до 18 дБ на 8 ГГц при напряжении питания 10 В. Уменьшение напряжения питания до 3 В снижает максимальный коэффициент усиления до 12 дБ и перемещает на частоту 6 ГГц. МИС МШУ на сапфировых подложках имеют коэффициент шума в диапазоне частот 8...12 ГГц от 4 до 5 дБ для напряжения питания 10 В и от 5 до 6 дБ при 3 В (рис. 5, см. третью сторону обложки).

В таблице приведены характеристики МИС МШУ, разработанного и изготовленного в ИСВЧПЭ РАН на двух типах подложек — карбиде кремния и сапфире, а также ближайших зарубежных аналогов на карбиде кремния TriQuint TGA 2612 [5] и на арсениде галлия United monolithic semiconductors CHA3666 [6].

Таким образом, из таблицы видно, что на коэффициент шума сильное влияние оказывает тип подложки.

В ИСВЧПЭ РАН разработана технология изготовления МИС при напряжении питания 30 В на нитриде галлия с плотностью мощности 1 Вт/мм, которая аналогична технологии МИС на арсениде галлия и позволяет использовать ранее применяемые материалы и технологические приемы. По данной технологии разработан комплект МИС серии 5411 [7], прошедший необходимые испытания на надежность и безотказность.

Выводы

Исследованы изготовленные в ИСВЧПЭ РАН экспериментальные образцы МИС МШУ на двух типах подложек — карбиде кремния и сапфире. Исследования показали, что лучшие на 10...30 % характеристики имеют МИС на подложках из карбида кремния: коэффициент усиления 14...24 дБ и коэффициент шума 3...4 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц при напряжении питания 10 В и токе потребления до 100 мА.

Понижение напряжения питания с 10 до 3 В или замена подложки из карбида кремния на сапфировую ухудшают параметры МИС МШУ с $K_{\rm III} = 3...4$ дБ до $K_{\rm III} = 4...6$ дБ, соответственно, но они остаются работоспособными при экстремальных условиях эксплуатации.

Совместное использование МШУ и УМ в однокристальных ППМ обеспечивает реализацию минимальных массогабаритных характеристик при экстремальных условиях эксплуатации в робототехнических комплексах и космических аппаратах.

В ближайшей перспективе до 2025 г. для микропотребляющих усилителей мощности на нитриде галлия с выходной мощностью до 3...5 Вт с кристалла целесообразно перейти от дорогих подложек из карбида кремния к более дешевым сапфировым для экстремальных условий применения и к кремниевым для общепромышленного исполнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

По результатам работы получено свидетельство на топологию интегральной микросхемы МИС МШУ [8].

Список литературы

1. Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Павлов А. Ю. и др. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 5. С. 273—293.

2. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaN/GaN HEMT // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12–17.

3. **Мальцев П. П., Федоров Ю. В.** Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России // Интеграл. 2013. № 3. С. 25–29.

4. **Федоров Ю. В., Михайлович С. В.** Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 4. С. 217—226.

5. **Triquint** TGA2612 12 GHz GaN LNA. URL: https:// www.qorvo.com/products/p/TGA2612. (Дата обращения: 16.11.2018). 6. United monolithic semiconductors CHA3666 // CHA3666 — 6—17 GHz Low Noise Amplifier GaAs Monolithic Microwave IC. URL: http://www.richardsonrfpd.com/ resources/RellDocuments/SYS_24/CHA3666.pdf. (Дата обращения: 16.11.2018).

7. Справочный лист комплекта монолитных интегральных схем на нитриде галлия для диапазона 57—64 ГГц серии 5411. URL: http://isvch.ru/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/list.pdf

8. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС. Интегральный малошумящий усилитель для диапазона частот 8—12 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2016630103 от 19 августа 2016 г.

S. A. Gamkrelidze, Director of IUHFSE RAS, P. P. Maltsev, Scientific Director, Y. V. Fedorov, Chief Designer, D. L. Gnatyuk, Head of Laboratory № 104, A. V. Zuev, Researcher, M. V. Maitama, Researcher, A. O. Mikhalev, Engineer, e-mail: m2lkeny@yandex.ru. Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Mikhalev Artem O., Engineer, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, e-mail: m2lkeny@yandex.ru, Moscow, 117105, Russian Federation.

Cascode Monolithic Integrated Circuit of a Low-Noise Amplifier in the Frequency Range of 8—12 GHz on a Gallium Nitride Nanoheterostructure

Received on October 11, 2019 Accepted on October 25, 2019

Creating an electronic component base to ensure the performance of solid-state electronic systems in extreme conditions of near-Earth space or in special equipment is an extremely urgent task At the same time, increasing the energy efficiency of monolithic integrated circuits (MIC) is very important. One of the effective ways to reduce the power consumption of the MIC is to reduce the number of gain stages (ideally, to one) by increasing the gain of a single stage. In this regard, the cascode circuit for switching on transistors, which is especially interesting when using gallium nitride technology, has unique capabilities. In this paper we present the results obtained at the IUHFSE RAS in the development and study of the X-band LNA MIC with cascode switching transistors on an AlGaN/AlN/GaN heterostructure on a SiC substrate.

Keywords: monolithic integrated circuit, low-noise amplifier, nitride nanoheterostructure, cascode transistor circuit

For citation:

Gamkrelidze S. A., Maltsev P. P., Fedorov Y. V., Gnatyuk D. L., Zuev A. V., Maitama M. V., Mikhalev A. O. Cascode Monolithic Integrated Circuit of a Low-Noise Amplifier in the Frequency Range of 8–12 GHz on a Gallium Nitride Nanoheterostructure, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 98–102.

DOI: 10.17587/nmst.22.98-102

References

1. Fedorov Yu. V., Bugaev A. S., Pavlov A. Yu. et al. Tekhnologiya izgotovleniya i razrabotka monolitnyh integral'nyh skhem na osnove nitrida galliya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 273–293 (in Russian).

2. Fedorov Yu. V., Mihajlovich S. V. Vliyanie parametrov nanogeterostruktur i tekhnologii izgotovleniya na shumovye

svojstva AlGaN/GaN HEMT, Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2014, no. 10, pp. 12–17 (in Russian).

3. **Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V.** Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya nitridnyh SVCH priborov millimetrovogo diapazona za rubezhom i v Rossii, *Integral*, 2013, no. 3, pp. 25–29 (in Russian).

4. Fedorov Yu. V., Mihajlovich S. V. Perspektivy zameny arsenidnyh MIS na nitridnye, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 217–226 (in Russian).

5. **Triquint TGA2612** 6–12 GHz GaN LNA. URL: https://www.qorvo.com/products/p/TGA2612. (Accessed: 16.11.2018).

6. United monolithic semiconductors CHA3666 6—17 GHz Low Noise Amplifier GaAs Monolithic Microwave IC. URL: http://www.richardsonrfpd.com/resources/RellDocuments/ SYS_24/CHA3666.pdf. (Accessed: 16.11.2018). 7. **Spravochnyj** list komplekta monolitnyh integral'nyh skhem na nitride galliya dlya diapazona 57–64 GGc serii 5411. URL: http://isvch.ru/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/list.pdf.

8. Fedorov Yu. V., Majtama M. V. Topologiya IMS "Integral'nyj maloshumyashchij usilitel' dlya diapazona chastot 8-12 GGc", Patent N 2016630103 (in Russian).

УДК 621.3.082.73

DOI: 10.17587/nmst.22.102-111

В. Г. Никифоров, канд. техн. наук, вед. науч. сотр, А. В. Дайнеко, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по науке, ddd@elpapiezo.ru, А. Л. Гриценко, канд. техн. наук, вед. инженер, ОА "НИИ "Элпа", г. Москва, Зеленоград

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Поступила в редакцию 11.12.2019

Статья посвящена генерации энергии на основе пьезоэффекта, а также дан обзор методов и технологий создания преобразователей для питания маломощных потребителей.

Ключевые слова: пьезогенераторы, пьезопреобразователи, источники питания, пьезоэффект

В последние годы получило новое развитие направление пьезоэлектрического приборостроения, связанное с созданием пьезоэлектрических преобразователей для генерации электрической энергии за счет использования механической энергии деформации, перемещения конструкций и движения транспортных средств и человека.

Конструкции пьезогенераторов

Внедрение новой технологии изготовления пленочных пьезоэлектрических элементов с толщиной от 5...100 мкм и реализации технологии автоматической сборки их в многослойные конструкции позволяют изготовить пьезоэлектрические генераторы с оптимальными параметрами, обеспечивающими согласование их импеданса с импедансом нагрузки и выходными напряжениями от 2...10 В до 240...300 В [1—4].

Конструкция пьезогенератора определяется конструкцией пьезоэлемента.

Пьезоэлементы, в которых направление поляризации совпадает с направлением механического усилия, используются при создании мощных пьезоэлектрических генераторов на напряжения от 100 до 300 В. Пьезоэлементы изгибного типа (биморфы), в которых направление поляризации перпендикулярно направлению деформации при вибрации, используют при создании мини-пьезоэлектрических генераторов на напряжения от 2 до 10 В.

Как правило, мощные пьезоэлектрические пьезогенераторы являются преобразователями механической энергии (с давлением не менее 1...2 кН/м) в электрическую энергию при циклическом нагружении, при этом переменное напряжение преобразуется с помощью мостовых выпрямителей в постоянное. Учитывая, что пьезопреобразователь работает в течение продолжительного времени, с относительно малой электрической энергией, производимой за один цикл, как правило, используется система накопления и хранения энергии (рис. 1). Для стабилизации выходного напряжения пьезогенератора на за-

Рис. 1. Структурная схема модуля питания

данном уровне используется система с обратной связью, специальный контроллер. Контроллер также обеспечивает согласование импеданса пьезогенератора с выходным импедансом потребителя энергии.

В работах [1—4] показана принципиальная возможность создания двух вариантов конструкции пьезоэлектрических генераторов в основном как источника зарядки аккумуляторных батарей на напряжение 2...10 В.

В последние годы начаты работы по созданию на основе многослойных монолитных конструкций пьезоэлементов мощных источников питания.

В работе [5] были проведены исследования и определены предельные параметры многослойных пьезоэлектрических генераторов на основе многослойных пьезоэлементов с габаритными размерами $6 \times 6 \times 2,7$ мм (число слоев 50, толщина слоя 50 мкм). Основные конструктивные и электрические их параметры приведены в работе [6, 7]. Целью исследования являлась разработка макетного образца автономного пьезоэлектрического источника питания на основе преобразования механической энергии движения поезда (число вагонов 10) в постоянное напряжение для подзарядки устройств питания радиомодуля, обеспечивающего его непрерывную работу в течение 2 ч, выходное напряжение 3...5 В, максимально развиваемое усилие $5 \cdot 10^7$ H/м², цикличность движения — один состав в час со средней скоростью 20 км/ч.

Было разработано два варианта конструкции макетных образцов многослойных пьезогенераторов:

 вариант 1 — пьезогенератор состоит из 13 многослойных элементов, соединенных механически последовательно, а электрически параллельно;

— вариант 2 — пьезогенератор состоит из одного слоя многослойных элементов, расположенных попарно на ситалловых подложках $48 \times 48 \times 0,5$ мм и соединенных электрически параллельно, сверху закрыт такой же ситалловой подложкой, число элементов в слое — 36 (6 линеек по 6 элементов).

Были проведены исследования электрофизических параметров пьезогенераторов на устройствах, позволяющих воспроизводить циклические нагружения пьезогенераторов, аналогичные воздействиям движущегося поезда на рельсы.

Следует отметить, что проведенный расчет деформаций рельсов от давления основного ва-

Рис. 2. Пьезогенератор

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема источника питания

гона поезда массой 60 т показал, что их значение менее 0,001 мкм и можно при расчете преобразования механической энергии в электрическую эти деформации не учитывать.

Исследования проводили в электрической схеме включения, приведенной на рис. 3.

Диод VD1 в этой схеме предотвращает утечки заряда обратно к пьезогенератору (ПГ), когда давление снижается. Диод VD2 обеспечивает разряд обратного напряжения, которое возникает на пьезогенераторе, когда давление спадает до нуля после переклички с генерированной энергией в накопителе — в данном случае в качестве накопителя использована емкость $C_{\rm H} = 40$ мкФ, $R_{\rm H} = 2 \cdot 10^7$ H/м². Время одного цикла нагружения и сброса нагрузки — не более 1 мин, общее число циклов — не менее 120.

Для многослойных пьезогенераторов наблюдается линейная зависимость напряжения и заряда от давления вплоть до предельных значений 2 · 10⁸ Па.

При давлении 10^7 H/м² пьезогенератор обеспечивает напряжение 7 В и значение заряда $70 \cdot 10^{-6}$ Кл энергию $21 \cdot 10^{-5}$ Дж.

Для конструкции варианта 2 напряжение равно 10 В, заряд — $180 \cdot 10^{-6}$ Кл, энергия — $75 \cdot 10^{-5}$ Дж.

Результаты исследований показали, что вариант конструкции 2 может обеспечить подзарядку аккумулятора радиопередатчика мощностью 10 Вт при увеличении площади сечения в 100 раз и увеличении цикла нагружения в течение 1 ч до 10 раз.

В работе [8] были рассмотрены предельные параметры конструкции многослойных пьезоэлектрических генераторов в качестве твердотельных батарей.

Показано, что для аналогичных элементов толщиной до 100 мкм предельные значения давления составляют $5 \cdot 10^8$ H/m². Удельное предельное значение запасенной энергии в пьезо-генераторе при давлении 10^8 H/m²: W/V = 0.25...0.3 Дж/см³, удельное значение заряда — $Q/S = (5...6) \cdot 10^{-2}$ Кл/м².

Проведенные исследования предельных параметров двух вариантов макетных образцов пьезогенераторов показали, что расчетные предельные соотношения с точностью ± 10 % совпадают с результатами эксперимента при давлении 10^7 H/м². Первый вариант конструкции обеспечивает заряд ~660 · 10^{-6} Кл, второй — $1760 \cdot 10^{-6}$ Кл и электрическая энергия равна $21 \cdot 10^{-3}$ и $77 \cdot 10^{-3}$ Дж соответственно.

Предельные параметры 10^8 H/м² для многослойных пьезоэлектрических конструкций соответствуют требованиям, обеспечивающим их надежную и долговечную работу (~ цикл до $2 \cdot 10^9$ импульсов), тогда как предел разрушения многослойной керамики достигает 10^9 H/м² и более.

С 2008 г. в Израиле начаты исследования и разработки мощных пьезогенераторов, преобразующих механическое давление транспортных средств (автомашины, поезда, самолеты) в электрическую энергию.

Созданная в 2008 г. Израильская компания INNOWATTECH (ENERGY HARVESTING SYSTEMS) занимается исследованиями и разработками пьезоэлектрических генераторов с системой сбора энергии [9]. Разрабатываются следующие варианты:

- для автомобильных дорог, преобразующих энергию давления автомобилей на полотно дороги в электрическую энергию;
- для железных дорог, преобразующих энергию давления движущегося железнодорожного транспорта на полотно железной дороги в электрическую энергию;
- для аэродромов, преобразующих энергию давления самолета при взлете и посадке на

взлетно-посадочную полосу в электрическую энергию.

Производство электрической энергии при преобразовании давления транспортных средств в электрическую энергию имеет ряд преимуществ:

- производство экологически чистой энергии;
- не требуется выделения дополнительных площадей;
- не наносится ущерб окружающей среде;
- не зависит от погодных условий.

При использовании для освещения дороги и электропитания светосигнальных дорожных транспортных устройств источник питания расположен непосредственно на трассе и не требует дополнительных электрических подводок.

Система позволяет передавать информацию в реальном масштабе времени о частоте и скорости потока автомобилей, грузоподъемности транспортных средств, а также расстояний между ними.

В октябре 2009 г. с участием фирмы MAATZ национальная израильская компания по строительству дорог, были проведены испытания образцов пьезогенераторов, установленных на скоростной дороге № 4 севернее Энекхера, протяженностью 10 и 100 м.

Пьезогенераторы были установлены под асфальтом на глубине 3 см. В полотно длиной 100 м было установлено 500 000 пьезоэлементов.

Конструкция и технология изготовления пьезоэлектрических генераторов типа I PEGTM с системой сбора С. С. защищены четырьмя международными патентами, данные в открытой печати не опубликованы. Результаты проведенных исследований позволили фирме INNOWATTECH приступить к разработке и реализации двух проектов.

С участием национальной компании "Израильские железные дороги" осуществляется пилотный проект: на опытном участке близ станции Лод устанавливают рельсы с вмонтированными в них пьезогенераторами. Проведенные предварительные расчеты показывают, что при интенсивном движении 10—20 поездов (с числом вагонов не менее 10) в час возможно получить до 20 кВт/ч.

В работе [13] приведены предварительные расчеты по созданию волновых электростанций с использованием преобразования механической энергии набегающих прибрежных волн в электрическую энергию. Предварительные расчетноэкспериментальные данные показали низкую эффективность преобразования пьезогенератора: линейка многослойных пьезогенераторов шириной 10 см, толщиной 5 см обеспечивает получение 8...10 Вт с одного метра при воздействии волны с частотой 0,2...0,25 Гц и высотой до 1 м.

Перспективным направлением является создание пьезоконвертора на основе применения многослойных пьезоэлементов для бытовых устройств, которые преобразуют усилие нажатия человека на кнопку в электрическую энергию. При давлении 1 H/cm^2 многослойный пьезоэлемент площадью 1 см² и толщиной 2...3 мм генерирует напряжение от 3 до 12 В, что достаточно для:

 передачи сигнала с пульта дистанционного управления для измерения и индикации результатов;

 передачи сигнала автомобильного брелка на охранную систему и систему сигнализации;

— дистанционного радио-звонка в коттедже. Один из производителей таких бытовых звонков, фирма "Carradon Fredland" отмечает, что выигрыш от применения пьезоконверторов состоит даже не в снижении стоимости батареек, а прежде всего в возможности герметизации всего устройства;

— безбатарейного устройства, настенного или мобильного, для включения и выключения освещения, которое может быть установлено в стену и не требует прокладки сетевой проводки, что создает дополнительные удобства для пользователей, повышает пожарную безопасность и позволяет экономить на строительно-монтажных работах по прокладке сетевых кабелей;

— использование в электронных замках, где с помощью пластиковой карточки при ее движении осуществляется передача энергии на микропроцессор, опознающий код карточки, и необходимой энергии для электромеханической блокировки замка.

Мини-пьезогенераторы

В одном из последних обзоров [11] приведены различные варианты создания пьезоэлектрических генераторов и наносистем для различных областей применения. Показана перспективность и применение изгибных пьезогенераторов в малогабаритных устройствах беспроводной электроники и устройствах коммуникации (телефоны сотовой связи, смартфоны), в бытовой электромеханике и электротехнике.

В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию информационно-измерительных

и управляющих систем, способных принимать и идентифицировать электромагнитные сигналы от беспроводных микромощных датчиков, встроенных в различные конструкции сетей передачи информации, расположенные в любых, в том числе и труднодоступных местах, где возможности централизованного питания ограничены. Большое число элементов в таких информационных беспроводных сетях практически исключает возможность длительного, многолетнего поддержания их работоспособности путем регулярной или выборочной замены источника питания. Достижения в области создания маломощных СБИС наряду с низкими коэффициентами заполнения беспроводных датчиков уменьшают требования к питанию до диапазона десятков и сотен микроватт. Связанная с этим низкая потребляемая мощность открывает возможность обеспечения питанием сенсорных узлов посредством извлечения энергии из окружающей среды, устраняя необходимость в батареях и увеличивая срок службы до бесконечности. Ниже, в табл. 1 проведено сравнение источников извлечения энергии и источников фиксированной энергии (батарей).

Данные таблицы показывают, что батареи являются приемлемым вариантом при коротких сроках службы. Для длительных сроков службы требуется другое решение. Солнечные элементы обеспечивают превосходную плотность энергии при прямом солнечном свете. Однако практически исключают выработку энергии в закрытых помещениях и зависят от погодных условий.

Решение данного вопроса возможно при генерации электрической энергии непосредствен-

таолица т	Таблица	1
-----------	---------	---

Источники извлече- ния энергии	Плотность энер- гии (мкВт/см ³) при годовом сроке службы	Плотность энер- гии (мкВт/см ³) при 10-летнем сроке службы
Солнечная энергия (внешняя среда)	15 000— прямые солнечные лучи, 150— пасмурный день	15 000— прямые солнечные лучи, 150— пасмурный день
Солнечная энергия	6	6
Вибрации (пьезо- электрическое преоб-	250	250
Вибрации (электро- статическое преобра-	50	50
Батареи (литиевые	45	3,5
без перезарядки) Батареи (литиевые с перезарядкой)	7	0

Таблица 🛛

Источник вибраций	Уско- рение, м/с ²	Частота основ- ной моды колебаний, Гц
Отсек двигателя автомобиля	12	200
Основание трехосного станка	10	70
Корпус смесителя	6,4	121
Сушка белья	3,5	121
Приборная доска автомобиля	3	13
Небольшая СВЧ печь	2,5	121
Компакт-диск портативного ком-	0,6	75
пьютера		
Микровибрации зданий и соору- жений	0,2	30100

но на месте расположения электронного маломощного устройства из энергии окружающей среды.

В последние годы появились первые публикации, посвященные генерации электрической энергии из энергии окружающей среды. Этот метод получил название "энергетическая очистка" (*energy harvesting*), так как собирается неиспользованная энергия окружающей среды.

Энергетическая очистка является одним из перспективных направлений, конечной задачей которого является обеспечение практически неограниченной продолжительности работы маломощного электронного устройства.

В табл. 2 приведена информация об источниках вибрации.

Механизмы преобразования

Существуют три основных механизма преобразования вибраций в электрическую энергию: электромагнитный, электростатический и пьезоэлектрический. В первом случае относительное перемещение между катушкой и магнитным полем вызывает протекание тока в катушке. Электростатический генератор состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком, которые перемещаются относительно друг друга. При перемещении проводников энергия, хранящаяся в конденсаторе, меняется, обеспечивая таким образом механизм преобразования механической энергии в электрическую. Наконец, происходит преобразование механической энергии в электрическую на основе пьезоэффекта в пьезокерамическом материале.

В табл. 3 приведено качественное сравнение особенностей указанных трех механизмов преобразования.

Из анализа данных табл. 3 следует, что наиболее перспективным является прямое преобразование механической энергии колебаний в электрическую, осуществляемое пьезокерамическим преобразователем. В качестве основного элемента преобразователя используются пьезоэлектрические датчики. Прямое преобразование механических колебаний конструкции в электрическую энергию будет наиболее эффективно при использовании гибких пьезоэлектрических датчиков — пьезобиморфов [1—4].

Принципиальная конструкция пьезоэлектрического микропреобразователя на основе пьезобиморфа приведена на рис. 4.

В ряде работ [12—14] были проведены расчеты и оптимизация основных параметров конструкции пьезобиморфа (рис. 4), а также предельные ограничения, обусловленные механической прочностью конструкции из пьезокерамического материала. Результаты приведены в табл. 4.

В работе [19] описана оптимизация конструкций, изготовленных из пьезоэлектрических материалов: PZT, который является керамикой и PVDF, который является полимером. Оптимальные параметры конструкции для двух различных материалов с прокладкой и без представлены в табл. 5.

Значения входной вибрации были получены в малой СВЧ печи на частоте 120 Гц. При моде-

Таблица 3	3
-----------	---

Механизм	Достоинства	Недостатки
Пьезоэлек- трический	Не требуется источ- ник напряжения Выходное напряже- ние 38 В	Затруднена интегра- ция в микросхемы
Электроста- тический	Простота интегриро- вания в микросхемы	Необходим отдель- ный источник напря- жения
Электромаг- нитный	Не требуется источ- ник напряжения	Выходное напряжение 0,10,2 В

Таблица 4

Пере- менная	Описание	Ограничения		
Габаритные размеры статической массы М				
l_m	Длина	h _m < 5 мм		
ĥ _m	Высота	$(l_m + l_b)w_b < 1 \text{ cm}^2$		
w _m	Ширина	$(l_m^m + l_b)w_b^2 < 1 \text{ cm}^2$		
Конструктивные параметры пьезобиморфа				
l_b	Длина балки	$l_{e} - l_{m} < 0$		
w _b	Ширина балки			
l _e	Длина электрода			
t_n	Толщина пъезокерамического			
P	слоя			
t _{sh}	Толщина стальной шайбы			
R _{load}	Сопротивление нагрузки			

Рис. 4. Принципиальная конструкция микропреобразователя на основе пьезобиморфа

Рис. 5. Схема извлечения энергии

лировании для PZT использовали коэффициент пьезоэлектрической связи (k_{31}) , равный 0,12, основанный на измерениях биморфа со стальной центральной прокладкой. Для PVDF использовали коэффициент связи, равный 0,08. Следует отметить, что использование оптимальных параметров PZT биморфа привело к реализации очень длинного тонкого прибора. В зависимости от применения дополнительные индивидуальные ограничения могут быть внесены по общей длине и ширине прибора. Моделирование и эксперимент показали наилучшее значение выходной мощности, равное приблизительно 250 мкВт. Выполненный анализ показал, что пьезоэлектрические преобразователи способны осуществлять бо́льшую мощность на единицу объема, чем емкостные преобразователи. Пьезоэлектрические преобразователи также более предпочтительны, поскольку они не требуют отдельного источника питания, и выходное напряжение рассматриваемых источников вибрации было в диапазоне 3...10 B.

В настоящее время реализуется Европейский исследовательский проект VIBES. Головной является фирма *Philips*, куда входят также государственные исследовательские лаборатории: TIMA,

Tyndall, University of Southhampton и FEMTO-ST и малые фирмы MEMSCAP и METRAVIB [15].

Целью проекта является разработка и демонстрация микромощного генератора, способного использовать вибрации и перемещения из окружающей среды (здания, машины, человеческое тело). Этот прибор будет производить электрическую энергию (в диапазоне мкВт) для обеспечения питанием автономных микросистем. Такая микросистема включает маломощный контроллер, маломощный модуль ВЧ связи, несколько MEMS-датчиков и микробатарею для хранения энергии. Был сконструирован и изготовлен образец микромощного микрогенератора (рис. 5).

Прибор состоит из сейсмической массы, изготовленной из куба кремния, подсоединенного к подложке посредством гибкого кантилевера. Во время движения кантилевер испытывает нагрузку при сжатии и растяжении на верхней и нижней поверхностях. Пьезоэлектрический слой, расположенный в верхней части кантилевера, подвергается нагрузке и, как следствие, некоторый электрический заряд появляется на поверхности. Этот заряд собирается металлическими электродами и подается на электрическую нагрузку или схему накопления энергии. Прибор изготовлен с использованием MEMS-технологии в кооперации с фирмой MEMSCAP.

В процессе используется глубокое реактивное ионное травление обеих сторон со структурой кремний-на-изоляторе. Пьезоэлектрический слой был изготовлен из нитрида алюминия и в ближайшем будущем будет заменен на более толстый слой РZT. Модуль управления питанием предназначен для передачи энергии, производимой микромощным генератором, в модуль хранения энергии, например, микробатарею. Для

				таолица з
Пара	PZT		PVDF	
метры	без про- кладки	с проклад- кой	без про- кладки	с проклад- кой
<i>l_m</i> , см	1,71	1,73	0,32	0,5
<i>h_m</i> , см	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>w_m</i> , см	0,3	0,3	1,87	1,32
l_b , см	1,62	1,6	0,21	0,25
<i>w_b</i> , см	0,3	0,3	1,87	1,32
l_{e} , см	1,62	1,6	0,21	0,25
t_p , MKM	365	267	75,6	42,9
t_{sh} , мкм	0	182	0	135
<i>R_{load}</i> , кОм	355	264,5	6725	4825
V_r , B	13,1	12,1	50	50
<i>P_{out}</i> , мкВт	242	277	186	260

Рис. 6. Схема архитектуры автономной микросистемы

зарядки батареи требуется стабильный источник напряжения на постоянном токе со специфичным напряжением, зависящим от характеристик батареи. Вместе с тем сигнал, поступающий от генератора, по сути дела на переменном токе, и напряжение очень низкое (<100 мВ). Следовательно, требуются операции по некоторому выпрямлению и повышению напряжения. Более того, эти операции необходимо выполнять с наивысшей эффективностью, а схема должна иметь очень малую потребляемую мощность. На рис. 6 приведена структурная схема модуля управления питанием. Схема извлечения энергии состоит из схемы AC/DC для выпрямления напряжения и схемы DC/DC для повышения напряжения. Схемой DC/DC управляет цифровой контроллер, так как она является активной схемой, которая адаптируется в зависимости от поступающего электрического сигнала (и его частоты) в целях обеспечения максимальной передачи энергии и выполнения зарядки батареи с наивысшей эффективностью. Как и ожидалось, генерируемая мощность является функцией амплитуды перемещения. Было установлено оптимальное значение нагрузочного сопротивления — 333 кОм, необходимое для выделения максимальной мощности с вибрирующей балки. Максимальная генерируемая мощность для амплитуды перемещения в 0,9 мм составила около 2 мкВт. Максимальное генерируемое напряжение равно ~1,2 В.

На фирме Sandia [16] выполняются работы по созданию ключевых компонентов безбатарейной микросенсорной системы, в которой осуществляется преобразование механической энергии от незначительных вибраций структур в электрическую энергию, которая приводит в действие систему. Пьезоэлектрический материал крепят к балке (кантилеверу). Всякий раз под воздействием нагрузки (например, когда высокое здание раскачивается от ветра или грузовик проходит по мосту) пьезоэлектрическая керамика генерирует небольшой заряд, всего 100 мкКл, который временно хранится в накопительном банке системы. Этого хранимого заряда достаточно для питания микросенсорной системы на долю секунды, что достаточно для осуществления простого считывания. Далее, если механическое напряжение в пьезоэлектрике превысит установленный порог,

может произойти сбой в структуре, например, маломощный микропроцессор может включиться. Сенсор выполнит измерение и передаст результат считывания на ВЧ тэг флэш-памяти и будет осуществлен быстрый перевод микропроцессора в спящий режим.

Специалисты Sandia продемонстрировали систему, которая обеспечивает питание микропроцессора, генерируемое от вибраций, и продемонстрировали метод хранения и поиска данных. Показан только метод мониторинга критической инфраструктуры. Законченный прибор должен обеспечивать тепловые измерения, измерение механической нагрузки, измерения отклонения растяжения и получение другой информации, которая может храниться в базе данных и быть считана немедленно в случае, например, организации эвакуации из высокого здания. Это позволило бы решить задачу мониторинга высоких зданий, мостов, дамб, туннелей и других инфраструктур.

В работе [14] приведены результаты исследования по созданию микропьезоэлектрического генератора мощностью 375 мкВт, обеспечивающего работу радиопередатчика на частоте 1,9 ГГц при рабочем цикле 1,6 %. В беспроводных системах прием—передача сигнала осуществляется в короткий период времени, затем система переходит в режим ожидания, где практически нет энергопотребления. Типичный рабочий цикл передачи 1...2 %, режим ожидания 98...99 %.

Массовое применение микропьезогенераторов в настоящее время нашло в системе питания TPMS — система измерения давления в автомобильных шинах, разработка [17] фирмы Morgen Electroceramics LTD (Англия).

Другие возможные применения генератора для извлечения энергии касаются бытовых электронных изделий, таких как мобильные телефо-

Габлица б

Генерируе- мая механи- ческая энер- гия, Вт	Электрическая энергия, Вт	Электрическая энергия, затра- чиваемая на движение, Дж
0,83	0,0910,42	0,52,5
3,0	0,331,5	1,56,7
(6,919,0) ×	(0,762,1) ×	(143266) ×
$\times 10^{-3}$	× 10 ⁻³ мВт	$\times 10^{-6}$
67,0	5,0	8,314,0
	Генерируе- мая механи- ческая энер- гия, Вт 0,83 3,0 (6,919,0) × × 10 ⁻³ 67,0	Генерируе- мая механи- ческая энер- гия, ВтЭлектрическая энергия, Вт0,83 3,00,0910,42 0,331,5(6,919,0) × (67,0)(0,762,1) × × 10 ⁻³ мВт 5,0

ны, mp3-проигрыватели, цифровые камеры, которые могут получать энергию от движения человека.

В табл. 6 приведены данные ожидаемого уровня электрической энергии от движения человеческого тела, имеется в виду преобразование механической энергии в электрическую.

Как видно из вышеприведенной таблицы, наибольшие значения электрической энергии связаны с ходьбой, а именно с обувью.

Из сравнения генерируемой и потребляемой энергии очевидно, что источники питания, связанные с ходьбой или дыханием, могут быть использованы в любом носимом приборе.

Пьезоэлектрические генераторы, основанные на движении верхних конечностей, в перспективе в состоянии обеспечивать питание устройств GSM и Bluetooth с низким энергопотреблением.

Некоторые примеры пьезоэлектрических генераторов, связанных с движением человека

В МІТ также была выполнена простая интеграция пьезоэлектрических элементов под стандартной съемной стелькой кед [18, 19]. Энергия извлекается при давлении пятки посредством расплющивания двух элементов, изготовленных

из двух униморфов Thunder PZT/пружинная сталь, и от разжатия пальцев посредством изгиба биморфной пластины, изготовленной из 16 пьезоэлектрических слоев. Ввиду ограниченной эффективности электромеханического преобразования среднее значение извлекаемой энергии оказалось небольшим (8,3 мВт на пятке и 1,3 мВт на пальцах во время средней ходьбы). Тем не менее она производила достаточную энергию для передачи 12-разрядного ID кода с помощью портативного передатчика в локальную сеть.

Перспективные исследования и разработки проводит фирма *Куосега* (Япония) в области создания альтернативного источника энергии пьезогенератора для заряда встроенного аккумулятора перспективного мобильного телефона *Eos* при движении человека [20].

Фирма Nissan Electric (Япония) разработала и выпускает [21] модуль питания на основе пьезобиморфа, который вырабатывает энергию при ходьбе человека (мощность ≥20 мВт).

Новый кардиостимулятор с автономным питанием (30 мкВт) был установлен во время эксперимента на животных командой *Pi-Harvest* 31 января 2016 г. В настоящее время (по состоянию на 06 марта 2016 г.) в процессе непрерывного наблюдения кардиостимулятор функционирует нормально. Электрокардиостимулятор и электростанция *Pi-Harvest* показывают стабильную работу по питанию кардиостимулятора [26] (рис. 7).

Фирма *EnOcean* сообщает о разработке безбатарейного радиовыключателя освещения [22].

В работе [23] приведены расчеты и оптимизация пьезогенератора для генерации энергии питания имплантируемого протеза ТКR с мощностью до 225 мкВт (мощность потребления системы питания микроконтроллера протеза ТКР PIC161E872 — 50 мкВт).

Рис. 7. Рентгеновский снимок установленной системы питания (а), биморфы, установленные в генераторе (б), генератор (в)

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 22, № 2, 2020 -

В работах [24, 25] приведены результаты исследований пьезогенератора, имплантируемого в протез колена человека для стимуляции роста костной ткани (мощность до 250 мкВт).

В Великобритании фирма Facility Architects совместно с фирмой Scott Wilson реализует проект Pacesetters по преобразованию механической энергии движения, давления и вибрации пассажиров на вокзале Виктория (за час проходят 34 млн человек) в источник электрической энергии. Авторы проекта полагают, что система может получить от каждого проходящего человека 3...4 Вт. Аналогичный проект реализует Японская железнодорожная компания JR-East совместно со специалистами университета Кеіо (Кеіо University), в котором генерируется электричество от пассажиров, проходящих через турникет. Кроме того, система используется для подсчета пассажиров. Эксперимент показал, что на вокзале в регионе Сибуя в течение 6 ч работы система вырабатывает 1 Вт/ч.

Английская компания *Pavegen Systems Ltd.* разработала пьезогенератор *Pavegen*, который преобразует вибрацию с давления шага человека в электрическую энергию (при деформации на 5 мм вырабатывает 2,1 Вт).

Плата-генератор изготовлена из нержавеющей стали, покрытой резиной. Внешний корпус генератора изготовлен из литого алюминия. Получаемая энергия накапливается в литьевых полимерных аккумуляторных батареях.

Получаемая энергия может быть использована для снабжения электроэнергией осветительных приборов. Пять таких генераторов, установленных на оживленном участке тротуара, могут снабдить энергией освещения автобусную остановку на всю ночь. По подсчетам экономистов срок окупаемости этого устройства составляет около года, в то время как заявленный ресурс — 5 лет, или 20 млн шагов.

Список литературы

1. **Waanders J. W.** Piezoelectric Ceramics – Properties and Applications. Endhoven: Philips Components, 1991. P. 4–91.

2. **Пьезоэлектрическая** керамика. Принципы. Применение. Минск: ООО ФУ Аинформ, 2003.

3. Сафронов А. Я., Климашин В. М., Никифоров В. Г., Парфенов Б. Г., Ярошевич В. А. Пьезокерамические пакеты и многоблочные актюаторы // Компоненты и технологии. 2002. № 6. С. 26–28.

4. Никифоров В., Климашин В., Сафронов А. Биморфные пьезоэлектрические элементы: актюаторы и датчики // Компоненты и технологии. 2003. № 4. С. 46—48. 5. Разработка макетного образца автономного пьезоэлектрического источника питания. Научно-технический отчет. Сайт компании. Москва, ОАО "НИИ "Элпа", 2007.

6. Казаков В., Климашин В., Никифоров В., Сафронов А., Чернов В. Многослойные пьезоэлектрические пьезоактюаторы и особенности их применения // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 62—65.

7. Казаков В. К., Никифоров В. Г., Сафронов А. Я., Чернов В. А. Актюаторы для оптических затворов и методы измерения их характеристик // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 52—55.

8. Никифоров В. Г., Чернов В. А. Предельные параметры твердотельных многослойных пьезоэлектрических батарей // Материалы VI Международной научнотехнической конференции "Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий". 22—26 сентября 2008 г., Анапа. С. 131—140.

9. **INNOWATECH** (ENERGY HARVESTING SYS-TEMS). URL: www.innowattech.com.

10. Taylor C. W., Burns J. R., Kammann S. M., Powers W. B., Welsh T. R. The energy harvesting eee. A small subsurface ocean/river power generator // IEEE Journal of Ocean. Engineering. Oct. 2001. Vol. 26, N. 4. P. 539–547.

11. **Акопьян В., Ларинов И., Истомин И.** Пьезогенераторы — новое перспективное направление малой энергетики // Наука и техника. 2011. № 12. С. 1—7.

12. Ottemann G. K., Hofmann H. F., Lesieuture G. A. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using stepdown converter in discontinuous conduction mode // IEEE Trans. Power Electron. 2003. Vol. 18. P. 696–703.

13. Roundy S., Wiight P. K., Rabaey J. A Study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // Comput. Conmen. 2003. Vol. 26. P. 1131–1144.

14. Roundy S., Wright P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics // Smart materials and structures. Oct., 2004. Vol. 13, N. 15. P. 1131–1142.

15. **Energy** harvesting. Project. www.hni.uni-paderborn.de/projekte/project_e.php3?id = 345

16. **German J.** Vibration-powered sensor harvests structural shakes, stores data for later readout. www.sandia.gov/Lab-News/LN04-19-02/key04-19-02_stores.html.

17. Morgan Electroceramics LTD. Сайт фирмы. URL: www.morganelectroceramics.com

18. **Kymissis J., Kendall C., Paradiso J. J., Gershenfeld N.** Parasitic power harvesting in shoes // Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Werable Computing, Los Alanitos, CA, aug. 1998. P. 132–139.

19. Shenck N. S., Paradiso J. A. Energy scavending with shoe-mounted piezoelectric // IEEE Micro. May—Jun. 2001. Vol. 21, N. 3. P. 30–42.

20. Куосега. Сайт компании. URL: www.kyocera.com

21. Nissan Electric LTD. Сайт компании. URL: www.nissanelectric.co.jp

22. EnOcean. Сайт фирмы. URL: www.enocean.com

23. **Platt S. R., Farritor S., Haider H.** // IEE/AASME Transaction on mechatronics. April 2005. Vol. 10, N. 2.

24. **McDowell C. S.** Implanted Bone stimulator and prosthesis system and method of enhancing bone growth. US Patent 6.143.035 nov. 7, 2000.

25. **Platt S. R.** Electric power generation within orthopedic implants using piezoelectric ceramics. Masters thesis. Dept MechEngUniv. Nebraska — Lincoln 2003.

26. http://pi-harvest.com/animal_experiments.html#! prettyPhoto

V. G. Nikiforov, Ph. D., Leading Researcher, A. V. Dayneko, Ph. D., Deputy Director, ddd@elpapiezo.ru, A. L. Gritsenko, Ph. D., Leading Engineer, JSC "Research Institute "Elpa", Moscow, Zelenograd 124460, Russian Federation

Corresponding author:

Dayneko Andrey V., Ph. D., Deputy Director, JSC "Research Institute "Elpa", Moscow, Zelenograd 124460, Russian Federation, e-mail: ddd@elpapiezo.ru

State and Prospects of Development of Piezoelectric Generators

Received on December 11, 2019 Accepted on December 17, 2019

Article is devoted to the generation of energy based on the piezoelectric effect as well as the review of methods and technologies for creating converters for low-power consumers.

Keywords: piezogenerators, piezo converters, power supplies, piezoelectric effect

For citation:

Nikiforov V. G., Dayneko A. V., Gritsenko A. L. State and Prospects of Development of Piezoelectric Generators, *Nanoi mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 102–111.

DOI: 10.17587/nmst.22.102-111

References

1. Waanders J. W. Piezoelectric Ceramics – Properties and Applications. Endhoven, Philips Components, 1991, pp. 4–91.

2. **P'ezoelektricheskaya** keramika. Principy. Primenenie. Minsk, FU Ainform, 2003 (in Russian).

3. Safronov A. Ya., Klimashin V. M., Nikiforov V. G., Parfenov B. G., Yaroshevich V. A. P'ezokeramicheskie pakety i mnogoblochnye aktyuatory, *Komponenty i tekhnologii*, 2002, no. 6, pp. 26–28 (in Russian).

4. Nikiforov V. G., Klimashin V. M., Safronov A. Ya. Bimorfnye p'ezoelektricheskie elementy: aktyuatory i datchiki, Komponenty i tekhnologii, 2003, no. 4, pp. 46–48 (in Russian).

5. **Nauchno-tekhnicheskij** otchet "Razrabotka maketnogo obrazca avtonomnogo p'ezoelektricheskogo istochnika pitaniya", OAO "NII "Elpa", Moscow, 2007 (in Russian).

6. Kazakov V., Klimashin V., Nikiforov V., Safronov A., Chernov V. Mnogoslojnye p'ezoelektricheskie p'ezoaktyuatory i osobennosti ih primeneniya, *Komponenty i tekhnologii*, 2007, no. 6, pp. 62–65 (in Russian).

7. Kazakov V. K., Nikiforov V. G., Safronov A. Ya., CHernov V. A. Aktyuatory dlya opticheskih zatvorov i metody izmereniya ih harakteristik, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 10, pp. 52–55 (in Russian).

8. Nikiforov V. G., Chernov B. A. Predel'nye parametry tverdotel'nyh mnogoslojnyh p'ezoelektricheskih batarej, *Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* "Innovacionnye processy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya i nanotekhnologij", 22–26 September, 2008, Anapa, 20018, pp. 131–140 (in Russian).

9. **INNOWATECH** (ENERGY HARVESTING SYS-TEMS), available at: www.innowattech.com.

10. **Taylor C. W., Burns J. R., Kammann S. M., Powers W. B., Welsh T. R.** The energy harvesting eee, A small subsurface ocean/river power generator, IEEE Journal of Ocean. Engineering, 2001, vol. 26, no. 4, pp. 539–547.

11. Akop'yan V., Larinov I., Istomin I. P'ezogeneratory – novoe perspektivnoe napravlenie maloj energetiki, *Nauka i tekhnika*, 2011, no. 12, pp. 1–7 (in Russian).

12. Ottemann G. K., Hofmann H. F., Lesieuture G. A. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using stepdown converter in discontinuous conduction mode, *IEEE Trans. Power Electron*, 2003, vol. 18, pp. 696–703.

13. Roundy S., Wiight P. K., Rabaey J. A Study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Comput. Conmen.*, 2003, vol. 26, pp. 1131–1144.

14. Roundy S., Wright P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, *Smart materials and structures*, 2004, vol. 13, pp. 1131–1142.

15. **Energy** harvesting. Project, available at: www.hni.unipaderborn.de/projekte/project_e.php3?id = 345

16. **German J**. Vibration-powered sensor harvests structural shakes, stores data for later, available at: readout. www.sandia.gov/LabNews/LN04-19-02/key04-19-02 stores.html.

17. **Morgan** Electroceramics LTD, available at: www.morganelectroceramics.com

18. **Kymissis J., Kendall C., Paradiso J. J., Gershenfeld N.** Parasitic power harvesting in shoes, *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Werable Computing Los Alanitos, CA*, Aug. 1998, pp. 132–139.

19. Shenck N. S., Paradiso J. A. Energy scavending with shoe-mounted piezoelectric, *IEEE Micro*, 2001, vol. 21, no. 3, pp. 30–42.

20. Kyocera, available at: www.kyocera.com

21. Nissan Electric LTD, available at: www.nissanelec-tric.co.jp

22. EnOcean, available at: www.enocean.com

23. Platt S. R., Farritor S., Haider H., On low-frequency electric power generation with PZT ceramics, *IEE/AASME Transaction on mechatronics*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 240–252.

24. **McDowell C. S.** Implanted Bone stimulator and prosthesis system and method of enhancing bone growth US Patent 6.143.035 nov. 7, 2000.

25. **Platt S. R.** Electric power generation within orthopedic implants using piezoelectric ceramics. Masters thesis. Dept MechEngUniv. Nebraska — Lincoln 2003.

26. **Π-harvests**, available at: http://pi-harvest.com/ animal_experiments.html#!prettyPhoto

*Б*иоэлектроника Bioelectronics

УДК 621.382 + 612 + 159.922 + 004.8

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, 220013, Республика Беларусь, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СВЕРХРАЗУМА. ЧАСТЬ II

Поступила в редакцию 08.11.2019

DOI: 10.17587/nmst.22.112-120

Оценены перспективы и проблемы создания сверхразума. Методологической основой рассмотрения являются предложенные ранее полная электронная интерпретация функционирования мозга и теория сознания человека. В части II работы рассмотрены перспективы и проблемы создания сверхразума в рамках выделенного гибридного направления его разработки. Проанализированы угрозы для человечества, которые могут возникнуть в случае появления сверхразума.

Ключевые слова: сверхразум, мозг, полная электронная интерпретация, сознание человека, наноэлектроника, математическое моделирование, искусственный интеллект

Гибридное направление

В этом направлении используются компоненты как материалистического, так и идеалистического направлений. Проще говоря, реально оно, как правило, основано на применении электронного аппаратного обеспечения (hardware) и программного обеспечения (software). Очевидно, что здесь может быть большое число различных вариантов (сочетаний), поэтому далее кратко рассмотрим лишь обозначившиеся, основные. В последнее время также выделяется путь создания интерфейсов "человек — машина" или "человек компьютер", который может быть отнесен к wetware*. Нетрудно заметить, что идеалистическое направление [1], связанное с моделированием, также, строго говоря, относится к гибридному направлению, так как требует использования для своей реализации компьютеров, т. е. материалистической составляющей.

Об особой перспективности гибридного направления свидетельствует хотя бы то, что в его рамках, как обосновано считает ряд специалистов, сверхразум уже создан — это Вы вместе с интернетом. Сюда же можно отнести и коллективный разум человечества и некоторые другие варианты коллективного разума. Однако, конечно же, хотелось бы чтобы это были не некоторые распределенные системы, а все же реализация искусственного интеллекта человеческого уровня (ИИЧУ) и сверхразума была осуществлена в одном устройстве, желательно компактном, во всяком случае не "монстре" (см. [1]).

В настоящее время одним из наиболее перспективных считается метод обратного проектирования (разработки) мозга (не следует путать с полной эмуляцией мозга, см. [1]). В этом случае искусственный интеллект (ИИ) строится по образу человеческого мозга, как правило, с использованием как аппаратных компонентов, так и программного обеспечения. Иногда возможный результат этого пути образно называется "кремниевым интеллектом", "кремниевым сознанием", так как аппаратная часть реализуется на кремниевых ИС. Основная проблема здесь заключается в том, что в настоящее время мы не разобрались как следует в том, как функционирует мозг человека. Поэтому полная реализация этого метода (тут также может быть ряд вариантов), к сожалению, пока еще не достигнута. И здесь автор видит определенные перспективы для использования разработанных теории сознания и комплексного иерархического подхода исследования мозга [2-10] в качестве основы для построения таких систем.

^{*} Слэнг wetware имеет много толкований. Наиболее простое и удачное — это смесь software, hardware и биологии.

К наиболее известным глобальным программам, в рамках которых предполагается использовать этот метод для построения подобных систем, следует отнести [11, 12]: BRAIN Initiative (США), Human Brain Project (НВР, ЕС). В рамках BRAIN Initiative это, прежде всего, проект коннектома человека [13], а в рамках НВР нейрокибернетический подход, в котором будет осуществлено создание модели человеческого мозга на транзисторах (поведение нейронов имитируется с помощью транзисторов) с привлечением суперкомпьютеров [14]. Предполагается, что разработка будет вестись по пути от простого мозга к более сложному, а именно: мыши, крысы, кролика и кошки. Недостатки этих проектов рассматривались в работе [12].

О грандиозности задачи в этом случае свидетельствуют следующие данные. Так, в одном из проектов под руководством доктора Д. Модхи (IBM) с использованием компьютера Blue Gene компании IBM с производительностью более 10¹⁵ флопс, удалось смоделировать всего лишь 4,5 % нейронов и синапсов человеческого мозга [11]. "Чтобы начать хотя бы частичное моделирование человеческого мозга, потребуется 880 000 процессоров... Он говорит об использовании не одного компьютера Blue Gene, а о тысячи таких компьютеров, которые займут не комнату, а целый городской квартал. Потребление энергии при этом было бы так велико, что для ее производства потребовалась бы атомная станция на 1000 МВт. А затем пришлось бы повернуть реку и пропустить ее сквозь схемы компьютера, чтобы отвести лишнее тепло и не дать им расплавиться" [11]. При этом замечу, что модель воспроизводит только таламокортикальную систему, а не весь мозг человека.

Как отмечалось в работе [12], столь же пессимистически настроен и другой руководитель проекта по методу обратного проектирования, в частности коннектома человека, профессор С. Сеунг. Его пессимизм в основном связан со сложностью завершения проекта ввиду грандиозного объема полной информации в коннектоме человека, оцениваемом в 10²⁰ байт.

Более оптимистически настроен руководитель другого совместного с IBM проекта, также реализующего метод обратного проектирования мозга в рамках HBP, — профессор Г. Маркрам (Швейцария). "Ключом к проекту Blue Brain доктора Маркрама служит так называемая "колонка неокортекса" — модуль, многократно повторяющийся в ткани мозга... Доктору Маркраму потребовалось десять лет (с 1995 по 2005 г.), чтобы составить карту нейронов в такой колонке и разобраться, как она работает. Когда расшифровка была закончена, он пришел в IBM, чтобы виртуально "размножить" полученную структуру... В 2009 на конференции TED он заявил, что может завершить проект за десять лет. (Скорее всего, он говорил об "урезанном" варианте человеческого мозга без всякой связи с другими отделами и органами чувств)" [11]. В своей работе он также использовал компьютер Blue Gene.

Убедительное и краткое резюме по этим работам сделано в монографии [11]: "Ученые, посвятившие свою жизнь обратной разработке мозга, понимают, что им предстоят десятки лет тяжелой работы. Но они убеждены, что их работа принесет практическую пользу. Они считают, что даже частичные ее результаты помогут раскрыть тайны психических расстройств, причиняющих людям страдания на протяжении всей истории человечества". И тем не менее. "Обратная разработка — это самое простое; после начинаются сложности — ведь нужно разобраться во всей этой информации" [11].

Перспективу здесь автор видит в разработке специальных методов (в том числе систем ИИ) автоматической иерархической обработки гигантских объемов информации. Это может быть, в частности, реализовано в рамках предложенного комплексного иерархического подхода исследования мозга, основанного на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами [2, 3, 6]. Другими словами, разработка методов анализа в целях имитации мозга и обработки информации должна осуществляться взаимосвязано, образно говоря, навстречу друг другу.

Среди других интересных исследований, прежде всего, отмечу SyNAPSE — программу DARPA (Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США) по финансированию создания систем нейроморфной адаптивной гибкомасштабируемой электроники по методу обратного проектирования мозга. Основная цель — создание электронных систем, имитирующих основные функции мозга млекопитающих. Участниками этой программы являются IBM, HRL Laboratories и ряд университетов.

По имеющейся информации [15] в результате выполнения проекта группой под руководством Д. Модхи создан "когнитивный компьютер" из тысяч соединенных параллельно кристаллов наноэлектронных ИС, который имитирует работу 30 млрд нейронов и 100 трлн синапсов человеческого мозга, с быстродействием около 10¹⁵ флопс. "По утверждению IBM, интеллект SyNAPSE в значительной мере будет совершенствоваться на основе его взаимодействия с окружающим миром" [15].

Подобная система Neurogrid разработана группой специалистов в Стэнфордском университете. Это нейроморфная система для имитации нейронных модулей в реальном масштабе времени. Она позволяет моделировать миллион нейронов с миллионами синаптических связей, причем электронное устройство потребляет всего лишь 3 Вт энергии [16]. К другим подобным проектам можно отнести: SpiNNaker, HICANN. Замечу, что во всех этих четырех проектах используются различные архитектурные решения с применением отличающихся ИС.

Отмечу также другие финансируемые DARPA проекты — это CALO, NELL, а также в целом программа DARPA "Когнитивные вычислительные системы" с очень серьезными и амбициозными целями [15], ведущими, в сущности, в конечном итоге к созданию ИИЧУ.

Несмотря на колоссальные сложности, автор считает метод обратного проектирования мозга перспективным направлением создания ИИЧУ.

В то же время ряд специалистов (в основном компьютерщики) считает, что метод обратного проектирования мозга является затратным и можно попытаться создать более оптимальное устройство, чем мозг человека, т. е. без более или менее точного подражания ему. По мнению автора, провести подобную супероптимизацию, сделанную Природой, будет невероятно сложно, если ни невозможно [1]. Одним из таких проектов является Open Cog Б. Герцеля. В частности, предполагается, что когнитивная архитектура Ореп Сод Prime позволит создать ИИЧУ, и в конечном итоге — сверхразум. В основе концепции открытого проекта Ореп Сод лежит "то, что разум основан на высокоуровневом распознавании образов... Отдельные модули Open Cog будут выполнять такие функции, как восприятие, внимание и память. Делается это с помощью сложных, но индивидуально настроенных программных комплексов, включающих генетическое программирование и нейронные сети... Ореп Cog организует аппаратное и программное обеспечение в так называемую "когнитивную архитектуру", призванную моделировать деятельность мозга" [15].

Другая система LIDA Университета Мемфиса построена на основе теории глобального рабочего пространства, предложенной впервые Б. Баарсом [17], и, как предположили в журнале New Scientist, "демонстрирует признаки рудиментарного *сознания*" [15]. "По когнитивной архитектуре LIDA напоминает Open Cog, а финансирует ее морское ведомство США" [15]. Замечу, что в проектах Open Cog и LIDA за основу все же взята определенная информация о мозге.

Не могу также не отметить ряд разработок компании IBM, которые напрямую не связаны с рассматриваемым вопросом, т. е. сильным ИИ, однако явно носят пионерский характер, а именно: Deep Blue, Watson. Deep Blue — это шахматный суперкомпьютер, который победил в матче 1997 года чемпиона мира Г. Каспарова. Основная задача суперкомпьютера Watson отвечать на вопросы, сформулированные устно человеком, используя доступ к 200 млн страниц информации, включая Википедию. Обработка информации идет со скоростью 500 Гбит/с с оперативной памятью 11 Тбайт. Дальнейшим развитием Watson стали программные продукты Watson Studio, Watson SDK. IBM Watson одержал яркую победу над двумя очень сильными игроками в телеигре Jeopardy, что многими считалось также невозможным. Несмотря на то что системы Deep Blue и Watson относятся к последнему поколению продвинутых экспертных систем (слабый ИИ), они являются важным опытом в создании мощных специализированных систем ИИ, и с точки зрения автора, подобные системы будут основным направлением развития ИИ ближайшего будущего.

Перспективным в рамках гибридного направления является создание разнообразных смесей (*wetware*) электронного аппаратного обеспечения (*hardware*), программного обеспечения (*software*) и биологии (в рассматриваемом случае различных систем человека, включая мозг). Число возможных вариантов (гипотетических и практически реализованных) просто огромно.

Прежде всего, отмечу пионерские опыты Х. Дельгадо с помощью "стимосиверов" — миниатюрных радиоэлектронных устройств "для передачи и приема радиосигналов, направленных к мозгу и от него" [18]. Эти опыты подтвердили "возможность установления прямой связи между мозгом и вычислительной машиной, минуя органы чувств, а также возможность автоматического обучения путем прямой передачи сигналов на определенные структуры мозга без участия сознания" [18]. Подчеркну, что работы были выполнены в середине прошлого века!

Отмечу также методы лечебной электрической стимуляции головного и спинного мозга, а также периферических нервов человека с применением "щадящих методов стимуляции", разработанных под руководством академика Н. П. Бехтеревой, с помощью которых достигнуты значительные успехи в лечении самых различных заболеваний [19].

Успешными примерами интерфейсов "человек — машина" являются кохлеарные импланты для восстановления слуха, импланты сетчатки для восстановления зрения и т. п. При этом кроме различных нейроимплантов применяют и нейрочипы, т. е. специализированные ИС. Имеются успехи и в восстановлении двигательных функций (экзоскелеты), способности общаться (вспомним нейрокоммуникатор С. Хокинга) и других когнитивных функций [12]. Особый интерес представляют попытки создания протезов целых областей мозга, в частности гиппокампа, с помощью специализированных кремниевых ИС. Перспективным в этом случае может быть и использование различных микроэлектромеханических систем (МЭМС) и наноэлектромеханических систем (НЭМС) [12]. Краткое описание основных достижений в области интерфейсов "мозг — компьютер" дано в работе [11], а прогноз дальнейшего развития в работе [20].

В настоящее время предлагаются различные способы считывания мысли человека с применением искусственных устройств, включая нейрокомпьютерные интерфейсы, для передачи сообщений в мозг и связи с другим мозгом, вплоть до коммуникаций с интернетом путем создания Всемирной Сети Разума [2, 3, 7, 21], а это один из возможных путей к созданию сверхразума. Как уже отмечалось [2, 3, 7, 12], особую перспективу здесь представит использование достижений в области наноэлектроники, нанофотоники, наноматериалов, нанотехнологий и нанонаук в целом. Есть идея встроить оборудование смартфона непосредственно в тело человека [15]. Путь различных технологических дополнений человеческого тела, по существу, превращает человека в киборга, т. е. кибернетический организм. Р. Курцвейл считает, что киборгизация — это будущее человечества (см. далее).

В целом, если и будут созданы действительно более компактные системы ИИЧУ и сверхразума по сравнению с отмеченными, то это, скорее всего, произойдет в рамках гибридного направления. В то же время можно условно выделить следующие основные направления развития ИИ ближайшего будущего: 1) продолжение усиления человеческого интеллекта; 2) симбиоз ИИ и человеческого интеллекта; 3) создание специализированных систем ИИ, особенно где необходимо обрабатывать большие массивы данных.

Угрозы

Не вызывает сомнения, что ИИ — научно-техническая область двойного назначения, а следовательно, обладает потенциалом угроз для человечества, причем в данном случае значительных.

Очень кратко и убедительно основные угрозы были выделены в блестящем учебнике по ИИ, а именно [22]: "...искусственный интеллект, повидимому, становится источником некоторых невиданных ранее проблем, в том числе перечисленных ниже... В результате автоматизации может увеличиться количество безработных. Может уменьшиться (или увеличиться) количество свободного времени, имеющегося в распоряжении людей. Люди могут потерять чувство собственной уникальности. Люди могут потерять некоторые из своих прав на личную жизнь. Использование систем искусственного интеллекта может привести к тому, что люди станут более безответственными. Успех искусственного интеллекта может стать началом конца человеческой расы". В этой же книге проведен краткий анализ каждой из сформулированных в мягкой форме проблем. Наиболее важная для нас — последняя. Сформулирую ее следующим образом: речь о будущем совместном существовании сверхразума и человечества. Остановимся на ней более подробно.

В целом, если предположить, что эволюция интеллекта будет происходить по "биологическому сценарию", а есть основания полагать, что так и будет, то возможны три основных варианта: 1) уничтожение менее развитого интеллекта более развитым; 2) подчинение менее развитого интеллекта более развитым; 3) мирное сосуществование интеллектов разного уровня. Поэтому не вызывает удивления то, что прогнозы специалистов по поводу нашего совместного существования со сверхразумом лежат в очень широком диапазоне, перекрывающем отмеченные варианты, от крайне пессимистического (уничтожение человечества) до эйфорически оптимистического (счастливого, безоблачного совместного существования).

Пессимистические прогнозы. В литературе описан ряд апокалипсических сценариев развития событий (см., например, [15, 23—25]), когда после возникновения сверхразума, как правило, качественного, в результате его действий уничтожается человечество. Так, целью книги [15] является: "Я хочу объяснить, почему катастрофический исход не просто возможен, но почти неизбежен, если мы *сейчас* не начнем оченьочень тщательно к нему готовиться".

Анализ литературы показывает, что двумя главными проблемами, связанными со сверхразумом, являются: 1) будет практически невозможно предсказать поведение качественного сверхразума, если он появится; 2) в отличие от других технологий двойного назначения, для которых важно, чтобы они не попали в "злонамеренные руки", здесь, как справедливо отмечается в работе [22], "злонамеренные руки могут принадлежать самой технологии". Первое фактически означает, что нам необходимо обхитрить сверхразум, что, говоря образно, напоминает игру, когда ребенку необходимо по-настоящему переиграть взрослого. Возможно ли будет это? Второе же означает, что сверхразум может быть вне контроля человечества, т. е. ситуация меняется качественно! Анализ показывает, что ни один из методов контроля, самые разнообразные варианты которых подробно рассмотрены в работе [23], не обеспечивает полной надежной защиты. При этом анализировались методы из двух широких классов, а именно [23]: контроля возможностей сверхразума и его мотиваций. Поэтому вывод автора — пессимистический сценарий развития событий, к сожалению, не является невероятным.

Рассмотрим кратко ситуацию с безопасностью в области ИИ на настоящий момент времени, т. е., образно говоря, "спустимся на землю". К сожалению, она просто не вдохновляет. Известно огромное число случаев ошибок в работе систем ИИ, приводящих в том числе и к трагедиям, катастрофам. Наиболее известные и резонансные ошибки систем ИИ в исследованиях космоса, сферах производства, транспорта, энергетики, здравоохранения, финансов, связи, включая интернет, и других приведены в книге [25]. Среди последних трагедий достаточно вспомнить катастрофы двух самолетов Boeing 737 MAX 8, приведших к многочисленным человеческим жертвам, которые были связаны с ошибками в работе системы ИИ. Очень серьезную озабоченность вызывают многообразные хакерские (крэкерские) атаки, многочисленные известные примеры которых можно найти в интернете (достаточно упомянуть лишь известные масштабные утечки персональных данных). Особенно опасна автоматизация этих процессов. Большой вред может наносить и фейковое видео, основной целью которого является дискредитация людей, манипуляция общественным мнением. Обеспокоенность вызывает и все более широкое использование методик "черного ящика" при разработке систем ИИ. В результате возникают очень серьезные вопросы с их безопасностью.

Однако наибольшую озабоченность вызывают на настоящий момент времени *автономные системы вооружения*, включая превращение дронов в снаряды. Нетрудно вообразить последствия сбоев в системах ИИ, управляющих оружием массового уничтожения, или крэкерских атак на них. Возможный итог — коллективный суицид человечества, т. е. омницид.

Таким образом, становится очевидным, что человечество пока не имеет значительных успехов (не может договориться) в преодолении менее существенных проблем по сравнению с теми, которые могут возникнуть в случае создания качественного сверхразума. Единственное, что утешает, так это то, что, если это и произойдет, то, по-видимому, это будет не скоро, т. е. у нас есть время и возможно немалое.

Еще более серьезным для человечества является "суммирование рисков". О возможных проблемах для нас метко и емко высказался выдающийся английский ученый Стивен Хокинг [26]: "Планете сейчас грозит опасность в таком количестве областей, что мне трудно сохранить позитив. Опасности слишком велики и слишком многочисленны". К ним можно отнести: возможности глобальной экологической катастрофы, ядерной войны, других вариантов войн массового уничтожения, смертельной пандемии, столкновений с астероидами и другими массивными космическими объектами, истощение ресурсов Земли, ИИ, нано- и биотехнологии, генетика и др. Автор умышленно не отдает приоритет ни одному из рисков, так как, к сожалению, может случиться любой из них. Не исключено и их сочетание. "Суммирование рисков" попросту означает, что чем их больше, тем более вероятен катастрофический исход для человечества. И в то же время очевидно, что чудовищные средства тратятся не на то, на что следовало бы. В частности, триллионы долларов тратятся на вооружения, т. е. орудия уничтожения, а не для решения отмеченных проблем, угрожающих всему человечеству.

Итак, главной проблемой в области ИИ является безопасность соответствующих систем. С этой точкой зрения согласны многие специалисты в рассматриваемой области и те, кто просто интересуется данными вопросами. Результатом этой озабоченности явились "Асиломарские принципы разработки искусственного интеллекта" (см., например, [25]), количество подписей под которыми уже насчитывает тысячи известных мыслителей и разработчиков систем ИИ (см. ссылку http://futureoflife.org/ai-principles). Очень важно, чтобы разработка систем ИИ осуществлялась в соответствии с этими принципами. Несмотря на бесспорную важность этого добровольного документа, нарушение некоторых его параграфов может произойти неумышленно, или по неосторожности, или вследствие общего характера некоторых формулировок, носящих декларативный характер. Ведь очень сложный рассматриваемый вопрос. С точки зрения автора, необходимы более жесткие и контролируемые договоренности, в том числе на государственных и межгосударственных уровнях.

Основным направлением в области безопасности должно быть создание дружественного человеку ИИ, а в нашем случае — сверхразума. Как этого добиться? Пока, к сожалению, этого не знает никто!

Уже отмечалось, что различные методы контроля возможностей сверхразума вряд ли приведут к надежному полному контролю над ним. Больший успех может ожидаться от использования целого комплекса (иерархии) методов, вплоть до возможности его уничтожения. Очевидно, что последнее просто не гуманно относительно разума в любой его форме. И в то же время, учитывая многочисленные "грехи" человечества, в том числе и отмеченные выше, очень трудно предсказать как поведет себя сверхразум в отношении нас, если ни невозможно. Недаром Илон Маск в одном из ответов на вопрос в своем выступлении высказался очень эмоционально: "С искусственным интеллектом мы выпускаем дьявола!". Даже трудно вообразить, что может произойти, если "прирученный сверхразум" попадет в "злонамеренные" руки, а такое, к сожалению, не исключено.

Оптимистические прогнозы. ИИ уже давно шествует по планете с огромным числом положительных практически важных результатов, прежде всего, в областях по обработке больших массивов данных, принятий решений, требующих оценки влияния множества факторов и возможных ситуаций. В подобных случаях человек, как правило, действует интуитивно и/или основываясь на предыдущем опыте. Нередко это оказывается малоэффективным и даже опасным. Таким образом, ИИ реально улучшает нашу жизнь. В связи с этим у многих специалистов есть очень веские основания для оптимизма в оценке будущего ИИ, т. е. он возник не на пустом месте.

Если говорить о сверхразуме, то главное свойство, которое должно быть заложено (вос-

питано) в нем, как считают многие, — это дружелюбие по отношению к человечеству. Однако возникает вопрос: как этого добиться? Ответ: путем правильного его воспитания. И здесь возникает другой вопрос: что означает "правильное воспитание", какую систему ценностей необходимо заложить в сверхразум? Череда вопросов может продолжаться и далее. И где в этом случае остановится?

Поэтому одно направление, которое фактически развивается уже давно, представляет, с точки зрения автора, перспективу — это симбиоз человека и систем ИИ. Ярким пропагандистом одного из вариантов этой идеи является Р. Курцвейл, который считает, что человечество сольется с машинами и в результате этого уцелеет [27]. Более того, проанализировав основные этапы развития человечества, известный нейробиолог и нейропсихолог Э. Голдберг пришел к выводу, что мы находимся "на пороге "революции слияния"" [28]. В этом случае, однако, человечество может столкнуться с рядом сложных и неожиданных проблем, связанных с совместимостью, а именно: информационными перегрузками; потерей своего личного "я" (идентичности); различными психическими расстройствами и др. Каковы будут последствия? Трудно предсказать.

Другая заслуживающая внимания идея, которая, на первый взгляд, кажется пессимистической, заключается в нашем качественном изменении оценки будущего ИИ, а именно: расценивать системы ИИ как "наших детей". Этой идеи придерживаются известные специалисты -Д. Хофштадтер и Х. Моравек. В частности, о роботах Х. Моравек написал: "Довольно скоро они станут способными вытеснить нас из жизни. Но я не очень встревожен такой возможностью, поскольку считаю, что будущие машины — это наше потомство, "порождение нашего разума", созданное по нашему образцу и подобию; это мы, но в более развитой форме. Как и биологические дети предыдущих поколений, они воплотят в себе лучшие надежды человечества на долгосрочное будущее... Дети нашего разума, не скованные тяжелой поступью биологической эволюции, будут вольны двигаться вперед и расти, чтобы в конце концов взять на себя безграничные и фундаментальные вызовы большой Вселенной... На какое-то время мы, люди, получим выгоду от их труда, но... как настоящие живые дети, они будут искать собственный путь и собственную судьбу, тогда как мы, их пожилые родители, молча отойдем в сторону".

Заключение

Рассмотрение перспектив и проблем создания сверхразума проведено исходя из точки зрения, что человек — биологическая машина. Методологической основой при этом являлась полная электронная интерпретация функционирования мозга и теория сознания, предложенные автором ранее. На их основе выделены ключевые свойства мозга в качестве информационной системы, так как без понимания его работы трудно, а скорее всего невозможно, серьезно говорить об ИИЧУ, сверхразуме. Показано, что корректнее оценивать уровень интеграции мозга человека как объекта наноэлектроники не по числу нейронов, а по числу каналов, которых гораздо больше — 10^{19} ... 10^{21} . Кроме фантастического уровня интеграции, для мозга выделены и ряд других важнейших свойств, которые пока не реализованы в ИС твердотельной электроники. Результатом этих особенностей мозга является сознание и квалиа, не достигнутые в современных системах ИИ. Сформулированный автором главный принцип функционирования мозга — принцип преобразований сигналов и энергетических реконструкций, с одной стороны, позволяет объяснить сознание и квалиа, а с другой стороны, — чем мозг качественно отличается от объектов твердотельной электроники. Отмечена важность аналого-цифровой обработки сигналов в мозге человека. Показано, что Природой была решена задача супероптимизации, которая еще не осуществлена в твердотельной электронике.

С этих позиций рассмотрены перспективы создания ИИЧУ и сверхразума. Выделены три направления их создания: 1) материалистическое; 2) идеалистическое; 3) гибридное. Проведен анализ всех трех направлений.

Показано, что в рамках материалистического направления ИИЧУ достижим. Оно же является вполне реальным и для достижения сверхразума. Сравнение с лучшими показателями твердотельной электроники, прежде всего, по уровню интеграции, энергопотреблению и габаритным размерам показывает, что мозг пока вне конкуренции. Так, только для достижения уровня интеграции мозга нам потребуется не менее 60 лет. И, тем не менее, приближенное воспроизведение сознания и квалиа в рамках электронного интеллекта, в принципе, возможно. Электронный интеллект перспективен для создания роботов с высоким уровнем ИИ, а также нейрокомпьютеров.

В то же время идеалистическое направление, по-видимому, будет наиболее безопасным, так

как ИИЧУ и сверхразум (в случае их создания) будут находиться не в реальном, а в виртуальном мире. По крайней мере, на начальном этапе. Отмечено, что приближенная и даже грубая полная эмуляция мозга может быть полезна в медицине, в частности, для "реставрации сознания" человека. По оценке автора, производительности самого мощного на сегодняшний день суперкомпьютера может быть недостаточно для детального моделирования (полной эмуляции) мозга человека. Отмечена проблематичность возникновения качественного сверхразума в результате "рекурсивного саморазвития". По мнению автора, и качественный сверхразум, если и появится, то все же будет допускать ошибки так же как и человек.

Особую перспективу для создания ИИЧУ и сверхразума представляет гибридное направление, сочетающее компоненты как материалистического, так и идеалистического направлений. Достаточно отметить, что коллективный сверхразум, как считают многие, уже создан — это Вы и интернет. Однако хотелось бы, чтобы ИИЧУ и сверхразум были не распределенными, а компактными устройствами. Рассмотрены ряд перспективных систем ИИ, которые могут считаться прообразами ИИЧУ.

И тем не менее, даже самые продвинутые (передовые) системы ИИ пока не могут сравниться с интеллектуальными возможностями человека по широте спектра и гибкости, способности к развитию. Они не обладают главным — сознанием и квалиа. Отмечу, однако, что появление качественного сверхразума будет одним из самых великих достижений человечества, так как он сможет взяться за решение грандиозных проблем, например, разработку методов лечения непобежденных болезней человека, распространение разума во Вселенной.

Рассмотрены угрозы для человечества, которые могут возникнуть с появлением качественного сверхразума. Проанализированы пессимистические и оптимистические прогнозы специалистов. К сожалению, самый печальный прогноз для будущего человечества не исключен. Поэтому основное внимание должно быть уделено безопасности.

Ближайшие проблемы для человечества, однако, связаны с автономными системами вооружений, использующими ИИ. Еще большие угрозы связаны с суммированием рисков.

В целом ИИ, образно говоря, — это "джин", которого человечество уже выпустило из бутылки. И этот процесс не подлежит возврату, так как человечество не может договориться по гораздо более простым вопросам и проблемам. ИИ будет развиваться и совершенствоваться далее. Из этого надо исходить как из непреложной истины. Главное при этом, чтобы "джин" был дружественен по отношению к человеку. Как это сделать? Сейчас этого не знает никто. И тем не менее, судя по всему, у нас будет время, чтобы разработать эффективные методы безопасности.

Перспективу в этом плане представляет идея слияния человека с машинами. Еще один взгляд импонирует автору — это то, что будущие системы ИИ — "наши дети". Этот взгляд полностью согласуется с вариантом "бессмертия", реализованного Природой, когда, образно говоря, мы передаем "эстафетную палочку" следующим поколениям. Главное чтобы "наши дети" уважали, помнили и любили своих родителей!

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность моим ученицам Н. В. Коломейцевой, И. А. Романовой и И. Ю. Щербаковой за подготовку рукописи работы к печати.

Список литературы

1. Абрамов И. И. Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 1. Р. 46—56.

2. Абрамов И. И. Мозг как объект электроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 с.

3. Abramov I. I. Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.

4. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52—54.

5. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45—53.

6. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 5. С. 45—54.

7. Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 49—53.

8. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 308—320.

9. Абрамов И. И. Сознание человека, или возможности электроники. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 368—384.

10. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 9. С. 555—574.

11. **Kaku M.** The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.

12. **Абрамов И. И.** Перспективы использования наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 1. С. 49—64.

13. **Seung S.** Connectome: How the brain's wiring makes us who we are. New York: Houghton Mifflin Harcourt. 2012. 384 p.

14. **Human** Brain Project. URL: https:// www.humanbrainproject.eu

15. Баррат Дж. Последнее изобретение человечества: Искусственный интеллект и конец эры Homo sapiens. М.: Альпина нон-фикшн, 2019. 396 с.

16. Neurogrid: A mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations / B. V. Benjamin, P. Gao, E. McQuinn, S. Choudhary, A. R. Chandrasekaran, J.-M. Bussat, R. Alvares — Icaza, J. V. Arthur, P. A. Merolla, K. Boahen // Proc. IEEE. 2014. Vol. 102, N. 5. P. 699–716.

17. **Cognition**, brain, and consciousness. Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Ed. by B. J. Baars, N. M. Gage. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 p.

18. Дельгадо Х. Мозг и сознание. М.: Мир, 1971. 264 с. 19. Лечебная электрическая стимуляция мозга и нервов человека / Под общ. ред. Н. П. Бехтеревой. М.: АСТ; СПб.: Сова; Владимир: ВКТ, 2008. 464 с.

20. **Roadmap.** The future in brain/neural-computer interaction: HORIZON-2020. URL: https://bnci-horizon-2020.eu/roadmap

21. **Хорост М.** Всемирный разум. М.: Эксмо, 2011. 288 с.

22. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. М.: Изд. дом "Вильямс", 2006. 1408 с.

23. Бостром Н. Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 496 с.

24. **Что** мы думаем о машинах, которые думают: Ведущие мировые ученые об искусственном интеллекте / Под ред. Д. Брокман. М.: Альпина нон-фикшн, 2017. 549 с.

25. Тегмарк М. Жизнь 3.0. Быть человеком в эпоху искусственного интеллекта. М.: ACT: CORPUS, 2019. 560 с.

26. **Хокинг С.** Краткие ответы на большие вопросы. М.: Эксмо, 2019. 256 с.

27. **Курцвейл Р.** Эволюция разума. М.: Изд-во "Э", 2015. 352 с.

28. Голдберг Э. Креативный мозг: Как рождаются идеи, меняющие мир. М.: Эксмо, 2019. 384 с. 29. Moravec H. P. Robot: Mere machine to transcendent

29. Moravec H. P. Robot: Mere machine to transcendent mind. Oxford University Press, 2000.

I. I. Abramov, Dr. Sci., Professor, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author:

Abramov Igor I., Dr. Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Prospects and Problems of Supermind Development. Part II

Received on November 08, 2019 Accepted on November 15, 2019

The prospects and problems of supermind creation are estimated. The previously proposed full electronic interpretation of brain functioning and the theory of human consciousness are the methodological basis of consideration.

In part II of the work the author examined the prospects and problems of artificial intelligence of the human level and supermind creation in the framework of the distinguished third area of their development — the hybrid development area. In this area, the components of both the materialistic and the idealistic development areas are used. This development area, apparently, is the most promising of the three distinguished areas of creation of artificial intelligence of the human level and supermind.

The threats to humanity that may arise if a high-quality supermind is created are analyzed. It is noted that both pessimistic and optimistic forecasts for the future of humanity can take place. In the near future, however, the greatest threats to humanity will be autonomous weapons systems, as well as the possible "summation of risks" from various threats.

Keywords: supermind, brain, full electronic interpretation, human consciousness, nanoelectronics, simulation, artificial intelligence

For citation:

Abramov I. I. Prospects and Problems of Supermind Development. Part II., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 112–120.

DOI: 10.17587/nmst.22.112-120

References

1. **Abramov I. I.** Prospects and problems of supermind development. Part I., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 46–56.

2. Abramov I. I. Mozg kak obekt jelektroniki. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (In Russian).

3. Abramov I. I. Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.

4. Abramov I. I. Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' I, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 1, pp. 52–54 (In Russian).

5. Abramov I. I. Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' II, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 3, pp. 45–53 (In Russian).

6. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' III, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 5, pp. 45–54 (In Russian).

7. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' IV, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 6, pp. 49–53 (In Russian).

8. Abramov I. I. Human consciousness, or possibilities of electronics. Part I. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 308–320.

9. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part II. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 368–384.

10. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part III. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 555–574.

11. **Kaku M.** The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York, Doubleday Publishers, 2014. 400 p.

12. Abramov I. I. Prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1. P. 49–64.

13. **Seung S.** Connectome: How the brain's wiring makes us who we are. New York, Houghton Mifflin Harcourt, 2012. 384 p.

14. Human Brain Project. URL: https:// www.human-brainproject.eu

15. **Barrat J.** Our final invention: Artificial intelligence and the end of the human era. New York, Thomas Dunne Books St. Martin's Press, 2013.

16. Neurogrid: A mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations / B. V. Benjamin, P. Gao, E. McQuinn, S. Choudhary, A. R. Chandrasekaran, J.-M. Bussat, R. Alvares — Icaza, J. V. Arthur, P. A. Merolla, K. Boahen, *Proc. IEEE*, 2014, vol. 102, no. 5, pp. 699–716.

17. **Cognition**, brain, and consciousness. Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Ed. by B. J. Baars, N. M. Gage. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 p.

18. **Delgado J. M. R.** Physical control of the Mind. Toward a psychocivilized society. New York, Harper & Row, Publishers, 1969.

19. **Medical** electric stimulation of a brain and nerves of the human / Pod obshh. red. N. P. Bekhterevoj. M.: AST; SPb.: Sova; Vladimir: VTK, 2008. 464 p. (In Russian).

20. **Roadmap.** The future in brain/neural-computer interaction: HORIZON—2020. URL: https://bnci-horizon-2020.eu/roadmap

21. Chorost M. World Wide Mind. Free Press, Simon & Schuster, 2011.

22. **Russel S. J., Norvig P.** Artificial intelligence: A modern approach. Second edition. Prentice Hall, 2003.

23. **Bostrom N.** Superintelligence. Path, dangers, strategies. N. Y., Oxford University Press, 2014.

24. **What** to think about machines that think. Today's leading thinkers on the age of machine intelligence, Ed. By J. Brockman, New York, Harper Perennial, 2015.

25. **Tegmark M.** Life 3.0: Being human in the age of artificial intelligence. Vintage Books, 2017.

26. **Hawking S.** Brief answers to the big questions. Spacetime Publications Ltd., 2018.

27. **Kurzweil R.** How to create a mind: The secret of human thought revealed. Viking, 2012.

28. **Goldberg E.** Creativity: The human brain in the age of innovation,Oxford University Press, 2018.

29. **Moravec H. P.** Robot: Mere machine to transcendent mind, Oxford University Press, 2000.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 17.12.2019. Подписано в печать 22.01.2020. Формат 60×88 1/8. Заказ МС220. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье С. А.Гамкрелидзе, П. П. Мальцева, Ю. В. Федорова, Д. Л. Гнатюка, А. В. Зуева, М. В. Майтамы, А. О. Михалева «КАСКОДНАЯ МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 8-12 ГГц НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ»

Рис. 3. Топологический проект МИС МШУ

Рис. 5. Коэффициенты усиления (*a*) и шума (*б*) двух экспериментальных образцов МИС МШУ на подложке сапфира (Al₂O₃)

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы

Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО-и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79493

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79963

Научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ жизнедеятельности

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности. Ежемесячный теоретический и прикладной научнотехнический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В журнале освещаются современ-

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 72656

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79492

STR.

Ежемесячный теоретический и прикладной

научно-технический журнал МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автомати ческого и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Теоретический и прикладной научно-технический журнал ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях челове ческой деятельности.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 22765

57-120. Индекс: 79493 (Объединенный каталог «Пресса России») i °N° SSN 1813-8586. Нано- и микросистемная техника. 2020. Том 22.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ". Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru