



ИСВЧПЭ РАН. РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

*А.Бугаев, Ю.Федоров, Р.Хабибуллин, к.ф.-м.н.,
Д.Пономарев, к.ф.-м.н., Г.Галиев, д.т.н. /
khabibullin_r@mail.ru*

Спектральный диапазон (0,5-10 ТГц или 600-30 мкм) расположен на шкале частот между СВЧ-областью, где работают в основном высокочастотные полупроводниковые приборы и радиолампы, и область ИК-излучения, в которой функционируют оптические приборы. Создание ТГц-приборов способно изменить принципы и подходы к ранней медицинской диагностике (особенно опухолей) и терапии хронических заболеваний. Востребованность разработок также связана с противодействием терроризму в местах скопления людей, в том числе на транспорте. Кроме того, в автомобильной, авиационной и космической промышленности требуются все более совершенные системы неразрушающего контроля и локации. Эти вопросы обсуждаются в статье Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН).

Излучение 0,5-10 ТГц беспрепятственно проникает сквозь дым и туман, одежду, керамику, пластмассу, биологические ткани, многие другие материалы, позволяя обнаруживать и классифицировать скрытые вложения. В отличие от рентгеновского излучения, оно безопасно для живого организма и перспективно для использования в системах безопасности [1-3].

Частоты колебаний атомов в органических молекулах, в частности в сложных белках, лежат в ТГц-диапазоне, что позволяет использовать данные электромагнитные волны в медицинских целях для ранней диагностики опухолей и воздействия на них, не подвергая разрушению здоровые ткани.

В материаловедении в ТГц-диапазоне достигается большая контрастность различных материалов. Это дает возможность создать методы неразрушающего анализа, включая визуализацию различных фаз и частиц в исследуемой матрице.

В радиоастрономии и локации использование ТГц-излучения вместо СВЧ- и радиоволн

IUFSE RAS. DEVELOPMENT OF SEMICONDUCTOR DEVICES FOR THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

*A. Bugaev, Yu. Fedorov, R. Khabibullin, PhD,
D. Ponomarev, PhD, G. Galiev, DS /
khabibullin_r@mail.ru*

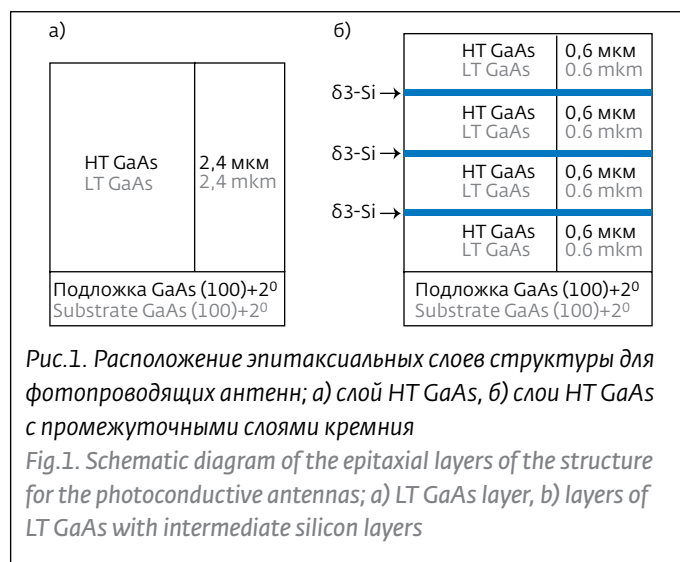
The spectral range (0.5-10 THz or 600-30 mcm) is located in the frequency scale between the microwave range, in which mainly high-frequency semiconductors and radio valves work, and IR range, where optical devices function. Development of THz devices can change the principles and approaches in the field of early medical diagnostics (especially tumors) and therapies of chronic diseases. The demand for the technologies is also due to counteraction to terrorism in public places, including transport. Besides, motor, aviation and space industries demand more and more sophisticated systems of nondestructive testing and location. These questions are discussed in the article of the Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUFSE RAS).

Irradiation of 0.5-10 THz penetrates easily through smoke and fog, clothes, ceramics, plastics, biological tissues and many other materials, which allows us to detect and classify the hidden enclosures. Unlike X-ray radiation, it is safe for live organisms and has good prospects for use in the security systems [1-3].

Oscillation frequencies of atoms in the organic molecules and in complex proteins, in particular, are within the THz range, which allows us to use the given electromagnetic waves for medical purposes, early diagnostics of tumors, and to exert influence on them without destruction of the healthy tissues.

As far as the materials science is concerned, a high contrast of various materials is reached within the THz range. This gives us a chance to create methods of a nondestructing analysis, including visualization of various phases and particles in the investigated matrixes.

Employment of THz radiation instead of microwaves and radio-waves in radio astronomy and location allows us to increase the observation resolution on the angular co-ordinates. Besides, the relic radiation of the Universe also happens to be within this range.



позволяет увеличить разрешающую способность наблюдений по угловым координатам. Кроме того, в этом диапазоне находится реликтовое излучение Вселенной.

РАЗРАБОТКИ В ТГц-ОБЛАСТИ

Разрабатываются и исследуются фотопроводящие антенны для генерации и детектирования излучения с частотой свыше 1 ТГц (субмиллиметровый диапазон). Совместно с МГУ имени М.В.Ломоносова институт принимает участие в работе "Физические и технологические основы создания элементной базы приборов и устройств терагерцевой связи, обнаружения и дистанционной идентификации опасных веществ" (контракт РФФИ № 12-02-12040 офи_м). В частности, молекулярно-лучевой эпитаксией были выращены структуры низкотемпературного (НТ) арсенида галлия на полуизолирующей подложке GaAs (рис.1). Суммарная толщина НТ GaAs для обоих образцов – 2,4 мкм.

Разработан и изготовлен фотошаблон, содержащий несколько типов антенн с контактными площадками. Расстояние между ними 4 мм, ширина полоска – 5 мкм. Вектор поляризации расположен в плоскости пластины. Для формирования рисунка использовалась двухслойная система фоторезистов LOR5A/S1813 и установка контактной фотолитографии SUSS MJB4.

На рис.2 приведены микрофотографии контактных площадок фотопроводящих антенн с разной геометрией. Измерения характеристик фотопроводящих антенн методом терагерцевой спектроскопии во временной области (рис.3) проводились в МГУ имени М.В.Ломоносова.

DEVELOPMENTS IN THZ AREA

Photoconductive antennas for generation or detection of radiation with frequency over 1 THz (sub mm range) are being developed and tested. Jointly with the Lomonosov Moscow State University the Institute takes part in the work "Physical and technological bases for development of an elemental base for instruments and devices of terahertz communications, of detection and remote identification of the hazardous substances" (RFFI Contract № 12-02-12040 ofi_m).

In particular, by the method of molecular-beam epitaxy the structures of a low-temperature (LT) gallium arsenide (GaAs) on a semi-insulating substrate GaAs were grown. Fig.1 demonstrates a schematic diagram of the epitaxial layers. The total thickness of LT GaAs for both samples is 2.4 micrometers.

A photomask was developed and manufactured containing several types of antennas with contact pads. The distance between them is 4 mm, width of a strip – 5 micrometers. The polarization vector is located in the plane of a plate. LOR5A/S1813 two-layer system of photoresists and SUSS MJB4 contact photolithography installation were used to form the drawing.

Fig.2 demonstrates microphotos of the contact pads of the photoconductive antennas with different geometries.

Measurements of the characteristics of the photoconductive antennas by the method of TDS (time domain spectroscopy) were done in the Lomonosov Moscow State University. (Fig.3).

IUHFSE RAS works actively on development of THz electronics in Russia. In particular, in 2012 it successfully finished "Research of possibilities of creation of nanoheterostructures for the terahertz range of frequencies (over 0.3 THz) of the telecommunication systems" (State Contract № 14.740.11.0869 of 29.04.2011). In the process of the work it developed heterostructures on the basis of InP substrates with a composite active

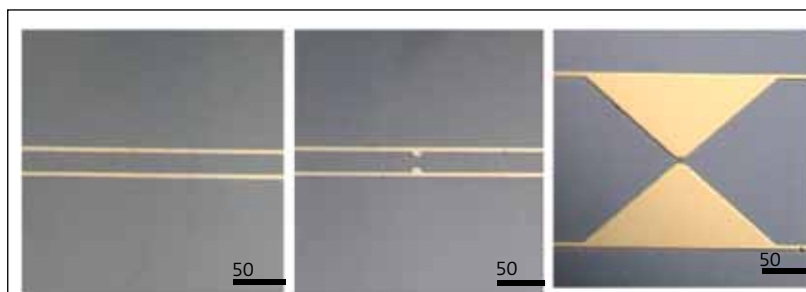


Рис.2. Контактные площадки фотопроводящих антенн с разной топологией

Fig.2. demonstrates microphotos of the contact pads of the photoconductive antennas with different geometries



ИСВЧПЭ РАН активно работает по развитию в РФ ТГц-электроники. В частности, в 2012 году была успешно завершена НИР "Исследование возможностей создания наногетероструктур для терагерцевого диапазона частот (свыше 0,3 ТГц) телекоммуникационных систем" (Госконтракт № 14.740.11.0869 от 29.04.2011 г.), в ходе которой были разработаны гетероструктуры на основе подложек InP с составной активной областью, содержащей нановставку InAs различной толщины – от 4 до 8 нм, показавшие высокие подвижности и концентрации двумерных электронов. С 28 апреля 2012 года выполняется НИР "Исследование перспективных конструкций и технологических принципов формирования квантовых структур для ТГц-диапазона частот" (Госконтракт № 16.426.11.0051). Создаются устройства с минимальными размерами элементов 50 нм для частот 0,3–0,9 ТГц на основе квантовых наногетероструктур с одной и несколькими нановставками InAs и GaAs. Качество гетероинтерфейсов составной активной области таких структур подтверждается просвечивающей электронной микроскопией – ПЭМ (рис.4, 5).

Помимо разработок в области канала транзистора, создаются метаморфные наногетероструктуры, где в качестве базового материала используются подложки GaAs, которые дешевле InP и менее хрупкие. Проводимость таких структур напрямую зависит от состава и технологии роста метаморфного буфера (МБ), аккомодирующего механические напряжения в наногетероструктуре при эпитаксиальном росте.

Для улучшения частотных характеристик приборов субмиллиметрового диапазона разработана серия наногетероструктур со ступенчатым МБ с двумя инверсными ступенями и сверхрешетками [5, 6]. Расположение эпитаксиальных слоев с указанием их толщин для МНЕМТ (metamorphic high electron mobility transistor) наногетероструктуры приведено на рис.6.

При разработке такой гетероструктуры необходимо уменьшать эффективную массу электронов в канале транзистора за счет увеличения мольной доли индия (InAs) в активном слое $In_xGa_{1-x}As$. Это

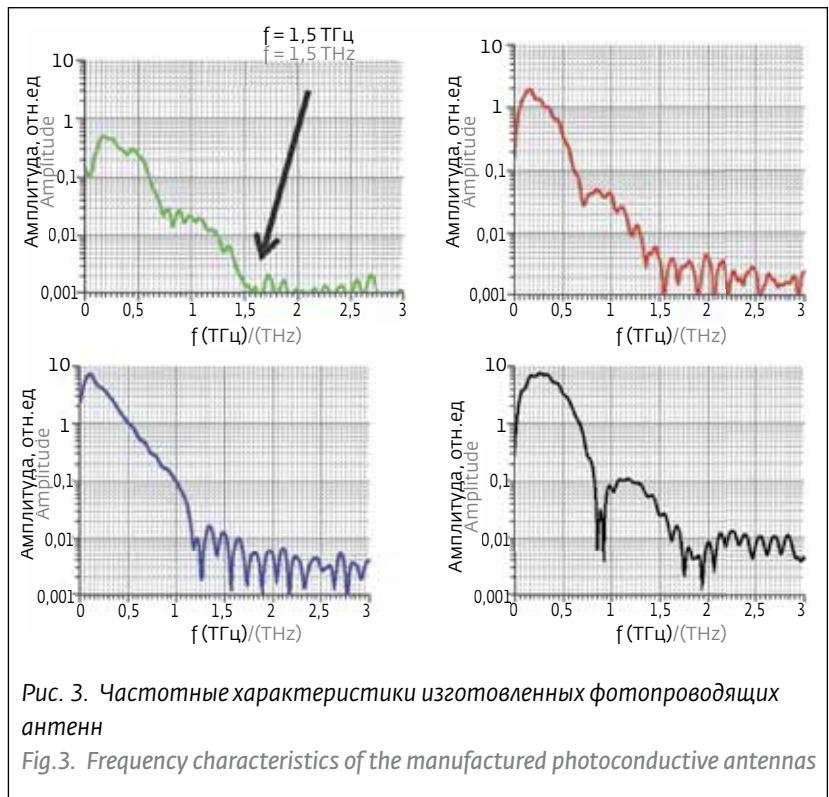


Рис. 3. Частотные характеристики изготовленных фотопроводящих антенн

Fig.3. Frequency characteristics of the manufactured photoconductive antennas

area containing InAs nanoinsert of varied thickness of 4÷8 nanometers, which demonstrated high mobility and concentration of the two-dimensional electrons.

Since April, 28, 2012, "Research of the perspective designs and technological principles for formation of quantum structures for THz frequency range" has been going on (State Contract № 16.426.11.0051). Devices

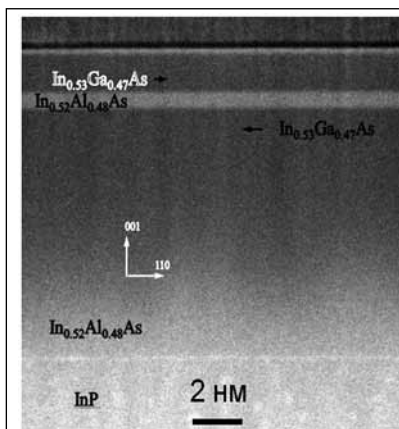


Рис.4. Наногетероструктура с активной областью $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ (ПЭМ)
Fig.4. Nanoheterostructure with active area $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ (TEM)

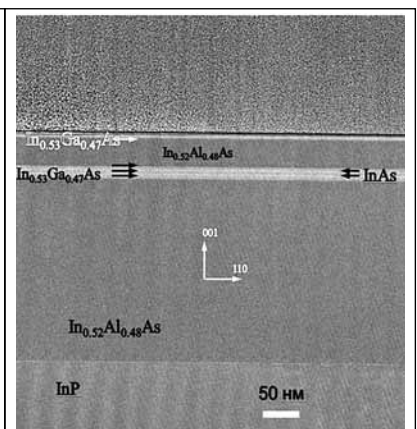
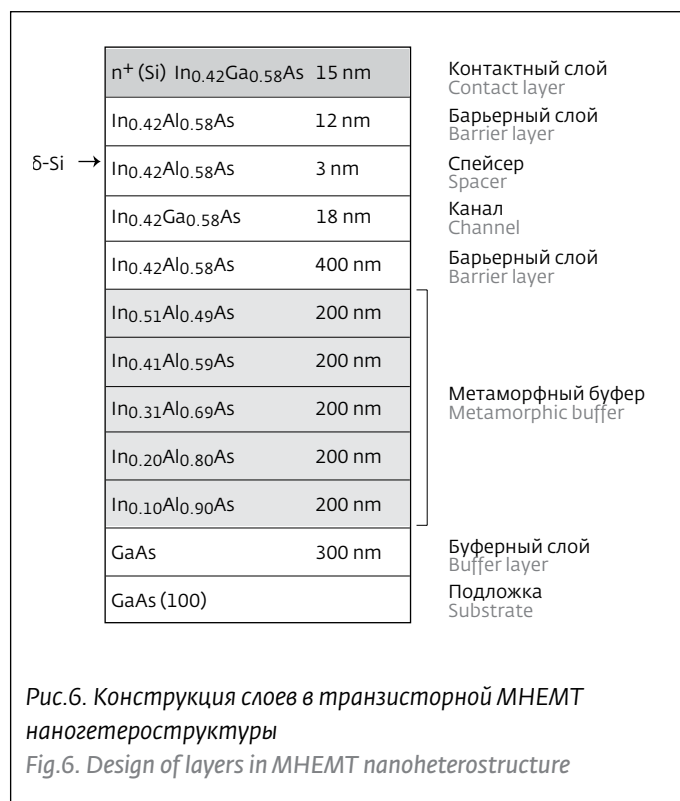


Рис.5. Наногетероструктура с активной областью $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs$ / $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs$ (ПЭМ) [4]
Fig.5. Nanoheterostructure with active area $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs$ / $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs$ (TEM) [4]



должно приводить к увеличению подвижности электронов и их дрейфовой скорости в канале транзистора. Также необходимо приблизить активную область к поверхности гетероструктуры, что позволит улучшить управление полевым транзистором. Однако важно учитывать влияние поверхностного потенциала на ее зонный профиль и использовать компенсирующее легирование для сохранения концентрации электронов в канале. Установлено, что оптимальной конструкцией МБ $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$, независимо от содержания InAs, является буфер со ступенчатым законом изменения y и суммарной толщиной 1-1,2 мкм [7].

Затворы с малой длиной механически неустойчивы и склонны к "заваливанию". Существует ряд подходов к решению данной проблемы: в частности, создание субножки, опирающейся на подслой диэлектрика; формирование массива микроколон, поддерживающих "шляпу" грибообразного затвора. При формировании такого затвора с помощью трехслойной системы резистов ПММА950К / ПМГИ / ПММА950К за счет профилирования центральной дозы (экспонирования краев ножки с меньшей дозой, чем центр) можно достигнуть $L_g \sim 50$ нм. Эта система электронных резистов чувствительна к внешним факторам: рельефу поверхности наногетероструктур, размеру и геометрии периферийных контактных площадок, условиям проявления, толщине металла. Из-за невозможности устойчивого воспроизведения заданного L_g ,

are being developed with minimal topological sizes of elements of 50 nm for frequencies 0.3÷0.9 THz on the basis of the quantum nanoheterostructures with one or several nanoinserts of InAs and GaAs. The quality of the heterointerfaces of the active areas of such structures is proved by transmission electron microscopy - TEM (Fig.4 and 5).

Besides the transistor channel technologies, metamorphic nanoheterostructures are being developed, where the base material is GaAs substrates, which are cheaper than InP and less fragile. Conductivity of such structures depends directly on the composition and growth technology of a metamorphic buffer (MB), which accommodates mechanical stresses in a nanoheterostructure during the epitaxial growth.

In order to improve the frequency characteristics of the sub mm range devices, a series of nanoheterostructures was developed with a step MB with two inverse steps and superlattices [5, 6]. A schematic diagram of the epitaxial layers with specification of their thickness for a transistor МНЕМТ (metamorphic high electron mobility transistor) nanoheterostructure is presented in Fig.6.

During elaboration of such a heterostructure it is necessary to reduce the effective mass of the electrons in the transistor channel due to an increase of the mole fraction of indium (InAs) in the active layer of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. This should lead to an increase of the electrons' mobility and of their drift velocity in the transistor channel. It is also necessary to bring the active area closer to the heterostructure surface, which will improve the controllability of the field effect transistor.

However, it is important to take into account the influence of the surface potential on its band profile and to use a compensating alloying for preservation of the concentration of electrons in the channel. It was established, that the optimal design of MB $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$, irrespective of InAs content, is a buffer with the step law of change and total thickness of 1÷1.2 micrometers [7].

Small-length gates are mechanically unstable and prone to tumbling down. There are several ways to solve the given problem: in particular, creation of a subleg, leaning on the sublayer of a dielectric; formation of a mass of microcolons, supporting the "hat" of a T-shape gate. When such a gate is formed, it is possible to reach $L_g \sim 50$ nm by means of a three-layer system of resists ПММА950К / ПМГИ / ПММА950К due to profiling of the central dose (writing of the leg's edges with a smaller, than centre, dose).

This system of electron resists is sensitive to the external factors: surface relief of the nanoheterostructure, size and geometry of the peripheral contact pads, conditions of development

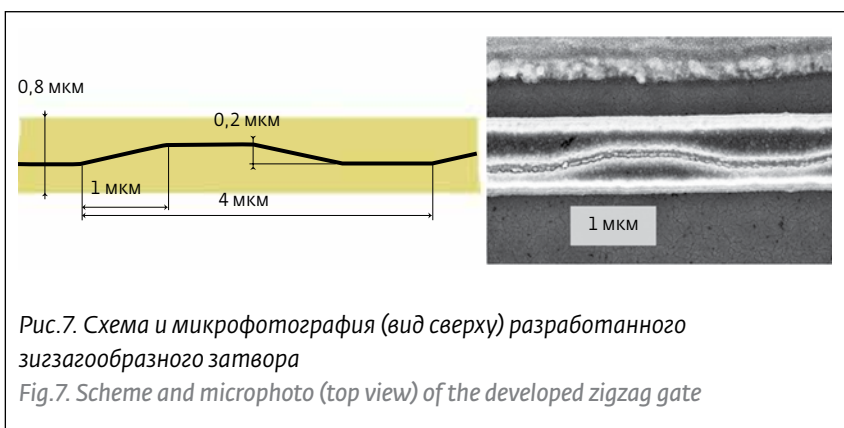


Рис.7. Схема и микрофотография (вид сверху) разработанного зигзагообразного затвора

Fig.7. Scheme and microphoto (top view) of the developed zigzag gate

эти факторы ограничивают практическое использование трехслойной системы резистов. Таким образом, для создания затворов с длиной менее 50 нм необходимы более сложные системы резистов и продуманная форма "ножки" затвора.

Разработана пятислойная система электронных резистов ПММА950К / ПМГИ / ПММА950К / ПМГИ / ПММА950К для обеспечения высокой механической устойчивости затвора. Сами затворы формировались электронно-лучевой литографией на нанолитографе Raith 150 TWO. Для контроля размеров и формы "ножки" затвора область ее формирования была разбита на ряд подслоев системы резистов ПММА950К / ПМГИ / ПММА950К, которые независимо проявлялись в проявителе МИБК:ИПС (1:1). Это дало возможность увеличить высоту "ножки", что должно приводить к уменьшению паразитных емкостей. Такая ножка имеет форму зигзага, поэтому механическая жесткость затвора увеличивается. Это достигается за счет увеличения эффективной площади, поддерживающей широкую "шляпу", что дополнительно приводит к уменьшению коэффициента шума. Сам зигзаг имеет размах 200 нм с периодом 4000 нм. Суммарная толщина "шляпы" составила 800 нм. На рис.7 показана схема и микрофотография разработанного затвора.

Форма затвора не влияет на частотные параметры транзисторов, так как вариация геометрии затвора много меньше длины волны в рабочем частотном диапазоне и сравнима с эффективной областью полевого управления каналом под затвором транзистора. На рис.8 приведены РЭМ-изображения зигзагообразных затворов.

Топология МНЕМТ-транзисторов, полученная последовательным применением методов фотолитографии, травления и металлизации, приведена на рис.9.

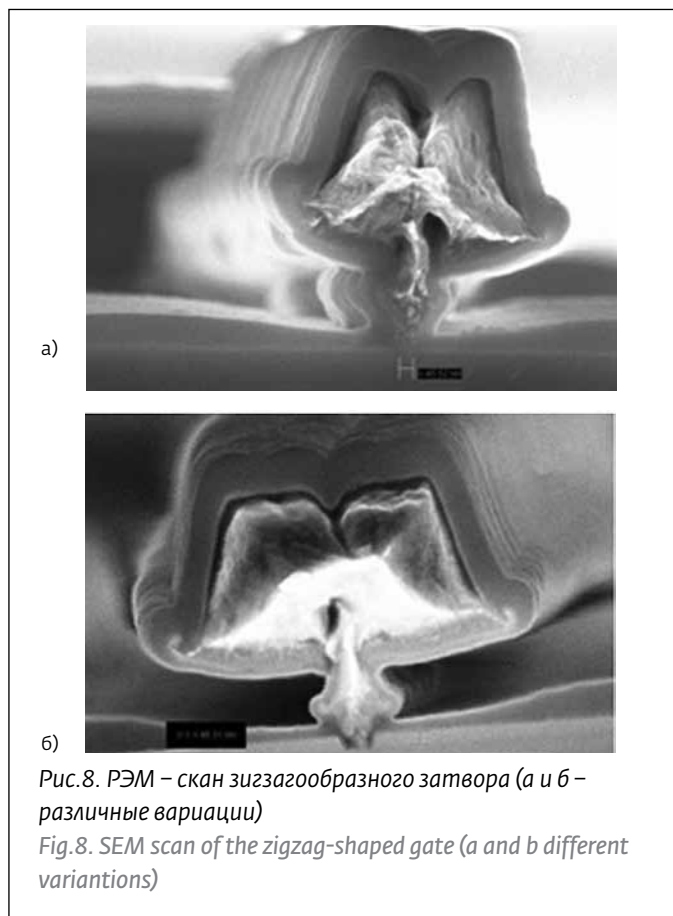
Измерения S-параметров тестовых транзисторов проводились в схеме с общим истоком в диапазоне 0,1-67 ГГц. При помощи парных трехконтактных зондовых

and thickness of a metal. Since it is impossible to achieve a stable reproduction of a given L_g , these factors constrain the practical use of the three-layer system of resists. Thus, in order to develop gate with a length less than 50 nm we need more complicated systems of resists and a well-thought out form of the "leg".

PMMA950K / PMGI / PMMA950K – five-layer system of electron resists was developed in order to ensure the gate's high mechanical stability. The gate themselves were formed by an electron-

beam lithography on Raith 150 TWO nanolithographer. In order to ensure control of the sizes and forms of the gate's "leg" the area of its formation was divided in a number of sublayers of PMMA950K/PMGI/PMMA950K system of resists, which were developed independently in the developer MIBK:IPS (1:1).

This made it possible to increase the height of the "leg", which should result in a reduction of the parasitic capacities. A zigzag form of such a leg increases the mechanical rigidity of the gate. This is achieved due to

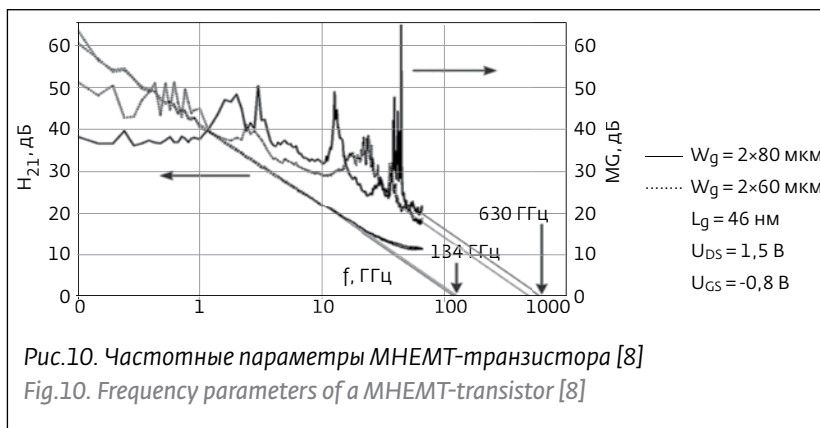
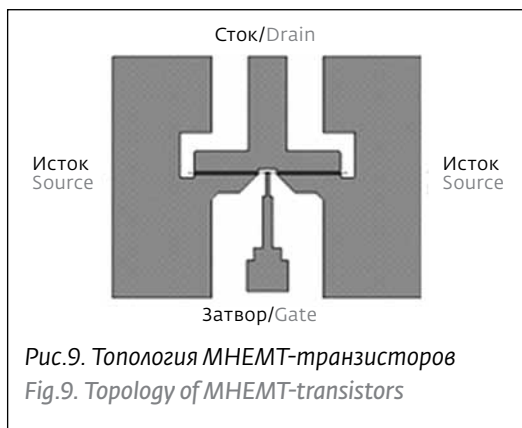


a)

b)

Рис.8. РЭМ – скан зигзагообразного затвора (а и б – различные вариации)

Fig.8. SEM scan of the zigzag-shaped gate (a and b different variants)



головок векторный анализатор Agilent E8361A подключался к МНЕМТ-транзисторам непосредственно на пластине. Результаты измерений частотных характеристик изготовленных транзисторов приведены на рис.10.

Измерения проводились для транзисторов, расположенных в одном и том же рабочем модуле на пластине. Напряжение между истоком и стоком U_{DS} составляло 1,5 В, а напряжение между истоком и затвором $U_{GS} = -0,8$ В. Наибольшие предельные частоты усиления по току и по мощности получены для МНЕМТ-транзистора с шириной затвора $W_g = 2 \times 80$ мкм и составили $f_T = 0,13$ ТГц и $f_{max} = 0,63$ ТГц. Эти результаты предсказаны в [9, 10] по исследованиям дрейфовой скорости в разрабатываемых наногетероструктурах. В таблице приведено сравнение частотных параметров МНЕМТ-транзисторов, изготовленных при выполнении указанных выше проектов.

В целом разработки и исследования в ТГц-диапазоне частот важны и перспективны с точки зрения гражданского и военного применения. Опыт ИСВЧПЭ РАН по созданию приборов миллиметрового диапазона длин волн с частотами генерации выше 0,5 ТГц позволит перейти в субмиллиметровую область и рассчитывать на $f_{max} > 2$ ТГц. Кроме того, устройства на основе перспективных материалов, например, фотопроводящие антенны на основе низкотемпературного арсенида галлия, уже показывают $f = 1,5$ ТГц.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность А.Ячменеву, Р.Галиеву, Д.Лаврухину за эффективную работу по проблеме и конструктивное обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев П.П., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А. Детектирование в терагерцевом диапазоне. – Нано- и микросистемная техника, 2012, № 2, с. 28-35.

Сравнение частотных параметров изготовленных МНЕМТ-транзисторов

Comparison of the frequency parameters of the manufactured MHEMT-transistors

Ширина затвора W_g , мкм Gate width W_g , micrometers	Частота усиления по току f_T , ТГц Cut-off frequency f_T , THz	Частота генерации f_{max} , ТГц Power gain frequency f_{max} , THz
2x30	0,098	0,53
	0,097	0,61
	0,1	0,51
2x40	0,1	0,59
	0,11 (после пассивации) (after passivation)	0,6
2x60	0,133	0,56
	0,12	0,53
	0,131	0,54
	0,12	0,5
	0,123	0,5
	0,12 (после пассивации) (after passivation)	0,54
2x80	0,14	0,55
	0,134	0,5
	0,132 (после пассивации) (after passivation)	0,63



2. Мальцев П.П., Войцеховский А.В., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Несмелов С.Н. – Детекторы терагерцевого излучения – Наноинженерия в приборостроении, 2012, № 11, с. 7-17.
3. Мальцев П.П., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А. Особенности детектирования в терагерцевом диапазоне. – XVIII Международная научно-техническая конференция "Высокие технологии в промышленности России", 2012, с. 82-90.
4. Kulbachinskii V.A., Yuzeeva N.A., Galiev G.B., Klimov E.A., Vasil'evskii I.S., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Electron effective masses in InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts. – Semiconductor Science and Technology, 2012, v. 27, № 3, p. 035021.
5. Galiev G.B., Vasil'evskii I.S., Pushkarev S.S., Klimov E.A., Imamov R.M., Buffat P.A., Dwir B., Suvorova E.I. Metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs/GaAs HEMT heterostructures containing strained superlattices and inverse steps in the metamorphic buffer. – Journal of Crystal Growth, 2013, v. 366, p. 55-60.
6. Galiev G.B., Pushkarev S.S., Vasil'evskii I.S., Klimov E.A., Imamov R.M., Subbotin I.A., Pavlenko E.S., Kvanin A.L. Structural and Electrophysical Analysis of MHEMT $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ Nanoheterostructures with Different Strain Distributions in Metamorphic Buffer. – Crystallography Reports, 2012, v. 57, No. 6, p. 841-847.
7. Pushkarev S.S., Galiev G.B., Klimov E.A., Lavrukhin D.V., Vasil'evskii I.S., Imamov R.M., Subbotin I.A., Zhigalina O.M., Zhigalina V.G., Buffat P.A., Dwir B., Suvorova E.I. Proc. Int. Conf. Micro- and Nanoelectron (Moscow-Zvenigorod, Russia), 2012, v. 1, p. 3.
8. Мальцев П.П., Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Федоров Ю.В. МHEMT с предельной частотой усиления по мощности $f_{\text{max}} = 0,63$ ТГц на основе наногетероструктуры $\text{In}_{0,42}\text{Al}_{0,58}\text{As}/\text{In}_{0,42}\text{Ga}_{0,58}\text{As}/\text{In}_{0,42}\text{Al}_{0,58}\text{As}/\text{GaAs}$. – Физика и техника полупроводников – в печати (2014).
9. Шилена А., Пожела Ю., Пожела К., Юцене В., Васильевский И.С., Галиев Г.Б., Пушкарев С.С., Климов Е.А. Максимальная дрейфовая скорость электронов в селективно легированных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs с введенной InAs-вставкой. – ФТП, 2013, 47(3), с.348.
10. Požela K., Šilėnas A., Požela J., Jucienė V., Galiev G.B., Vasil'evskii I.S., Klimov E.A. Effects of phonon confinement on high-electric field electron transport in an InGaAs/InAlAs quantum well with an inserted InAs barrier. – Appl. Phys. 2012, A, №109, с.233.

enlargement of the effective area, supporting the wide "hat", which in addition leads to reduction of the noise factor. The zigzag itself has a size up to 200 nm with a period of 4000 nm. The total thickness of the "hat" is 800 nm. Fig.7 demonstrates a scheme and microphoto of the developed gate.

The form of the gate does not influence the frequency parameters of the transistors, because variation of the gate's geometry is considerably less than the wavelength in the working frequency range and is comparable with the effective area of the field control of the channel under the transistor gate. Fig.8 presents SEM images of the zigzag-shaped gate.

MHEMT transistor topology obtained due to a consecutive application of the methods of photolithography, etching and metallization is presented in Fig.9.

Measurements of S-parameters of the test transistors were done in a circuit with a common source in the range of 0.1-67 GHz. Agilent E8361A vector analyzer was connected to MHEMT transistors directly on a plate with the help of pair three-contact probe heads. The results of measurements of the frequency characteristics of the manufactured transistors are presented in Fig.10.

Measurements were done for the transistors located in one and the same working module on the plate. Voltage between the source and the drain U_{DS} was 1.5 V, while voltage between the source and the gate was $U_{GS} = -0.8$ V. The greatest cut-off and power gain frequencies were obtained for a MHEMT transistor with the gate width $W_g = 2 \times 80$ micrometers and were equal to $f_T = 0.13$ THz and $f_{\text{max}} = 0.63$ THz. These results were predicted in [9, 10] researches of the drift velocity in the nanoheterostructures, which are being developed now. The Table gives comparison of the frequency parameters of MHEMT transistors, manufactured within the framework of the above projects.

In general, research and development in THz range of frequencies are important and promising from the point of view of both civil and military applications. Experience of IUHFSE RAS in development of the devices of a mm range, wavelengths with frequencies of generation over 0.5 THz will allow us to enter the sub mm area and to expect $f_{\text{max}} > 2$ THz. Besides, the devices based on promising materials, for example, photoconductive antennas based on low-temperature gallium arsenide already now demonstrate $f = 1.5$ THz.

Authors of the article express their sincere gratitude to A.Yachmenev, R.Galiev, D.Lavrukhin for their efficient cooperation in working on the problem and constructive discussion of the obtained results.