

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 24, № 2, 2022



20 лет ИСВЧПЭ РАН

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) создан 16.04.2002 г. Первым директором и организатором Института являлся член-корреспондент РАН, основатель направления отечественной гетероструктурной электроники Владимир Григорьевич Мокеров (02.05.1940 г. – 23.09.2008 г.). В 2018 г. Институт переименован в Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук.

В течение 20 лет успешной и многогранной деятельности ИСВЧПЭ РАН проводит исследования, связанные с разработкой отечественной оптоэлектронной компонентной базы, работающей в широком диапазоне электромагнитного спектра – от сверх-высоких частот (20...60 ГГц) до терагерцового диапазона (100 ГГц ...6 ТГц).

ИСВЧПЭ РАН активно сотрудничает с ведущими зарубежными научными центрами из Японии, США, Канады, Великобритании, Дании и Польши. За последние 5 лет сотрудниками ИСВЧПЭ РАН опубликовано более 180 статей в журналах, входящих в международные реферируемые базы данных, опубликована монография и получено более 20 результатов интеллектуальной деятельности (патентов на изобретения, топологий и др.).

Сотрудники ИСВЧПЭ РАН имеют целый ряд наград и отличий, включая Медаль Ордена за заслуги перед Отечеством II степени (2021 г.), Премию Правительства Москвы для молодых ученых (2020 г.), Медали РАН для молодых ученых (2018 и 2019 гг.), Гранты Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук (2018 – 2020 гг.), Стипендию Президента РФ (2017 и 2020 гг.) и др.

Директор ИСВЧПЭ РАН,
д.т.н., профессор С.А. Гамкрелидзе



НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 24. № 2 ✧ 2022

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 (РИНЦ) 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

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

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

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

Лабунин 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.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Гамкрелидзе С. А., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Бугаев С. А., Галиев Р. Р., Зуев А. В., Лаврухин Д. В., Михалев А. О., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В., Мальцев П. П. Разработка монолитных интегральных схем на гетероструктурах нитрида галлия 55

Редькин С. В. Лазерная плазмохимия 67

Галиев Г. Б., Климов Е. А., Пушкарев С. С., Сарайкин В. В., Васильевский И. С., Виниченко А. Н., Грехов М. М., Клочков А. Н. Структурные свойства сверхрешеток {LTG-GaAs/GaAs : Si} на подложках GaAs (100) и (111)A 74

Глинский И. А., Ячменев А. Э., Лаврухин Д. В., Хабибуллин Р. А., Гамкрелидзе С. А., Зайцев К. И., Спектор И. Е., Пономарев Д. С. Плазмонные метаповерхности для управления спектром генерации источников терагерцового излучения 81

Галиев Р. Р., Павлов А. Ю., Тарасов Н. С., Томош К. Н. Особенности технологии латерально-связанной брэгговской решетки одночастотных лазерных диодов с распределенной обратной связью 88

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Рубан О. А. Особенности формирования токопроводящих каналов в мемристорах на основе твердых электролитов 92

Хабибуллин Р. А., Пушкарев С. С., Галиев Р. Р., Щаврук Н. В., Дюжиков И. Н., Павловский В. В., Волков О. Ю. Управление спектральными характеристиками излучения квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона 96

Павлов А. Ю., Томош К. Н., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Клековкин А. В., Ивченко И. А. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов на гетероструктуре AlGaIn/GaN с подзатворным заглублением в барьерный слой 103

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)
в редакции журнала
(тел. 8(499) 270-16-52)

Адрес для переписки:

107076, Москва,
ул. Матросская Тишина,
д. 23, стр. 2, оф. 45
e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2022

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 24

No. 2

2022

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
 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. (Phys.-Math.), 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.
 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.

CONTENTS

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Gamkrelidze S. A., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Bugaev S. A., Galiev R. R., Zuev A. V., Lavrukhin D. V., Mikhalev A. O., Pavlov A. Yu., Shchavruk N. V., Maltsev P. P. Development of Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride Heterostructures 55

Red'kin S. V. Laser Plasmachemistry 67

Galiev G. B., Klimov E. A., Pushkarev S. S., Saraykin V. V., Vasil'evskii I. S., Vinichenko A. N., Grekhov M. M., Klochkov A. N. Structural Properties of Superlattices {LTG-GaAs/GaAs : Si} on GaAs (100) and (111)A Substrates 74

Glinitskiy I. A., Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Khabibullin R. A., Gamkrelidze S. A., Zaytsev K. I., Spektor I. E., Ponomarev D. S. Plasmonic Metasurfaces for Controlling the Spectrum of Terahertz Radiation Sources 81

Galiev R. R., Pavlov A. Yu., Tarasov N. S., Tomosh K. N. On The Technology of the Bragg Grating for the Laterally Coupled Single-Mode Distributed Feedback Laser Diodes 88

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Aleshin A. N., Zenchenko N. V., Ruban O. A. Features of the Formation of Conductive Channels in Memristors Based on Solid Electrolytes 92

Khabibullin R. A., Pushkarev S. S., Galiev R. R., Shchavruk N. V., Dyuzhikov I. N., Pavlovskiy V. V., Volkov O. Yu. Tuning of Spectral Characteristics of Terahertz Quantum Cascade Lasers 96

Pavlov A. Yu., Tomosh K. N., Pavlov V. Yu., Slapovskiy D. N., Klekovkin A. V., Ivchenko I. A. High Electron Mobility Transistors On AlGaIn/GaN Heterostructure with Recess in the Barrier Layer 103

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

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.24.55-66

С. А. Гамкрелидзе, д-р техн. наук, проф., директор ИСВЧПЭ РАН,
Д. Л. Гнатюк, канд. техн. наук, зав. лаб., **О. С. Матвеев**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
unicfive@yandex.ru, **С. А. Бугаев**, гл. технолог, зав. лаб., **Р. Р. Галиев**, науч. сотр.,
А. В. Зуев, науч. сотр., **Д. В. Лаврухин**, науч. сотр., **А. О. Михалев**, мл. науч. сотр.,
А. Ю. Павлов, канд. техн. наук, зав. лаб., **Н. В. Щаврук**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Федеральное государственное автономное научное учреждение
Институт сверхвысококачественной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)
П. П. Мальцев^{1,2}, д-р техн. наук, проф., науч. руководитель ИСВЧПЭ РАН, зав. лаб. МИРЭА

¹ Федеральное государственное автономное научное учреждение

Институт сверхвысококачественной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова
Российской академии наук, зав. лабораторией МИРЭА,

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Московский технологический университет" (МИРЭА)

РАЗРАБОТКА МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 14.02.2022

Рассказывается об опыте ИСВЧПЭ РАН в проектировании монолитных интегральных схем на гетероструктурах нитрида галлия и различных подложках: сапфире, кремнии и карбиде кремния в диапазонах частот от 10 до 96 ГГц, это и усилители мощности, маломощные усилители, и комплекты микросхем для целей радиосвязи и радиолокации — генераторы, управляемые напряжением, смесители, умножители, и приемопередающие кристаллы с интегрированными антеннами. Продемонстрировано, что транзисторы НЕМТ на основе нитрида галлия являются хорошим материалом для создания радиостойкой компонентной базы в диапазоне частот до 100 ГГц.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, наногетероструктура нитрида галлия, приемопередающий тракт, маломощный усилитель, смеситель, усилитель мощности, генератор, управляемый напряжением

Введение

Общая мировая тенденция показала, что нитрид галлия был выбран как основной материал для создания следующего поколения радиолокационной аппаратуры и ее компонентов. Основной причиной этому явились большая ширина запрещенной зоны нитрида галлия по сравнению с арсенидом галлия и кремнием, а соответственно, и большие пробивные напряжения, работоспособность в области высоких температур, высокие удельные мощности, стойкость к воздействию внешних и специальных факторов. Успехи

в решении вопросов технологического характера, обеспечившие функциональные параметры, надежность и экономическую целесообразность применения транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия [1, 2] оказали решающее значение в дальнейшем развитии данного направления электроники.

У ИСВЧПЭ РАН большой опыт проектирования и изготовления МИС на гетероструктурах нитрида галлия в различном исполнении: копланарном, микрополосковом с заземляющей плоскостью как снизу,

так и сверху кристалла на подложках из сапфира, кремния и карбида кремния для диапазонов частот от 10 до 100 ГГц [3–43]. В этой обзорной статье представлена часть МИС, разработанных и изготовленных в ИСВЧПЭ РАН.

Усилитель мощности X-диапазона частот

В ИСВЧПЭ РАН разработан усилитель мощности (УМ) на GaN НЕМТ для диапазона частот 8...12 ГГц с выходной мощностью до 2,6 Вт при напряжении питания 30 В и токе потребления 0,6 А [44].

Одним из эффективных способов снижения потребляемой мощности МИС является уменьшение числа каскадов усиления (в идеале — до одного) путем повышения коэффициента усиления единичного каскада. В связи с этим уникальными возможностями обладает каскодная схема включения транзисторов (первый транзистор включен с общим истоком, второй транзистор — с общим затвором), которая особенно интересна при использовании нитрид-галлиевой технологии, так как позволяет технологически совместить два транзистора в одном каскаде и значительно уменьшить его площадь. На рис. 1 представлена фотография кристалла МИС УМ. Входной СВЧ сигнал поступает на два каскодно включенных транзистора с периферией 10×160 мкм каждый, после чего усиленный сигнал суммируется и поступает на выход.

Усилитель был изготовлен как на подложках сапфира, так и на подложке карбида кремния с использованием технологии, предполагающей размещение заземляющей плоскости с лицевой стороны кристалла. Размеры кристалла МИС УМ составляют $1,8 \times 1,9$ мм.

Проведено сравнение характеристик МИС УМ на подложках двух типов — карбиде кремния и сапфире при импульсном напряжении питания 30 В и токе 0,6...0,8 А.

Как видно из рис. 2, при измерении отдельных кристаллов на зондовой станции в импульсном режиме по питанию при длительности импульса 1 мкс,

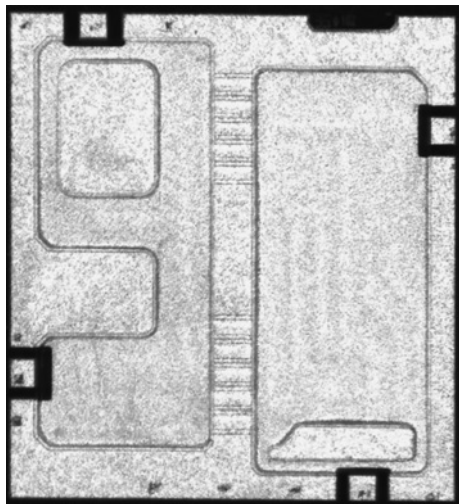


Рис. 1. Фотография кристалла МИС УМ

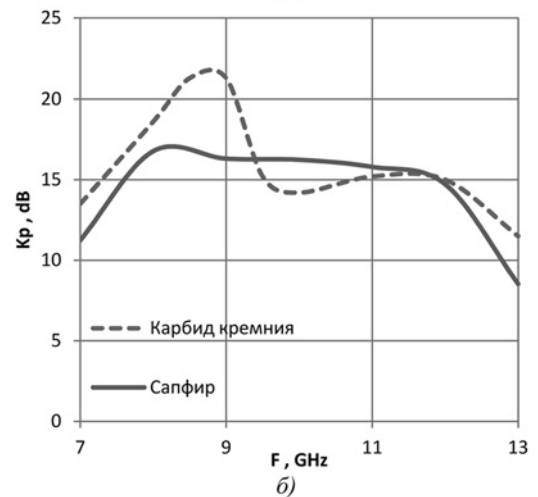
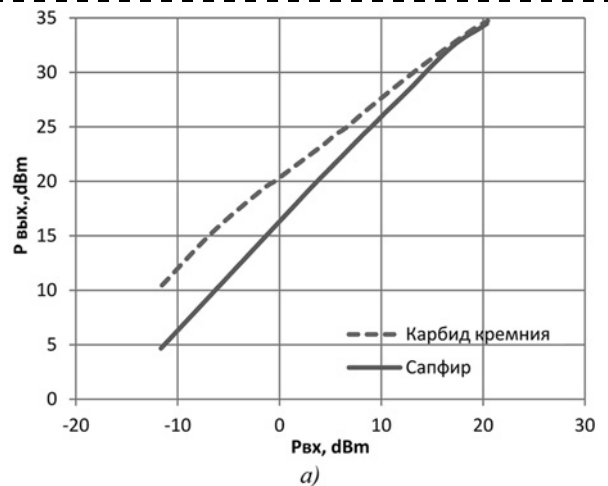


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от входной мощности (а) и амплитудно-частотные характеристики (б) МИС УМ X-диапазона для подложек карбида кремния и сапфира

скважности 99 и напряжении питания 30 В, насыщенная выходная мощность достигает 34,6 дБм (2,9 Вт) при входной мощности 20 дБм для МИС УМ на подложке карбида кремния. Коэффициент усиления составляет более 14 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц. Насыщенная мощность достигает 2,5...3 Вт, ток потребления не более 800 мА.

МИС УМ были установлены на платы Rogers 4003 толщиной 203 мкм с СВЧ разъемами. Под местом монтажа кристаллов предусмотрены металлизированные сквозные отверстия для теплоотвода. Для улучшения теплоотвода платы монтировали на алюминий или медь. На рис. 3 показано фото МИС УМ, установленного на плату.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлены параметры МИС УМ на плате при напряжениях питания от 24 до 50 В, измеренные в импульсном режиме по питанию. Динамические характеристики измеряли на частоте 10 ГГц.

Выходная мощность МИС УМ более 33 дБм в диапазоне 7,5...11 ГГц при напряжении питания 30...40 В. При большем напряжении питания частотный диапа-

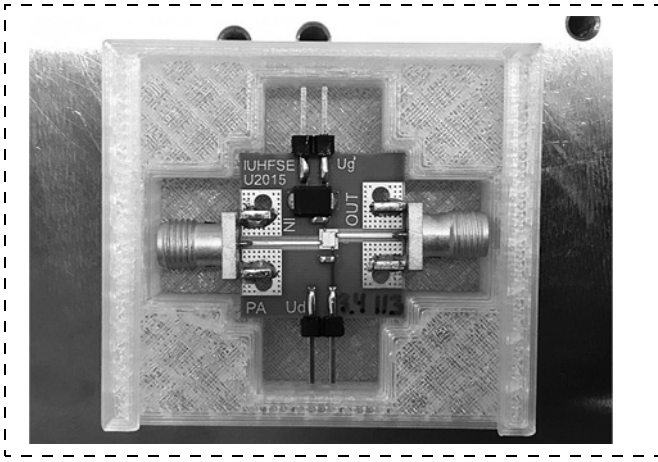


Рис. 3. МИС УМ в оснастке с припаянными разъемами

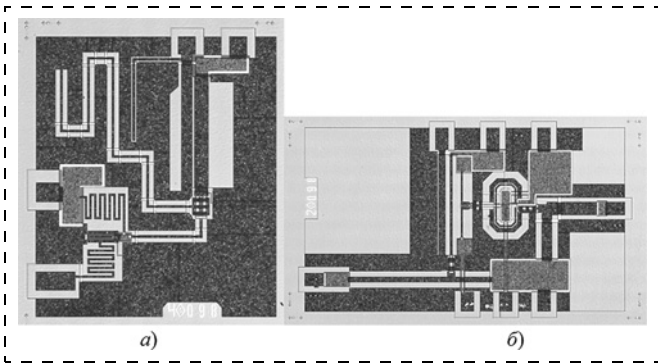


Рис. 5. Фотография кристалла ГУН (а) и ППК (б)

зон увеличивается. Насыщенная выходная мощность достигает 34,8 дБм при напряжении питания 30 В, ток потребления — не более 800 мА.

Макеты приемопередающих трактов для диапазона частот 22...25 ГГц

В последнее время идет активное развитие радиолокационных станций (РЛС) ближнего действия как для автомобильных радаров (24...26 ГГц, 76...77 ГГц), так и для применения в робототехнике. В ИСВЧПЭ РАН были изготовлены макеты приемо-передающих трактов (ППТ) радиолокационных станций ближнего действия (до 10 м) в диапазоне частот 22...25 ГГц на основе комплекта из двух кристаллов: МИС генератора, управляемого напряжением (ГУН), и приемопередающего кристалла (ППК). Комплект МИС изготавливали на гетероструктурах нитрида галлия на подложках сапфира в копланарном исполнении, что позволяет избежать травления отверстий в подложке [45].

Фотография изготовленной МИС ГУН показана на рис. 5, а. Размеры кристалла 1,9 × 1,6 мм. ГУН реализован по схеме индуктивной трехточки на GaN НЕМТ-транзисторе с шириной затворов 4 × 100 мкм. Перестройка частоты генерации осуществляется с помощью варактора, представляющего собой НЕМТ-транзистор в диодном включении. Емкость варактора

регулируется подаваемым на него напряжением управления.

МИС ППК имеет в своем составе маломощный усилитель (МШУ) входного ВЧ сигнала, балансный резистивный смеситель на основе моста Маршанда, усилитель мощности сигнала внешнего гетеродина с делителем. Усиленный сигнал гетеродина разделяется между входом смесителя и выходом ВЧ. На выходе смесителя формируется сигнал на разностной частоте. МШУ и УМ реализованы на НЕМТ-транзисторах в касковом включении с шириной затворов 2 × 130 и 2 × 100 мкм соответственно. Фотография изготовленной МИС ППК показана на рис. 5, б. Размеры кристалла 2,8 × 1,6 мм.

На основе полученных МИС были собраны макеты экспериментальных образцов приемопередающих трактов (ППТ) методом перевернутого монтажа (*flip-chip*) на алюмооксидных платах с глубиной прокисления 50 мкм, изготовленных в АО "НИИ ТП". Монтаж осуществляли в АО "ЗИТЦ". Функциональная схема двухкристального ППТ представлена на рис. 6. ППТ состоит из кристаллов ГУН и ППК, установленных на плату, с ВЧ входом и выходом на антенны, и выходом промежуточной частоты.

Для проведения измерений на алюмооксидную плату устанавливают съемные СВЧ разъемы типа *end launch* для входного и выходного ВЧ сигналов, а также контактное устройство с прижимными контактами, обеспечивающее подачу напряжений питания и снятие выходного сигнала промежуточной частоты через миниатюрный СВЧ разъем. Внешний вид макета в описанной измерительной оснастке показан на рис. 7.

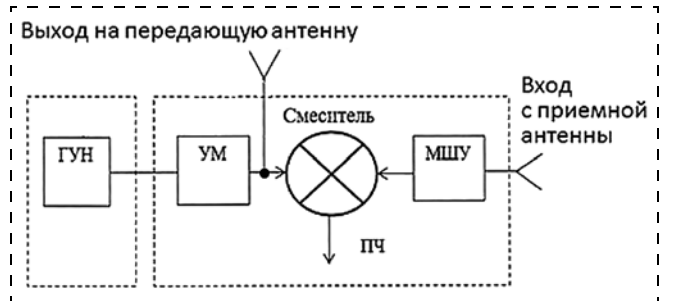


Рис. 6. Функциональная схема двухкристального приемопередающего тракта, состоящего из МИС ГУН и МИС ППК

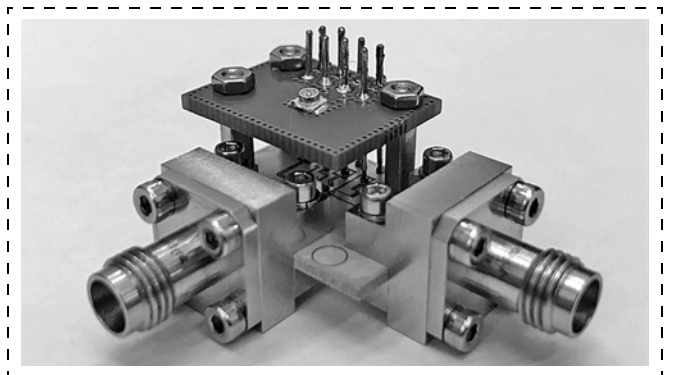


Рис. 7. Макет ППТ в измерительной оснастке

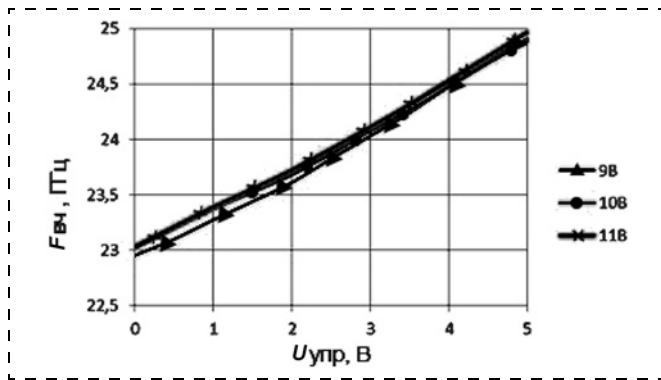


Рис. 8. Зависимость выходной частоты от напряжения управления макета ППТ при напряжениях питания 9, 10 и 11 В

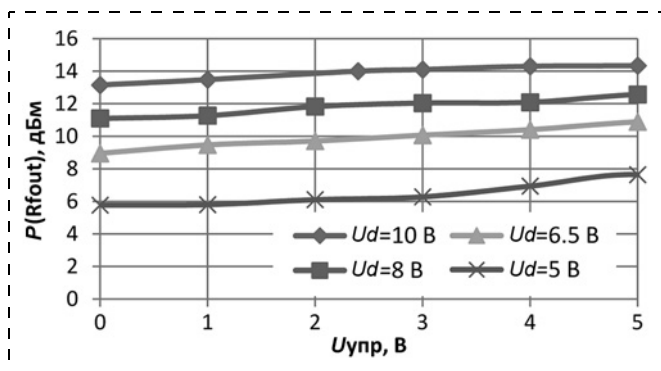


Рис. 9. Типовая зависимость выходной мощности ВЧ сигнала от напряжения управления при различных напряжениях питания макета ППТ

Диапазон перестроения ГУН макетов ППТ составил 0,5...2 ГГц. Частота выходного ВЧ сигнала макетов лежит в пределах 22...25 ГГц при изменении напряжения управления 0...5 В. На рис. 8 представлена зависимость выходной частоты ВЧ сигнала от напряжения управления для значений напряжения питания 9, 10 и 11 В для одного из макетов с максимальным диапазоном перестроения. Изменение частоты выходного сигнала при изменении напряжения питания — не более 50 МГц/В, крутизна перестройки частоты — 400 МГц/В. Разброс выходной мощности макетов ППТ составил 12...15,5 дБм, а коэффициента преобразования — от -0,6 до -7,4 дБ. Типовая зависимость выходной мощности макета ППТ от напряжения управления при напряжениях питания от 5 до 10 В показана на рис. 9. Макеты ППТ работоспособны при снижении напряжения питания вплоть до 5 В с ухудшением параметров. Спектральная плотность фазовых шумов передающего канала

на отстройке 100 кГц составляет -65...-70 дБн/Гц. Макеты ППТ имеют общий ток потребления 190...200 мА при напряжении питания 10 В.

Макеты ППТ в радиолокационном режиме с имитацией принимаемого сигнала от препятствия были проверены в НИУ МИЭТ. Несмотря на относительно высокую спектральную плотность фазовых шумов, во всех образцах оказалось возможным выделить сигнал от препятствия при нормальном (перпендикулярном) направлении к поверхности на расстояниях от 5 до 10 м.

МИС Ка-диапазона на гетероструктурах нитрида галлия на подложках кремния

Впервые в России в ИСВЧПЭ РАН разработаны и изготовлены МИС ГУН и МИС МШУ Ка-диапазона на основе гетероструктур нитрида галлия на подложках кремния диаметром 100 мм. Микросхемы реализованы в микрополосковом исполнении с заземляющими сквозными отверстиями диаметром 50...70 мкм [46].

ГУН рассчитывали по схеме индуктивной трехточки на GaN НЕМТ-транзисторе с шириной затворов 2×50 мкм, аналогичной схеме ГУН, приведенной на рис. 5, а. Отличие заключается в добавлении однокаскадного буферного усилителя для лучшей развязки выходного ВЧ сигнала. В качестве варикапа использован транзистор в диодном включении. Принципиальная схема МИС ГУН представлена на рис. 10, а, а фотография кристалла — на рис. 10, б. Размеры кристалла составили $2,0 \times 1,1$ мм.

На рис. 11 (см. третью сторону обложки) представлены зависимости частоты генерации и выходной

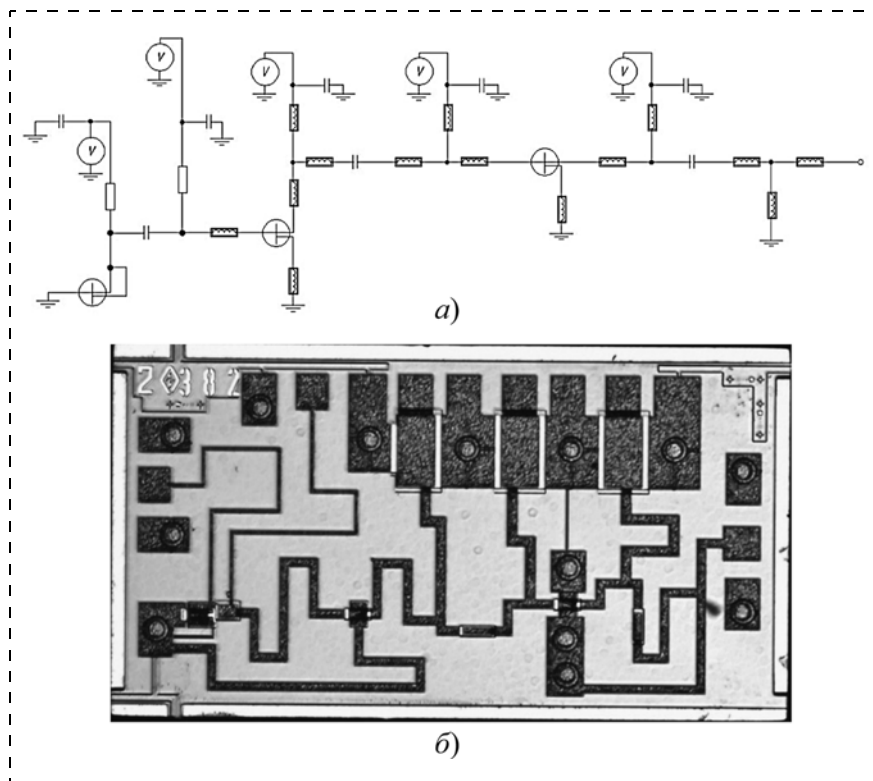


Рис. 10. Принципиальная схема (а) и фотография (б) МИС ГУН

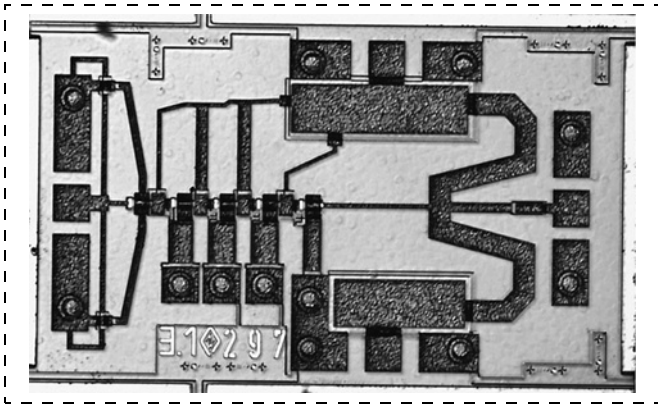


Рис. 12. Фотография МИС МШУ Ka-диапазона частот, изготовленного на подложке кремния

мощности МИС ГУН от напряжения управления в диапазоне 0...5 В для двух образцов. При напряжении питания 5 В выходная мощность достигает 14...16 дБм, ток потребления составил 60 мА. Выходная частота МИС ГУН лежит в диапазоне 31,5...34,3 ГГц, диапазон перестройки достигает 2,5 ГГц. Спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройке 100 кГц составляет -65 дБн/Гц.

МИС МШУ состоит из пяти усилительных каскадов с транзисторами с шириной затворов 2×40 мкм, включенными по схеме с общим истоком. За счет применения цепей автосмещения МШУ работает от источника однополярного питания. При напряжении питания 5 В ток потребления составляет 80...90 мА. В полосе частот 30...45 ГГц МШУ имеет коэффициент усиления до 25 дБ и является хорошо согласованным по входу и выходу. Коэффициент шума находится в пределах 4,5...6 дБ, достигая минимума на частотах 34...38 ГГц. Размеры кристалла $1,75 \times 1,12$ мм. Фотография изготовленной МИС МШУ представлена на рис. 12. Коэффициент усиления и коэффициент шума 10 образцов показаны на рис. 13 (см. третью сторону обложки).

МИС преобразователей частоты диапазона 42...52 ГГц

В ИСВЧПЭ РАН были разработаны и изготовлены МИС преобразования частоты (ПЧ) для передающего и приемного каналов связи в диапазоне частот 42...52 ГГц на основе нитридных гетероструктур на кремниевых подложках для использования в составе малогабаритных приборов с низкой потребляемой мощностью.

Разрабатываемые МИС должны обеспечивать преобразование частоты сигнала из диапазона частот 0,1...6 ГГц в диапазон 42...52 ГГц для передающего канала и преобразование частоты сигнала из диапазона частот 42...52 ГГц в диапазон 0,1...6 ГГц для приемного канала. Преобразователи реализованы в виде двух МИС, у одной из которых приемный канал согласован на диапазон ВЧ сигнала 42...47 ГГц, а передающий канал на диапазон ВЧ сигнала 47...52 ГГц, а

у другой приемный ВЧ сигнал составляет 47...52 ГГц, а ВЧ сигнал передающего канала — 42...47 ГГц.

На рис. 14 представлена структурная схема МИС ПЧ. Как видно из рисунка, каждая МИС ПЧ состоит из усилителя сигнала гетеродина, умножителя на 4, отдельных приемного и передающего каналов, каждый из которых включает усилитель и балансный смеситель. В МИС ПЧ применяют схемы включения транзисторов с автосмещением, что позволяет избежать необходимости в питании отрицательной полярности. МИС реализованы в копланарном исполнении. На рис. 15 представлена фотография МИС ПЧ. Размеры кристалла составили $2,6 \times 2,9$ мм.

В таблице представлены параметры МИС ПЧ, разработанных в ИСВЧПЭ РАН, в сравнении с параметрами ближайших зарубежных аналогов.

В таблице приняты следующие обозначения: RF — радиочастота; LO — частота гетеродина; IF — промежуточная частота; $K_{пр}$ — коэффициент преобразования; NF — коэффициент шума; $I_{пит}$ — ток потребления; P_{LO} — мощность гетеродина; $U_{пит}$ — напряжение питания.

Как видно из таблицы, все аналоги изготовлены на рНЕМТ-транзисторах на гетероструктурах арсе-

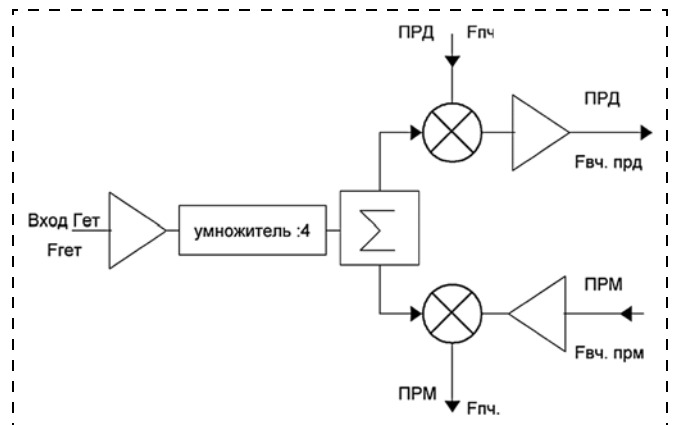


Рис. 14. Структурная схема МИС преобразования частоты диапазона 42...52 ГГц

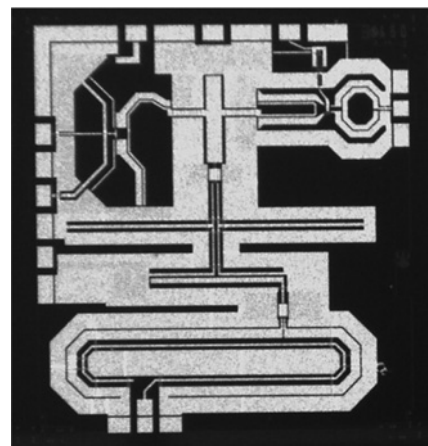


Рис. 15. Фотография МИС ПЧ диапазона 42...52 ГГц

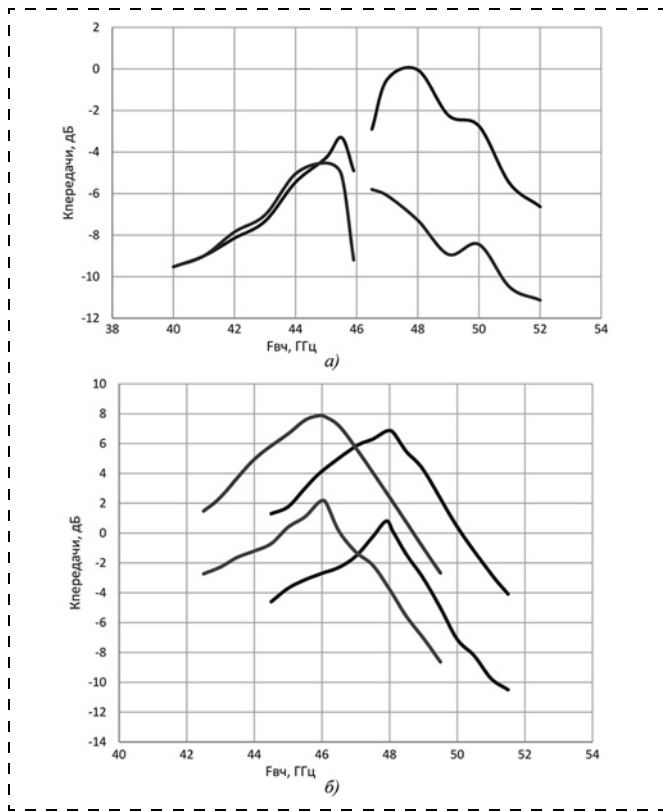


Рис. 16. Зависимость коэффициента передачи приемного (а) и передающего (б) каналов от частоты при напряжении питания 5,5 В и 10 В

нида галлия, и при этом имеют существенно большие токи потребления.

На рис. 16 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи приемного и передающего каналов при напряжениях питания 5,5 и 10 В. Из рисунка видно, что МИС ПЧ работоспособна и при пониженном напряжении питания, однако при этом коэффициент передачи падает на ~6 дБ.

Приемопередающие модули с интегрированными антеннами для V-диапазона частот

В 2015 г. ИСВЧПЭ РАН завершил опытно-конструкторскую работу "Разработка комплекта монолитных интегральных схем 5 мм диапазона длин волн". В ходе работы был разработан комплект микросхем, в состав которого вошли ГУН, балансный смеситель, усилитель миллиметрового диапазона, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), антенна. Помимо этого, были изготовлены усилители с интегрированными приемной и передающей антеннами, а также многофункциональные приемный и приемопередающий преобразователи сигнала в составе ГУН, смеситель, УПЧ [47].

В развитие этой работы были изготовлены интегрированные кристаллы приемопередающих преобразователей сигнала (ПС) миллиметрового диапазона в составе: ГУН, балансный смеситель, МШУ (опционально), приемная и передающая антенны (рис. 17). Сигнал гетеродина, генерируемый ГУН, через дели-

Сравнительные параметры МИС ПЧ с зарубежными аналогами

| Наименование МИС, функция, технология, производитель | Функциональный состав | Основные параметры МИС | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------|---------|---------------|--------|----------------|----------------|---------------|--|
| | | RF, ГГц | LO, ГГц | IF, ГГц | $K_{пр}$, дБ | NF, дБ | $I_{пит}$, мА | P_{LO} , дБм | $U_{пит}$, В | |
| Ближайшие зарубежные аналоги | | | | | | | | | | |
| НМС6789В, I/Q преобразователь вниз для приема, рНЕМТ GaAs, Analog Devices | Усилитель сигнала гетеродина, умножитель $\times 2$ частоты гетеродина, МШУ по входу RF, квадратурный смеситель, выходы IF1 и IF2 ($\Delta\phi = 90^\circ$) | 37...44 | 16,5...24 | 0...4 | 14 | 3,5 | 150 + 75 | 3 | 3,0 | |
| НМС6787А, I/Q преобразователь вверх для передачи, рНЕМТ GaAs Analog Devices | Усилитель сигнала гетеродина, умножитель $\times 2$ частоты гетеродина, УМ по выходу RF, квадратурный смеситель, входы IF1 и IF2 ($\Delta\phi = 90^\circ$) | 37...40 | 16,5...22 | 0...4 | 10 | 10 | 150 + 200 | 4 | 3,0 | |
| TGC4546-SM, I/Q преобразователь вверх для передачи, рНЕМТ GaAs, TriQuint | Усилитель сигнала гетеродина, умножитель $\times 4$ частоты гетеродина, УМ по выходу RF, квадратурный смеситель, входы IF1+, IF2+ и IF1-, IF2- ($\Delta\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) | 36...45 | 8,1...10,4 | 0...3,5 | 11 | 11 | 250 + 230 | 2...8 | 5 | |
| TGC4405-SM, преобразователь вверх для передачи, GaAs, TriQuint | Умножитель $\times 2$ частоты гетеродина, усилитель сигнала гетеродина, балансный смеситель, УМ по выходу RF | 36...45 | 8...13 | 0,5...3 | 13 | — | 425 | 2 | 5 | |
| МИС преобразования частоты, изготовленные в ИСВЧПЭ РАН | | | | | | | | | | |
| МИС преобразования частоты вверх и вниз для приема и передачи | Усилитель сигнала гетеродина, умножитель $\times 4$ частоты гетеродина, балансные смесители приемного и передающего каналов, МШУ и УМ | 42...52 | 11,5...12 | 0,1...6 | -5...-10 | — | 60...65 | 10 | 5...10 | |

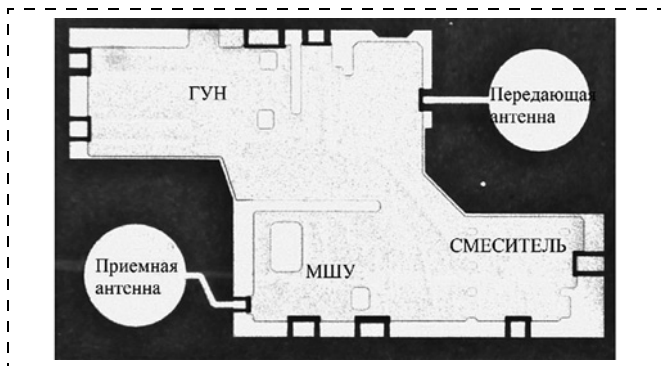


Рис. 17. Фотография МИС приемопередающего ПС для V-диапазона частот

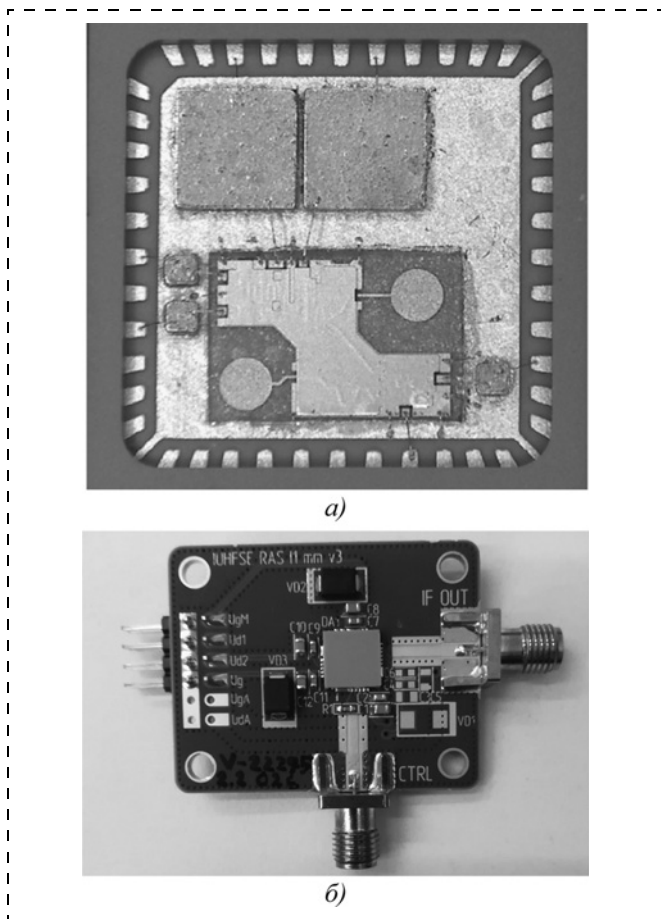


Рис. 18. Кристалл ПС V-диапазона в корпусе (а); образец ППМ с герметично закрытым корпусом на печатной плате (б)

тель мощности подается на передающую антенну и на балансный смеситель. ВЧ сигнал с приемной антенны усиливается МШУ в случае его наличия и поступает на балансный смеситель. В смесителе сигналы гетеродина и ВЧ преобразуются в сигнал промежуточной частоты (ПЧ).

На основе изготовленных кристаллов были собраны образцы приемопередающих модулей (ППМ). Преобразователи сигнала были установлены в металлокерамические корпуса производства АО "НИИПП" (г. Томск) размерами 7×7 мм. Преимуществом интег-

рации антенн на кристалл МИС в диапазоне коротких миллиметров является отсутствие потребности в высокочастотном корпусе, поскольку непосредственно из корпуса на плату выводится сигнал промежуточной частоты. Фотография кристалла, установленного в корпус, представлена на рис. 18, а; внутри корпуса дополнительно расположены развязывающие керамические конденсаторы. Монтаж корпуса осуществляли на специально разработанную плату, после установки на которую корпус герметично закрывали крышкой (рис. 18, б).

На рис. 19 представлены параметры образца ППМ в корпусе до и после герметизации радиопрозрачной крышкой. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) составила около 12 дБм, а диапазон перестройки $67,3...68,7$ ГГц. Измерения проводили при напряжении питания 8 В, ток потребления составил около 50 мА. Из приведенных зависимостей видно, что герметизация крышкой не ухудшила параметры образца. При этом на участке максимальной крутизны перестройки (6 В по напряжению управления) наблюдается рост излучаемой мощности после монтажа крышки.

Усилитель мощности W-диапазона частот

На рис. 20 представлена схема отдельного каскада и фотография трехкаскадного усилителя W-диапазона (диапазона частот $84...96$ ГГц). Усилитель изготовлен в ИСВЧПЭ РАН на гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN

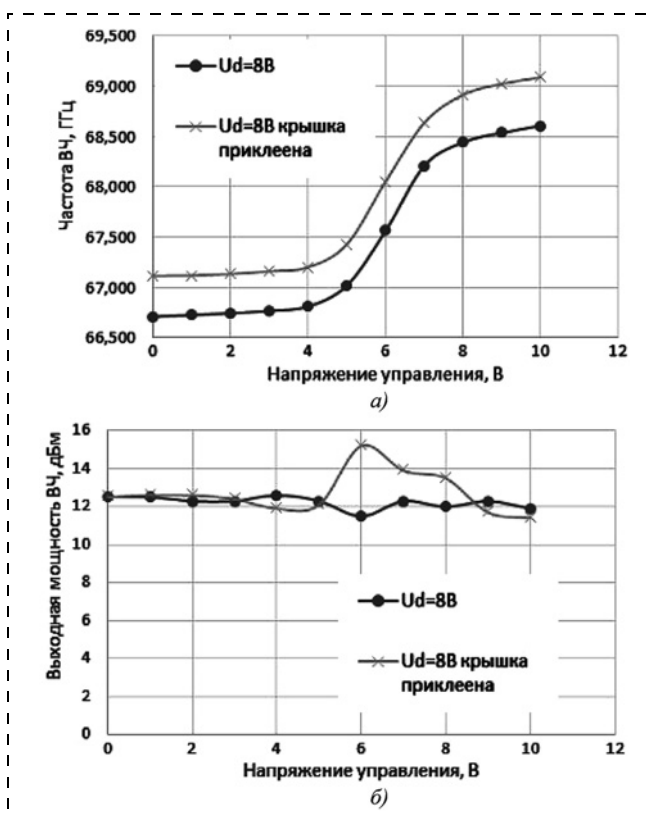


Рис. 19. Диапазон перестройки (а) и ЭИИМ (б) образца ППМ V-диапазона

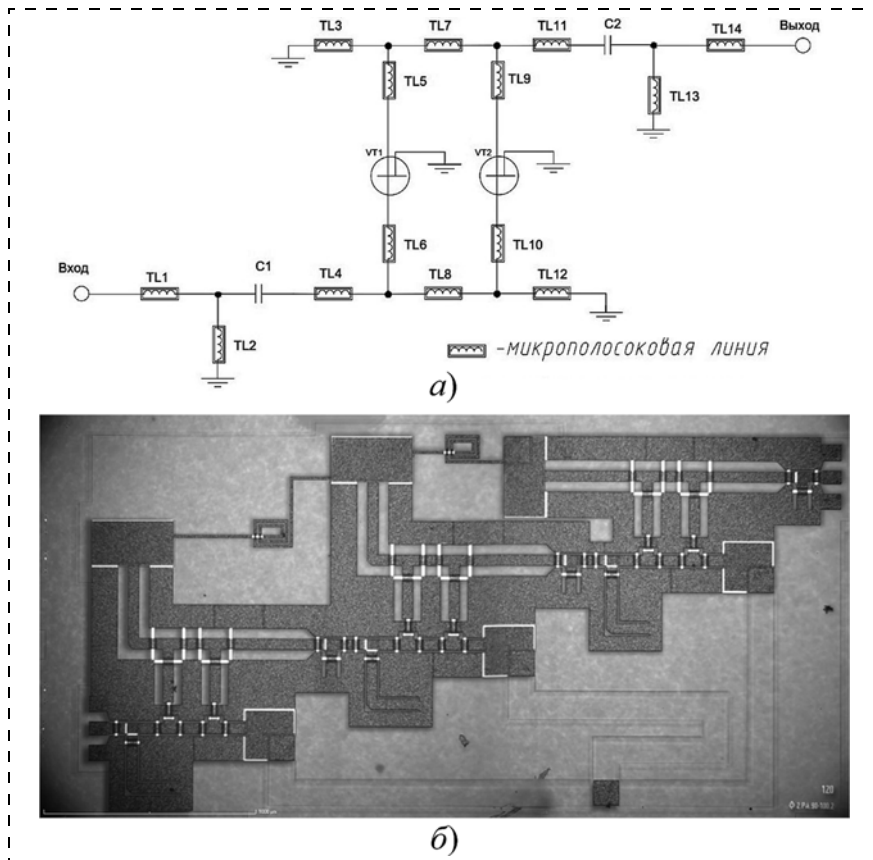


Рис. 20. Схема отдельного каскада (а) и фотография изготовленного трехкаскадного усилителя W-диапазона (б)

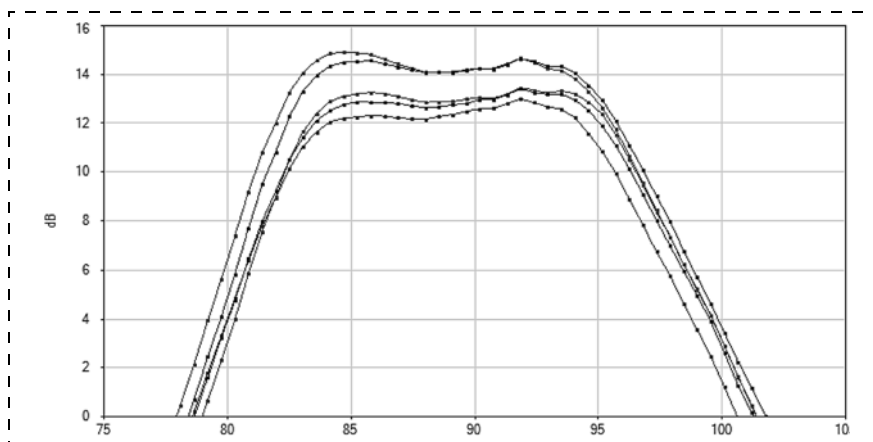


Рис. 21. Результаты измерения коэффициента передачи S21 пяти усилителей W-диапазона

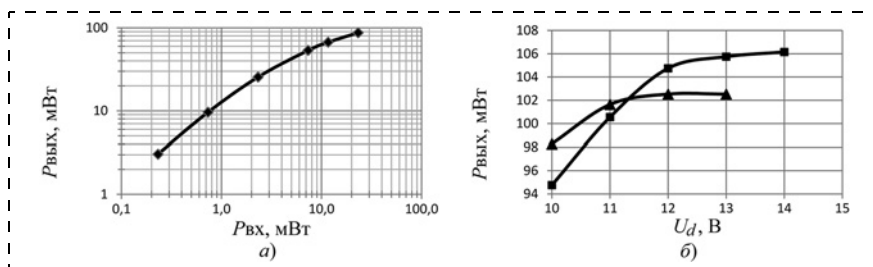


Рис. 22. Динамическая характеристика усилителя W-диапазона на частоте 92 ГГц (а) и зависимость выходной мощности усилителя от напряжения питания на частотах 92 и 94 ГГц при входной мощности 16,87 мВт (б)

производства ЗАО "Элма-Малахит" на подложках карбида кремния [48]. За основу отдельного каскада взята схема с суммированием мощности на основе транзисторов с шириной затвора 2×50 мкм. Был выбран вариант копланарного исполнения, что позволило избежать необходимости травления сквозных заземляющих отверстий. Размеры кристалла составили $3,9 \times 2,1$ мм.

Результаты измерения малосигнальных S-параметров трехкаскадных усилителей при напряжении питания 10 В и токе потребления 100...170 мА приведены на рис. 21 и имеют коэффициент усиления (S21) не менее 12 дБ при коэффициенте стоячей волны по входу и выходу не более 2. В полосе 84...96 ГГц неравномерность не превышает 1 дБ, а максимальный коэффициент усиления составляет 14,5 дБ на частотах 85 и 92 ГГц.

На рис. 22 представлена динамическая характеристика усилителя на частоте 92 ГГц и зависимость выходной мощности усилителя от напряжения питания для частот 92 и 94 ГГц. Максимальная насыщенная выходная мощность составила 20,26 дБм (106 мВт) при входной мощности 12,2 дБм, напряжении питания 14 В и токе потребления 245 мА на частоте 94 ГГц.

Заключение

В ИСВЧПЭ РАН разработан ряд микросхем на основе нитрида галлия для диапазонов частот от 10 до 100 ГГц. Это и отдельные электронные компоненты такие, как усилители мощности, мал шумящие усилители, смесители, генераторы, управляемые напряжением, и многофункциональные интегральные схемы, в состав которых входят смесители, усилители, умножители, генераторы и антенны. ИСВЧПЭ РАН в своей работе использовал гетероструктуры нитрида галлия отечественного и зарубежного производства на подложках сапфира, кремния и карбида кремния. МИС изготавливали как в копланарном, так и в микрополосковом исполнении с реализацией земляной плоскости поверх кристалла и с обратной стороны кристалла. Разработанные

МИС обладают радиационной стойкостью и могут быть использованы в системах беспроводной передачи данных и связи, и радиолокации.

Список литературы

1. Medjdoub F., Iniewski K. Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices and Technology // CRC Press. 2016. 372 p.
2. Deo N. High Performance Transmitters for Small Satellites for Data Transmission and Remote Sensing // 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. 2019. P. 1—6.
3. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 5 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2011630058 от 05.05.2011 г.
4. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 10—12 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2011630059 от 05.05.2011 г.
5. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Широкополосный малошумящий усилитель" / Свидетельство о государственной регистрации № 2011630032 от 04.02.2011 г.
6. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Монолитный интегральный трехкаскадный малошумящий усилитель КВЧ диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2011630034 от 11.02.2011 г.
7. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Монолитный интегральный ультраширокополосный усилитель мощности диапазона 0,01—4 ГГц на гетероструктурах AlGaIn/GaN" / Свидетельство о государственной регистрации № 2011630033 от 11.02.2011 г.
8. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Монолитный интегральный широкополосный усилитель мощности Ka-диапазона на гетероструктурах AlGaIn/GaN" / Свидетельство о государственной регистрации № 2011630053 от 18.04.2011 г.
9. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Прямоугольный интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 5 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630001 от 10.01.2012 г.
10. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Прямоугольный интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 10—12 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630008 от 10.01.2012 г.
11. Лопарев А. В., Зуев А. В. Топология ИМС "Генератор Ku-диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630022 от 6.02.2012 г.
12. Белкин М. Е., Белкин Л. М., Зуев А. В. Топология ИМС "Резистивный смеситель с субгармонической накачкой КВЧ диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630021 от 6.02.2012 г.
13. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Матвеев О. С., Лишицкий А. П. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 5 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630102 от 3.08.2012 г.
14. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Матвеев О. С., Лишицкий А. П. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 10—12 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630103 от 3.08.2012 г.
15. Мальцев П. П., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Емкостной микрорелектромеханический шунтирующий переключатель для диапазона 10—12 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2012630153 от 30.10.2012 г.
16. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Кузнецова Т. И., Майтама М. В., Галиев Р. Р. Топология ИМС "Двухкаскадный усилитель мощности W-диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2013630036 от 19.02.2013 г.
17. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Кузнецова Т. И., Майтама М. В., Галиев Р. Р. Топология ИМС "Трехкаскадный усилитель мощности W-диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2013630035 от 19.02.2013 г.
18. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Преобразователь сигнала для диапазона 57—64 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2013630171 от 05.12.2013 г.
19. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57—64 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2013630159 от 06.11.2013 г.
20. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С. Топология ИМС "Смеситель на балунах Маршанда для диапазона 60 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2014630051 от 19.02.2014 г.
21. Федоров Ю. В., Зуев А. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Монолитный усилитель с выходной мощностью 5 Вт диапазона частот 0,8—2,0 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2014630052 от 19.02.2014 г.
22. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Галиев Р. Р. Топология ИМС "Двухкаскадный малошумящий усилитель W-диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2014630155 от 19.12.2014 г.
23. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Однокаскадный малошумящий усилитель W-диапазона" / Свидетельство о государственной регистрации № 2015630132 от 02.12.2015 г.
24. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 57—64 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 02.12.2015 г.
25. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Крапухин Д. В., Путинцев Б. Г. Топология ИМС "Интегрированный приемо-передающий модуль для диапазона частот 57—64 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2016630080 от 12.07.2016 г.
26. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный СВЧ переключатель 1×2 для диапазона 4—18 ГГц в копланарном исполнении" / Свидетельство о государственной регистрации № 2016630003 от 11.01.2016 г.
27. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный усилитель мощности для диапазона частот 8—12 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2016630104 от 19.08.2016 г.
28. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный малошумящий усилитель для диапазона частот 8—12 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2016630103 от 19.08.2016 г.
29. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Усилитель мощности для диапазона частот 42—46 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630015 от 16.01.2017 г.
30. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. Топология ИМС "Приемо-передающий модуль для диапазона частот 23—25 ГГц в составе: ГУН с буферным усилителем, балансный смеситель, МШУ" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630076 от 04.04.2017 г.
31. Федоров Ю. В. Топология ИМС "Приемо-передающий модуль для диапазона частот 23—25 ГГц в составе: малошумящий усилитель, балансный смеситель, умножитель

частоты" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630091 от 30.05.2017 г.

32. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "Двойной балансный смеситель для диапазона частот 32—36 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630085 от 05.02.2017 г.

33. **Федоров Ю. В., Зуев А. В.** Топология ИМС "Усилитель промежуточной частоты" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630087 от 05.03.2017 г.

34. **Федоров Ю. В., Матвеев О. С.** Топология ИМС "Генератор управляемый напряжением для диапазона частот 32—36 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630088 от 05.03.2017 г.

35. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "Малозумящий усилитель для диапазона частот 32—36 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2017630089 от 05.03.2017 г.

36. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "Преобразователь сигнала для диапазона частот 18—25 ГГц в составе: усилитель мощности, балансный смеситель, малозумящий усилитель" / Свидетельство о государственной регистрации № 2020630259 от 23.12.2020 г.

37. **Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Мальцев П. П., Крапучин Д. В., Путинцев Б. Г.** Топология ИМС "Интегрированный приемно-передающий модуль с квадратными антеннами в составе: генератор, управляемый напряжением; усилитель мощности; смеситель; малозумящий усилитель для диапазона частот 57—70 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2020630258 от 23.12.2020 г.

38. **Матвеев О. С.** Топология ИМС "Генератор управляемый напряжением для диапазона частот 18—25 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2021630005 от 12.01.2021 г.

39. **Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Мальцев П. П., Крапучин Д. В., Путинцев Б. Г.** Топология ИМС "Интегрированный приемно-передающий модуль с круглыми антеннами в составе: генератор, управляемый напряжением; усилитель мощности; смеситель для диапазона частот 57—70 ГГц" / Свидетельство о государственной регистрации № 2021630004 от 12.01.2021 г.

40. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "МИС преобразователя частоты с приемным каналом 26—32 ГГц, передающим каналом 32—38 ГГц и умножителем частоты гетеродина на четыре" / Свидетельство о государственной регистрации № 2021630018 от 21.01.2021 г.

41. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "МИС преобразователя частоты с приемным каналом 32—38 ГГц, передающим

каналом 26—32 ГГц и умножителем частоты гетеродина на четыре" / Свидетельство о государственной регистрации № 2021630022 от 22.01.2021 г.

42. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "МИС преобразователя частоты с приемным каналом 42—48 ГГц, передающим каналом 48—54 ГГц и умножителем частоты гетеродина на четыре" / Свидетельство о государственной регистрации № 2021630020 от 22.01.2021 г.

43. **Федоров Ю. В.** Топология ИМС "МИС преобразователя частоты с приемным каналом 48—54 ГГц, передающим каналом 42—48 ГГц и умножителем частоты гетеродина на четыре" / Свидетельство о государственной регистрации № 2021630021 от 22.01.2021 г.

44. **Гамкрелидзе С. А., Гнатюк Д. Л., Зенченко Н. В., Зуев А. В., Мальцев П. П., Матвеев О. С., Михалев А. О., Павлов А. Ю.** Монолитные интегральные схемы на НЕМТ GaN для СВЧ-модуля с выходной мощностью 2,5 Вт и усилением 30 дБм в X-диапазоне // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. 2021. Вып. 4 (551). С. 15—24.

45. **Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Бугаев А. С., Павлов А. Ю., Гамкрелидзе С. А., Галиев Р. Р., Зуев А. В., Федоров Ю. В., Лаврухин Д. В., Михалев А. О., Зенченко Н. К.** Монолитные интегральные схемы на основе нитрида галлия для радиолокации ближнего действия и средств связи в диапазоне частот 22...25 ГГц // Микроэлектроника. 2022. № 3.

46. **Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Гамкрелидзе С. А., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Павлов А. Ю., Галиев Р. Р., Зуев А. В., Майтама М. В., Шаврук Н. В., Томош К. Н.** Монолитные интегральные схемы Ku и Ka диапазонов длин волн на основе нитрида галлия на подложках кремния. Микроэлектроника. 2021. Т. 50, № 3.

47. **Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Павлов А. Ю., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Томош К. Н., Енюшкина Е. Н., Галиев Р. Р., Майтама М. В., Зуев А. В., Крапучин Д. В., Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П.** Особенности технологии изготовления и разработки СВЧ МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона // Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника. 2020. Вып. 1 (544).

48. **Gnatyuk D. L., Galiev R. R., Zuev A. V., Krapukhina S. L., Maitama M. V., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Yu. V.** Microwave Characteristics of Amplifiers on Nanoheterostructures of Gallium Nitride in the 80—100 GHz Frequency Range // Russian microelectronics. 2020. Vol. 49, N. 6.

S. A. Gamkrelidze, Director of IUHFSE RAS, **D. L. Gnatyuk**, Head of the laboratory, **O. S. Matveenko**, Senior Researcher, unicfive@yandex.ru, **S. A. Bugaev**, Chief technologist, **R. R. Galiev**, Researcher, **A. V. Zuev**, Researcher, **D. V. Lavrukhin**, Researcher, **A. O. Mikhalev**, Junior Researcher, **A. Yu. Pavlov**, head of the laboratory, **N. V. Shchavruk**, Senior Researcher, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, IUHFSE RAS, Moscow, 117105, Russian Federation **P. P. Maltsev**, Scientific Supervisor, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, IUHFSE RAS, Head of the Laboratory, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "MIREA — Russian Technological University"

Corresponding author:

Matveenko Olga S., Senior Researcher, IUHFSE RAS, Moscow, 117105, unicfive@yandex.ru

Development of Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride Heterostructures

Received on February 14, 2022

Accepted on February 18, 2022

The article describes IUHFSE RAS experience in designing MMICs based on gallium nitride heterostructures on various types of substrates: sapphire, silicon and silicon carbide in the frequency range from 10 GHz to 96 GHz. Such as power amplifiers, low-noise amplifiers, and a chipset for radio communications and radiolocation: voltage-controlled oscillators, mixers, multipliers, and transceiver MMIC with integrated antennas. HEMT transistors based on gallium nitride are a suitable for creating a radiation resistant components for frequencies up to 100 GHz.

Keywords: monolithic integrated circuit, gallium nitride heterostructure, transmitting and receiving paths, low-noise amplifier, mixer, power amplifier, voltage-controlled oscillator

For citation:

Gamkrelidze S. A., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Bugaev S. A., Galiev R. R., Zuev A. V., Lavrukhin D. V., Mikhalev A. O., Pavlov A. Yu., Shchavruk N. V., Maltsev P. P. Development of Monolithic Integrated Circuits on Gallium Nitride Heterostructures, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 55–66.

DOI: 10.17587/nmst.24.55-56

References

1. Medjdoub F., Iniewski K. Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices and Technology // CRC Press. 2016. 372 p.
2. Deo N. High Performance Transmitters for Small Satellites for Data Transmission and Remote Sensing // 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. 2019. P. 1–6.
3. Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Integral'nyj antennoj element so vstroennym maloshumyashchim usilitelem dlya diapazona 5 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2011630058 ot 05.05.2011 g.
4. Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Integral'nyj antennoj element so vstroennym maloshumyashchim usilitelem dlya diapazona 10–12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2011630059 ot 05.05.2011 g.
5. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Shirokopolosnyj maloshumyashchij usilitel'", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2011630032 ot 04.02.2011 g.
6. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Monolitnyj integral'nyj trekhkaskadnyj maloshumyashchij usilitel' KVCH diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2011630034 ot 11.02.2011 g.
7. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Monolitnyj integral'nyj ul'trashirokopolosnyj usilitel' moshchnosti diapazona 0,01–4 GGc na geterostrukturah AlGaN/GaN", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2011630033 ot 11.02.2011 g.
8. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Monolitnyj integral'nyj shirokopolosnyj usilitel' moshchnosti Ka-diapazona na geterostrukturah AlGaN/GaN", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2011630053 ot 18.04.2011 g.
9. Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Pryamougol'nyj integral'nyj antennoj element so vstroennym maloshumyashchim usilitelem dlya diapazona 5 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630001 ot 10.01.2012 g.
10. Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. Topologiya IMS "Pryamougol'nyj integral'nyj antennoj element so vstroennym maloshumyashchim usilitelem dlya diapazona 10–12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630008 ot 10.01.2012 g.
11. Loparev A. V., Zuev A. V. Topologiya IMS "Generator Ku-diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630022 ot 6.02.2012 g.
12. Belkin M. E., Belkin L. M., Zuev A. V. Topologiya IMS "Rezistivnyj smesitel' s subgarmonicheskoy nakachkoj KVCH diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630021 ot 6.02.2012 g.
13. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Matveenko O. S., Lisickij A. P. Topologiya IMS "Integral'nyj antennoj element so vstroennym usilitelem moshchnosti dlya diapazona 5 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630102 ot 3.08.2012 g.
14. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Matveenko O. S., Lisickij A. P. Topologiya IMS "Integral'nyj antennoj element so vstroennym usilitelem moshchnosti dlya diapazona 10–12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630103 ot 3.08.2012 g.
15. Mal'cev P. P., Pavlov A. Yu., Shchavruk N. V., Majtama M. V. Topologiya IMS "Emkostnoj mikroelektromekhanicheskij shuntiruyushchij pereklyuchatel' dlya diapazona 10–12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2012630153 ot 30.10.2012 g.
16. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Kuznecova T. I., Majtama M. V., Galiev R. R. Topologiya IMS "Dvuhkaskadnyj usilitel' moshchnosti W-diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630036 ot 19.02.2013 g.
17. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Kuznecova T. I., Majtama M. V., Galiev R. R. Topologiya IMS "Trekhkaskadnyj usilitel' moshchnosti W-diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630035 ot 19.02.2013 g.
18. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Zuev A. V. Topologiya IMS "Preobrazovatel' signala dlya diapazona 57–64 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630171 ot 05.12.2013 g.
19. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Zuev A. V. Topologiya IMS "Integral'nyj antennoj element so vstroennym maloshumyashchim usilitelem dlya diapazona 57–64 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630159 ot 06.11.2013 g.

20. **Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S.** Topologiya IMS "Smesitel' na balunah Marshanda dlya diapazona 60 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2014630051 ot 19.02.2014 g.
21. **Fedorov Yu. V., Zuev A. V., Gnatyuk D. L.** Topologiya IMS "Monolitnyj usilitel' s vyhodnoj moshchnost'yu 5 Vt diapazona chastot 0,8—2,0 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2014630052 ot 19.02.2014 g.
22. **Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Zuev A. V., Galiev R. R.** Topologiya IMS "Dvuhkaskadnyj maloshumyashchij usilitel' W-diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2014630155 ot 19.12.2014 g.
23. **Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L.** Topologiya IMS "Odnokaskadnyj maloshumyashchij usilitel' W-diapazona", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015630132 ot 02.12.2015 g.
24. **Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Zuev A. V.** Topologiya IMS "Integral'nyj antennyj element so vstroennym usilitelem moshchnosti dlya diapazona 57—64 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015630131 ot 02.12.2015 g.
25. **Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Krapuhin D. V., Putincev B. G.** Topologiya IMS "Integrirovannyj priemo-peredayushchij modul' dlya diapazona chastot 57—64 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2016630080 ot 12.07.2016 g.
26. **Fedorov Yu. V., Majtama M. V.** Topologiya IMS "Integral'nyj SVCH pereklyuchatel' 1×2 dlya diapazona 4—18 GGc v koplanarnom ispolnenii", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2016630003 ot 11.01.2016 g.
27. **Fedorov Yu. V., Majtama M. V.** Topologiya IMS "Integral'nyj usilitel' moshchnosti dlya diapazona chastot 8—12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2016630104 ot 19.08.2016 g.
28. **Fedorov Yu. V., Majtama M. V.** Topologiya IMS "Integral'nyj maloshumyashchij usilitel' dlya diapazona chastot 8—12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2016630103 ot 19.08.2016 g.
29. **Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L.** Topologiya IMS "Usilitel' moshchnosti dlya diapazona chastot 42—46 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630015 ot 16.01.2017 g.
30. **Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L.** Topologiya IMS "Priemo-peredayushchij modul' dlya diapazona chastot 23—25 GGc v sostave: GUN s bufernym usilitelem, balansnyj smesitel', MSHU", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630076 ot 04.04.2017 g.
31. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "Priemo-peredayushchij modul' dlya diapazona chastot 23—25 GGc v sostave: maloshumyashchij usilitel', balansnyj smesitel', umnozhitel' chastoty", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630091 ot 30.05.2017 g.
32. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "Dvojnoj balansnyj smesitel' dlya diapazona chastot 32—36 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630085 ot 05.02.2017 g.
33. **Fedorov Yu. V., Zuev A. V.** Topologiya IMS "Usilitel' promezhutochnoj chastoty", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630087 ot 05.03.2017 g.
34. **Fedorov Yu. V., Matveenko O. S.** Topologiya IMS "Generator upravlyaemij napryazheniem dlya diapazona chastot 32—36 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630088 ot 05.03.2017 g.
35. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "Maloshumyashchij usilitel' dlya diapazona chastot 32—36 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2017630089 ot 05.03.2017 g.
36. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "Preobrazovatel' signala dlya diapazona chastot 18—25 GGc v sostave: usilitel' moshchnosti, balansnyj smesitel', maloshumyashchij usilitel'", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2020630259 ot 23.12.2020 g.
37. **Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Mal'cev P. P., Krapuhin D. V., Putincev B. G.** Topologiya IMS "Integrirovannyj priemo-peredayushchij modul' s kvadratnymi antennami v sostave: generator, upravlyaemij napryazheniem; usilitel' moshchnosti; smesitel'; maloshumyashchij usilitel' dlya diapazona chastot 57—70 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2020630258 ot 23.12.2020 g.
38. **Matveenko O. S.** Topologiya IMS "Generator upravlyaemij napryazheniem dlya diapazona chastot 18—25 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2021630005 ot 12.01.2021 g.
39. **Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Mal'cev P. P., Krapuhin D. V., Putincev B. G.** Topologiya IMS "Integrirovannyj priemo-peredayushchij modul' s kruglymi antennami v sostave: generator, upravlyaemij napryazheniem; usilitel' moshchnosti; smesitel' dlya diapazona chastot 57—70 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2021630004 ot 12.01.2021 g.
40. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "MIS preobrazovatelya chastoty s priemnym kanalom 26—32 GGc, peredayushchim kanalom 32—38 GGc i umnozhitel' chastoty geterodina na chetyre", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2021630018 ot 21.01.2021 g.
41. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "MIS preobrazovatelya chastoty s priemnym kanalom 32—38 GGc, peredayushchim kanalom 26—32 GGc i umnozhitel' chastoty geterodina na chetyre", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2021630022 ot 22.01.2021 g.
42. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "MIS preobrazovatelya chastoty s priemnym kanalom 42—48 GGc, peredayushchim kanalom 48—54 GGc i umnozhitel' chastoty geterodina na chetyre", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2021630020 ot 22.01.2021 g.
43. **Fedorov Yu. V.** Topologiya IMS "MIS preobrazovatelya chastoty s priemnym kanalom 48—54 GGc, peredayushchim kanalom 42—48 GGc i umnozhitel' chastoty geterodina na chetyre", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2021630021 ot 22.01.2021 g.
44. **Gamkrelidze S. A., Gnatyuk D. L., Zenchenko N. V., Zuev A. V., Mal'cev P. P., Matveenko O. S., Mihalev A. O., Pavlov A. Yu.** Monolitnye integral'nye skhemy na HEMT GaN dlya SVCH-modulya s vyhodnoj moshchnost'yu 2,5 Vt i usileniem 30 dBm v H-diapazone, *Elektronnaya tekhnika, ser. 1, SVCH-tehnika*, 2021, is. 4 (551), pp. 15—24 (in Russian).
45. **Matveenko O. S., Gnatyuk D. L., Bugaev A. S., Pavlov A. Yu., Gamkrelidze S. A., Galiev R. R., Zuev A. V., Fedorov Yu. V., Lavruhin D. V., Mihalev A. O., Zenchenko N. K.** Monolitnye integral'nye skhemy na osnove nitrida galliya dlya radiolokacii blizhnego dejstviya i sredstv svyazi v diapazone chastot 22...25 GGc, *Mikroelektronika*, 2022, vol. 51, no. 3 (in Russian).
46. **Fedorov Yu. V., Bugaev A. S., Gamkrelidze S. A., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Pavlov A. Yu., Galiev R. R., Zuev A. V., Majtama M. V., SHCHavruk N. V., Tomosh K. N.** Monolitnye integral'nye skhemy ku i ka diapazonov dlin voln na osnove nitrida galliya na podlozhkah kremniya. *Mikroelektronika*, 2021, T. 50, № 3. (in Russian).
47. **Fedorov Yu. V., Bugaev A. S., Pavlov A. Yu., Gnatyuk D. L., Matveenko O. S., Pavlov V. Yu., Slapovskij D. N., Tomosh K. N., Enyushkina E. N., Galiev R. R., Majtama M. V., Zuev A. V., Krapuhin D. V., Gamkrelidze S. A., Mal'cev P. P.** Osobennosti tekhnologii izgotovleniya i razrabotki SVCH MIS na osnove nitrida galliya dlya millimetrovogo diapazona, *Elektronnaya tekhnika, Ser. 1, SVCH-tehnika*, 2020, iss. 1 (544). (in Russian).
48. **Gnatyuk D. L., Galiev R. R., Zuev A. V., Krapukhina S. L., Maitama M. V., Maltsev P. P., Matveenko O. S., Fedorov Yu. V.** Microwave Characteristics of Amplifiers on Nanoheterostructures of Gallium Nitride in the 80—100 GHz Frequency Range, *Russian microelectronics*, 2020, vol. 49, no. 6.

С. В. Редькин, канд. тех. наук, вед. науч. сотр., ИСВЧПЭ РАН,
ст. науч. сотр. РТУ МИРЭА, e-mail: sergeiredckin@yandex.ru

Федеральное государственное автономное научное учреждение
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,
"МИРЭА — Российский технологический университет", Москва

ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМОХИМИЯ

Поступила в редакцию 14.12.2021

Проанализировано большинство существующих на сегодняшний день лазерных методов разделения пластин на кристаллы. Предложен способ исключения перегрева подложки, ее расплава, модификации и выброса материала на поверхность — локальное лазерное плазмохимическое травление на примере поликристаллического алмаза и монокристаллического сапфира. Диапазон рабочих давлений $6 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ Торр.

Ключевые слова: лазер, плазмохимическое травление, поликристаллический алмаз, монокристаллический сапфир, пластина, кристалл

Введение

Все существующие на сегодняшний день лазерные методы разделения пластин на кристаллы (фрагментирование) основаны на термическом воздействии на твердое тело (материал пластины). Закономерности термического воздействия лазерного излучения хорошо и полно рассмотрены в работе [1] и представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в зависимости от подведенной энергии воздействия на твердое тело различны — от простого нагрева до плавления, закипания и выброса материала подложки на ее поверхность. При этом протекают различные физические процессы:

- при простом нагреве подведенная энергия рассеивается в кристаллической решетке пластины и никаких изменений материала не происходит;



Рис. 1. Закономерности воздействия лазерного излучения на твердое тело [1]:

1 — образец; 2 — лазерное излучение; 3 — зона активного теплоотвода внутри материала; 4 — зона отвода энергии во внешнюю среду; 5 — зона локального расплавления материала; 6 — облако плазмы; 7 — брызги расплавленного материала образца; 8 — зона локального испаренного материала; 9 — трещины, полученные в образце в результате локальных микровзрывов

- при плавлении кристаллическая решетка переходит в аморфное состояние, а это необратимо;
- при закипании расплава происходит образование газовой фазы и выброс материала пластины на поверхность и на все, что на ней находится — на готовые приборы;
- при переходе к нанотехнологическим проектным нормам высокие температуры не допустимы, так как выводят из строя сформированные структуры готовых и протестированных приборов.

В основе всех существующих технологических лазерных процессов разделения пластин на кристаллы лежит воздействие на материал пластины образующейся равновесной плазмы, а поскольку результаты воздействия не всегда приемлемы, то существует много различных способов их устранения — это обдув воздухом или инертным газом зоны плавления [2], смыв грата (выбросов) струей воды, одновременно происходит интенсивное, по сравнению с обдувом, охлаждение зоны плавления [3]. Следующий метод практически то же самое, только луч лазера вводится в струю воды, которую используют как световод [4, 5].

Известен метод лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) [6, 7]: используют сразу два лазера с различными длинами волн (УФ лазер, лазер на CO_2) и локальное охлаждение воздушным потоком зоны прогрева CO_2 лазером, но этот метод "работает" только на материалах с низкой теплопроводностью.

Известен метод, исключая выброс материала подложки на ее поверхность, — это STEALTH DICING, когда фокусировка лазера осуществляется не на поверхность пластины, а на определенную глубину, где протекают все те же процессы, что и при скрайбировании, — нагрев, плавление, застывание расплава, возникновение термических механических напряжений, образование микрополостей внутри пластины. Последующее механическое воздействие на пластину приводит к ее разлому по специально созданному дефектному внутреннему следу лазерного воздействия на твердое тело. Таким образом, выброса нет, но остаются "замороженные" термические механические напряжения в стенках кристаллов, которые со временем, при попадании в экстремальные условия (повышенные температуры, повышенный уровень радиации) "разряжаются" и кристаллы растрескиваются, выводя сформированные на них приборы из строя [8].

Существует много различных модификаций перечисленных выше методов, хотя все они основаны на самом первом (исторически) методе — скрайбировании [1].

Постановка задачи

Для исключения перегрева (плавления) материала подложки необходимо уйти от его нагрева и вводить энергию от лазера в газовую среду, которую следует подбирать таким образом, чтобы интенсифицировать протекание химических реакций взаимодействия компонентов газовой среды и твердого тела. Наиболее

оптимальным для этого процесса будет не термическая интенсификация химических реакций, а проведение химических реакций в плазме, компоненты которой ионизированы, а потому скорости химических реакций значительно выше, чем у термохимических процессов.

Для реализации указанного необходимо создать такие условия, чтобы энергия от лазера вводилась (преимущественно) в газовую фазу, а не в твердое тело, хотя исключать последнее нельзя, потому что все процессы проводятся в ограниченном малом пространстве — фокусе лазерного луча.

Необходимым условием такого процесса должно быть условие не превышения порога введения энергии в твердое тело выше простого нагрева, когда энергия рассеивается в кристаллической решетке за счет колебательных степеней свободы атомов без изменений материала (остывает), а это возможно реализовать, если большую часть энергии от лазера вводить в газовую фазу и плазма будет образовываться именно в газовой фазе, а не за счет материала подложки [2]. Это возможно лишь в одном случае — при пробое газовой фазы, которую можно и нужно изменять целевым образом для прохождения необходимых химических реакций, т. е. создание плазмы основывается на таком физическом явлении, как оптический пробой, и это является вторым необходимым условием.

Достаточным условием является летучесть продуктов протекающих химических реакций. Как только разряд загорится в газовой фазе, энергия от лазера будет "перекачиваться" именно в него, поскольку в нем имеется достаточное число свободных электронов, которые воспринимают энергию от электромагнитного поля (свет также является электромагнитным полем). Таким образом, образуется плазма с заданным составом.

Вопрос — "как обеспечить внешние условия для создания плазмы в газовой фазе?". Для эффективного "отбора" энергии от электромагнитного поля электронами они должны иметь достаточную длину свободного пробега, а это, в свою очередь, определяется давлением проведения процесса. Необходимо его уменьшать. Но даже если длины свободных пробегов электронов будут достаточно велики, то набор энергии будет определяться еще и длиной волны лазера. Однако электроны могут набирать энергию только за четверть периода длины волны падающего электромагнитного излучения и их энергии может быть недостаточно для ионизации атомов или молекул нашей газовой среды ввиду высоких потенциалов ионизации компонентов смеси или индивидуальных газов. Выход из такой ситуации — введение в газовую смесь легко ионизируемого компонента с низким потенциалом ионизации.

Такова схема создания плазмы в газовой среде при проведении технологического процесса травления твердого тела (пластин) в фокусе лазерного луча. Поэтому при таком технологическом процессе фрагментирования пластин на кристаллы за счет травления, а не распыления расплава материала пластин не долж-

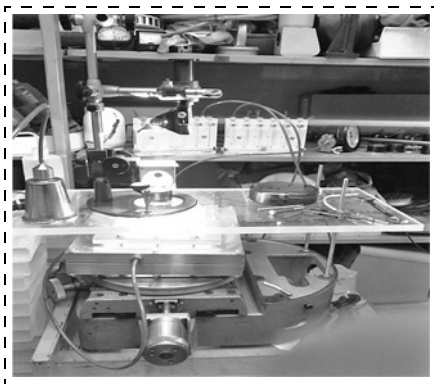


Рис. 2. Экспериментальная макетная установка с лазером на парах меди

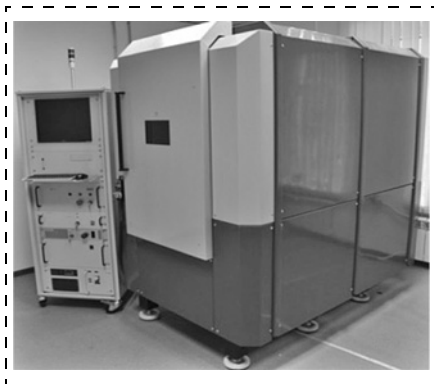


Рис. 3. Экспериментальная макетная установка МЛП1-1060/355 с ультрафиолетовым лазером

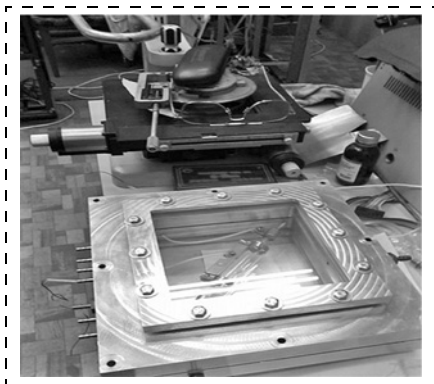


Рис. 4. Реактор

но быть модификации материала пластин, ну а процесс травления исключает остаточные "замороженные" термические напряжения в кристаллах.

При такой схеме технологического процесса фрагментирования пластин продукты протекающих химических реакций обязаны быть летучими и удаляться с помощью вакуумной системы. Таким образом, к необходимым условиям обеспечения технологического процесса фрагментирования пластин следует добавить еще обязательность удаления материала пластины из образующейся канавки воздействия лазера на пластину, в случае термического воздействия — это расплав и распыление, а в случае плазмохимического воздействия — летучесть продуктов химических реакций. Более того, для "полноценного" процесса фрагментирования он не должен зависеть от кристаллографии пластин.

Таковы теоретические предпосылки "правильных" технологических процессов фрагментирования пластин на кристаллы. Все сказанное выше необходимо доказать экспериментально, к чему мы и переходим.

Экспериментальная часть

Все эксперименты проводили на экспериментальных макетных установках с использованием лазера на парах меди и ультрафиолетового лазера. В качестве материалов для фрагментирования использовали пластины поликристаллического алмаза диаметром 76 мм и пластины монокристаллического сапфира диаметром 50 мм. На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные макетные установки.

На рис. 4 представлен реактор, в котором проводили экспериментальные работы.

Внутри реактора находится ртутная лампа, назначение которой будет объяснено ниже.

Вакуумная система построена на базе безмасляного спирального насоса S-15 фирмы ILMVAC (Германия), широкодиапазонного вакуумметра со встроенным дисплеем TELEVAC CC-10 (США), высоковакуумного затвора серии HV с фланцами KF модели GVB-SS-KF50-M.

Все эксперименты проводили физически корректно по двум направлениям:

- традиционная лазерная обработка (скрайбирование) при атмосферном давлении и воздушной газовой среде;
- лазерная плазмохимическая обработка при пониженном давлении.

Важно отметить, что все энергетические параметры лазеров по указанным направлениям экспериментальных работ оставались неизменными. Эксперименты отличались только тем, что при плазмохимической обработке были созданы условия для оптического пробоя в специально подобранной газовой среде. Оптический пробой легче протекает при пониженном давлении, что и осуществляли в диапазоне рабочих давлений $6 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ Торр. Таким образом, плазма "поджигалась" в газовой среде в ограниченном пространстве — фокусе, размер которого определяется длиной волны используемых лазеров. Активировав плазму в специально подобранной среде, мы проводили процессы плазмохимического травления экспериментальных образцов подложек. Непременное условие подбора газовых сред: после активации в плазме и прохождения химических реакций взаимодействия ее компонентов с твердым телом, продукты реакций должны быть летучими (при сформированных условиях) и их необходимо удалять с помощью используемой вакуумной системы.

В экспериментах были использованы следующие лазеры:

- на парах меди с параметрами:
 - длина волн — 510,6 и 578,2 нм;
 - средняя мощность — 10 Вт;
 - частота следования импульсов — 10 кГц;
 - длительность импульса — 20 нс;
 - расходимость пучка — близка к дифракционной;
- УФ диапазона с параметрами:
 - длина волны — 355 нм;
 - средняя мощность — 5,3 Вт;
 - частота следования импульсов — 100 кГц;

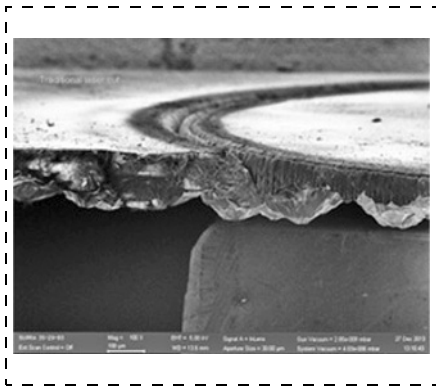


Рис. 5. Результаты экспериментов с использованием лазера на парах меди при воздействии на алмаз — графитизация в воздушной среде при атмосферном давлении

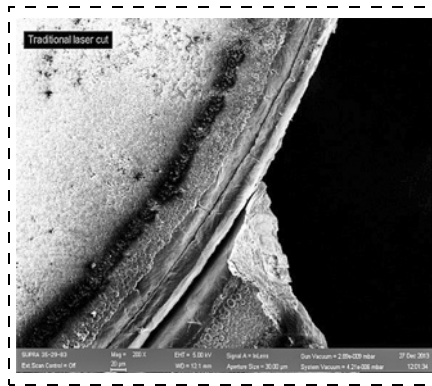


Рис. 6. Результаты экспериментов с использованием лазера на парах меди при воздействии на алмаз — образование фуллеренов в воздушной среде при атмосферном давлении

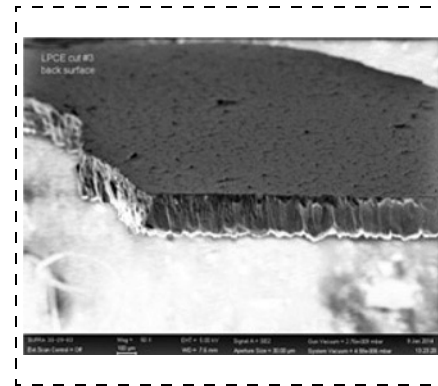


Рис. 7. Результаты лазерного плазмохимического воздействия на поликристаллический алмаз

- расходимость пучка — близка к дифракционной.

Что касается экспериментальной установки МЛП — 1060/355 с УФ лазером, то она подверглась существенной модернизации:

- изменена оптическая система — установлена выходная длиннофокусная линза;
- установлена газовая система;
- установлена вакуумная система.

При проведении работ с поликристаллическим алмазом были использованы фторидные газовые системы (на базе CF_4 , SF_6 , F_2 , Ag и др.) и кислород O_2 . Обе газовые системы прекрасно "работают".

На рис. 5 и 6 представлены результаты экспериментов с поликристаллическим алмазом при использовании традиционной термической технологии — скрайбирования при атмосферном давлении в воздушной среде. Происходит модификация алмаза — графитизация и образование фуллеренов.

На рис. 7 и 8 представлены результаты лазерного плазмохимического воздействия на поликристаллический алмаз при использовании лазера на парах меди.

На рис. 7 представлен излом пластины и след после лазерного плазмохимического травления. Как видно, излом не ровный — по спайности кристаллитов, а след после плазмохимического воздействия (травления) абсолютно ровный и прозрачный, без модификации кристаллитов (рис. 8), т. е. процесс локального травления протекает по "телу" кристаллитов, что и обеспечивает ровный след.

Поскольку лазерный плазмохимический процесс фрагментирования поликристаллических пластин алмаза на кристаллы является идеальным по сравнению с традиционным скрайбированием, мы решили перенести его и на пластины сапфира. Логика та же — традиционное скрайбирование и плазмохимический процесс при сохранении всех внешних параметров энергетического воздействия (всех параметров лазера). На рис. 9 представлен результат лазерного воздействия при атмосферном давлении в воздушной среде (традиционное скрайбирование).

Как видно, протекает процесс отшелушивания частиц от массива пластины. На рис. 10 представлен результат плазмохимического воздействия.

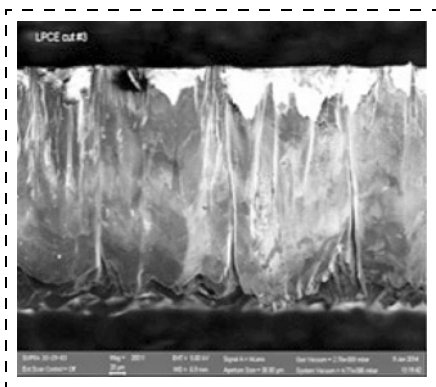


Рис. 8. Кристаллиты поликристаллического алмаза после плазмохимического воздействия

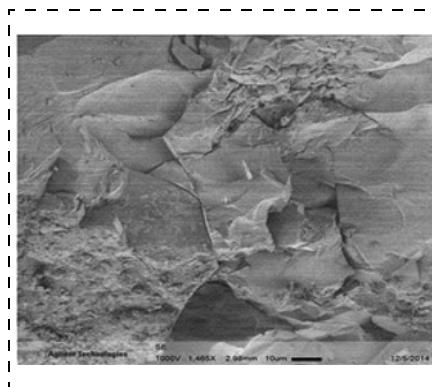


Рис. 9. Традиционное лазерное скрайбирование пластин сапфира с использованием лазера на парах меди

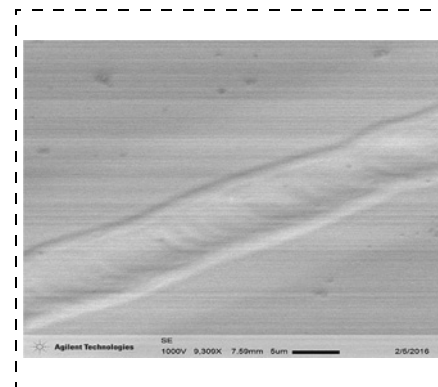


Рис. 10. Результат плазмохимического воздействия на пластину сапфира с использованием лазера на парах меди

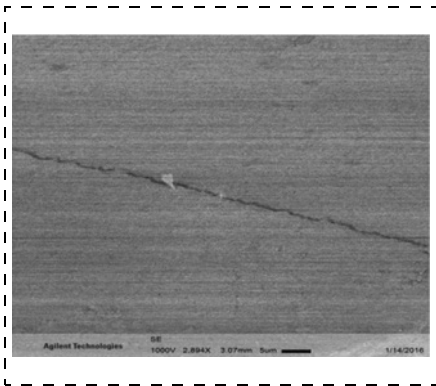


Рис. 11. Результат плазмохимического воздействия на сапфир с дополнительным источником УФ излучения

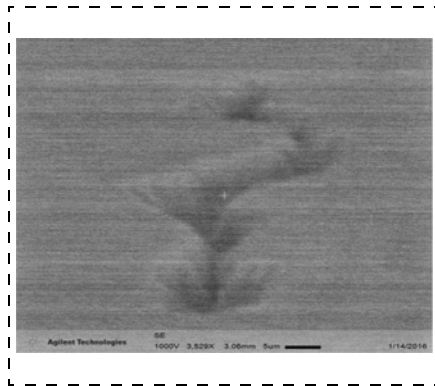


Рис. 12. Фрагмент следа лазерного плазмохимического травления сапфира

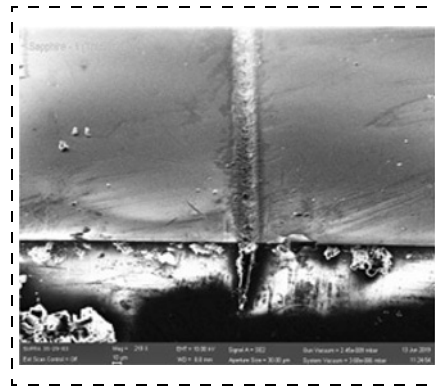


Рис. 13. Традиционное лазерное воздействие (скрайбирование) на сапфир

Из рисунка видно, что растрескивания и отшелушивания нет, есть гладкий след воздействия, т. е. химическая реакция протекает, но скорость явно недостаточна для технологической операции. По этой причине было решено изменить степень неравновесности плазмы, т. е. увеличить концентрацию электронов. Для этого внутрь реактора ввели источник ультрафиолетового излучения (ртутную лампу).

На рис. 11 представлен результат плазмохимического воздействия с дополнительным источником УФ излучения.

Как видно на рис. 11, процесс плазмохимического травления успешно прошел — отсутствует выброс материала на поверхность пластины, стенки канавки гладкие. След травления неровный, это получилось случайно — мы не обратили внимания на вибрации перекрытий, которые исходили из соседнего помещения. Но более глубокий анализ этого эксперимента показал, что след от травления может быть любой формы и не зависит от кристаллографических направлений пластины. Более того, сразу просматриваются машиностроительные требования к технологическому оборудованию — необходима виброизоляция зоны обработки.

На рис. 12 более детально представлен фрагмент этого следа, где видны все преимущества лазерного плазмохимического метода разделения пластин на кристаллы:

- отсутствие выброса материала на поверхность пластины;
- независимость следа травления от кристаллографических направлений в пластине;
- гладкость стенок канавки травления, что говорит о полноте прохождения химических реакций, а значит об отсутствии остаточных термических напряжений.

Поскольку след травления может быть произвольной формы, то произвольной формы могут быть и фрагменты пластины (кристаллы), поэтому целесообразно технологический процесс называть фрагментированием пластин на кристаллы.

Так как введение в реактор дополнительного УФ излучения привело к интенсификации процесса фраг-

ментирования вследствие увеличения степени неравновесности образующейся плазмы, то логичен переход к использованию в качестве источника энергии УФ лазера, что мы и сделали. Для экспериментов была использована указанная выше модернизированная установка МЛП1 — 1060/355. В качестве основы газовой смеси для образования плазмы был взят водород (H_2), расход которого составлял 2 л/мин при рабочем давлении $6 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ Торр. Эксперименты с сапфиром сохранили те же физические подходы, что и эксперименты с алмазом. На рис. 13 представлены результаты традиционной лазерной обработки (скрайбирование) в равновесной термической плазме, образующейся в процессе воздействия на твердое тело (сапфир).

Как видно из рис. 13, имеет место выброс материала пластины (грат) на ее поверхность в результате плавления и закипания расплава материала пластины. На рис. 14 представлен тот же след в увеличенном виде.

Из курса общей физики известно, что при остывании расплава в стенках образовавшейся канавки после воздействия лазера на твердое тело образуются и "замораживаются" механические термические на-



Рис. 14. Традиционное лазерное воздействие (скрайбирование) на сапфир. Увеличенное в размере изображение с измерительными метками



Рис. 15. Лазерное плазмохимическое воздействие на сапфир

пряжения, что пагубно сказывается на дальнейшей эксплуатации кристаллов — при их работе в экстремальных условиях (повышенные температуры и уровень радиации) напряжения "разряжаются", образуются трещины, и приборы (кристаллы) выходят из строя.

На рис. 15 представлены результаты лазерного плазмохимического воздействия (травления) на пластины сапфира.

Из рисунка видно, что грат отсутствует, профиль травления канавки приближается к прямоугольному, ширина канавки уменьшилась почти в четыре раза, аспектное отношение — 4, а при скрайбировании — 2 [10].

Обсуждение результатов

Анализируя полученные результаты по обработке алмаза [9] и сапфира [10] традиционным методом (скрайбирование), при котором энергия от лазера вводится в твердое тело, и лазерным плазмохимическим методом, когда энергия вводится в газовую фазу (состав которой подбирается целевым образом), видны все преимущества последнего. Прежде всего, это относится к:

- введению энергии в газовую фазу;
- отсутствию модификации материала пластины;
- возрастанию прецизионности формирования канавки (профиль приближается к прямоугольному, уменьшается ширина канавки);
- ширине канавки, определяемой размером плазменного образования в фокусе лазерного луча, которое, в свою очередь, зависит от длины волны используемого лазера;
- протеканию химических реакций взаимодействия материала пластины с активным компонентом плазмы с образованием летучих продуктов этих реакций;
- возможности формирования фрагментов (кристаллов) любой формы;

- уменьшению расстояний между кристаллами за счет уменьшения ширины канавки и отсутствия грата;
- основе метода, который базируется на оптическом пробое и плазмохимическом травлении, что исключает возникновение термических механических напряжений.

По результатам экспериментальных работ получены два патента РФ на способы лазерной плазмохимической обработки алмаза [11] и сапфира [12].

Заключение

Представленные результаты экспериментальных работ подтверждают правильность наших представлений о протекающих физических процессах и возможности построения обоснованной технологии обработки твердых тел в лазерной плазме, а также построения физической модели (в первом приближении) с выходом на численные параметры технологического процесса, но для этого требуется некий временной период.

Представленные результаты исследований являются новым технологическим направлением в лазерной обработке твердых тел, которое найдет свое применение при создании приборов с использованием нанотехнологических проектных норм.

Возможно это зарождение новой науки — лазерной плазмохимии, поскольку просматриваются новые технологические процессы создания наноприборов.

Требуется глубокое изучение протекающих физических процессов, разработка новых методов диагностики плазмы и технологических процессов в малых объемах (несколько микрометров).

Список литературы

1. Ryzhenkov A. V., Dasaev M. R., Ryzhenkov O. V., Kurshakov A. V. On Parameters of Normalized Different — Scale Relief Created on Brass Surfaces by Means of Laser // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, N. 19. P. 8824—8829.
2. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
3. Вакс Е. Д., Соколова Н. Э., Соколов Б. М. и др. Лазерная обработка отверстий в рубиновых технических камнях. Ленинград: ЛДНТП, 1975.
4. Перцев А. А., Колюхов М. В., Щербаков К. А. Способ обработки материалов в жидкой среде / Патент РФ RU 2692153 МПК В32К 26/146, 26/36, 26/20, Оpubл. 21.06.2019, Бюл. № 18.
5. Башта П. Лазерная резка методом LASER MICRO-JET // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 1—5.
6. Кондратенко В. С. Способ резки хрупких материалов / Патент РФ № 2024441 МКИ С03 В33/2, Оpubл. 15.12.1994, Бюл. № 23.
7. Кондратенко В. С., Кудж С. А. Прецизионная резка стекла и других хрупких материалов методом лазерного управляемого термораскалывания (обзор) // Стекло и керамика. 2017. № 3. С. 5—12.
8. Haupt O., Siegel F., Schnoonderbeek A., Richter L., Kling R., Ostehdort A. Laser Dicing of Silicon: comparison of

ablation mechanisms a novel technology of termally induced stress // JNMN — Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2008. Vol. 3, N. 3.

9. **Кондратенко В. С., Мальцев П. П., Редькин С. В.** Лазерная плазмохимическая обработка оптоэлектронных материалов // Оптический журнал. 2021. Том 88, № 10. С. 1—5.

10. **Кондратенко В. С., Мальцев П. П., Редькин С. В.** Лазерное плазмохимическое травление материалов электронной техники на примере алмаза и сапфира // Прикладная физика. 2021, № 1. С. 12—16.

11. **Аристов В. В., Мальцев П. П., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Павлов В. Ю.** Способ прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин. Патент РФ RU № 2537101 С1, МПК H01L 21/302, Оpubл. 27.12.2014, Бюл. № 36.

12. **Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П., Редькин С. В., Кондратенко В. С., Скрипниченко А. С., Стыран В. В.** Способ лазерной плазмохимической резки пластин. Патент РФ RU № 2731167 С1, МПК H01L 21/302, Оpubл. 31.08.2020, Бюл. № 25.

S. V. Red'kin, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: sergeiredckin@yandex.ru,
V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, Senior Researcher, Russian Technological University — MIREA

Corresponding author:

Red'kin Sergej V., Ph. D., Leading Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Russian Technological University — MIREA, Moscow, Russian Federation, E-mail: sergeiredckin@yandex.ru

Laser Plasmachemistry

Received on December 14, 2021

Accepted on December 27, 2021

Most of the currently existing laser methods for separating plates into crystals have been analyzed. A method for eliminating overheating of the substrate, its melt, modification and release of material to the surface is proposed — local laser plasma-chemical etching on the example of polycrystalline diamond and monocrystalline sapphire. Operating pressure range $6 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ Torr.

Keywords: laser, plasma-chemical etching, polycrystalline diamond, monocrystalline sapphire, plate, crystal

For citation:

Red'kin S. V. Laser Plasmachemistry, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 67—73.

DOI: 10.17587/nmst.24.67-73

References

1. **Ryzenkov A. V., Dasaev M. R., Ryzenkov O. V., Kurshakov A. V.** On Parameters of Normalized Different — Scale Relief Created on Brass Surfaces by Means of Laser, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 19, pp. 8824—8829.

2. **Vax E. D., Milenkiy M. N., Saprykin L. G.** Practice precision laser processing. M.: Tehnosfera, 2013, 696 p. (in Russian).

3. **Vaks E. D., Sokolova N. E., Sokolov B. M.** et al. Laser processing of holes in ruby technical stones. Leningrad: LDNTP, 1975. (in Russian).

4. **Pertsev A. A., Konyukhov M. V., Shcherbakov K. A.** Method of processing materials in a liquid medium, RF patent RU 2692153 MPC B32K 26/146, 26/36, 26/20, Publ. 21.06.2019, Bul. no. 18. (in Russian).

5. **Bashta P.** Laser cutting by laser microjet method, *Electronics: Science, Technology, Business*, 2010, no. 3, pp. 1—5.

6. **Kondratenko V. S.** Method of cutting fragile materials. Patent RF No2024441 MKI S03 V33/2, Publ. 15.12.1994, Bul. no. 23. (in Russian).

7. **Kondratenko V. S., Kuj S. A.** Precision cutting of glass and other fragile materials by laser controlled thermo-scaling (review). *Glass and ceramics*. 2017. № 3. pp. 5—12 (in Russian).

8. **Haupt O., Siegel F., Schnoonderbeek A., Richter L., Kling R., Ostehdort A.** Laser Dicing of Silicon: comparison of ablation mechanisms a novel technology of termally induced stress. *JNMN — Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2008, vol. 3, no. 3.

9. **Kondratenko V. S., Maltsev P. P., Redkin S. V.** Laser plasma-chemical processing of optoelectronic materials, *Optical journal*, 2021, vol. 88, no. 10, pp. 1—5 (in Russian).

10. **Kondratenko V. S., Maltsev P. P., Redkin S. V.** Laser plasma-chemical etching of electronic materials on the example of diamond and sapphire, *Applied Physics*, 2021, no. 1, pp. 12—16 (in Russian).

11. **Aristov V. V., Maltsev P. P., Redkin S. V., Skripnichenko A. S., Pavlov V. Y.** Method of precision laser — plasma-chemical plate cutting. Patent RF RU No. 2537101 С1, MPC H01L 21/302, Publ. 27.12.2014, Bul. no. 36 (in Russian).

12. **Gamkrelidze S. A., Maltsev P. P., Redkin S. V., Kondratenko V. S., Skripnichenko A. S., Styran V. V.** Method of laser plasma-chemical cutting of plates. Patent RF RU No2731167 С1, IPC H01L 21/302, Publ. 31.08.2020, Bul. no. 25 (in Russian).

Г. Б. Галиев¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., Е. А. Климов¹, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб., С. С. Пушкарёв¹, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., s_s_e_r_p@mail.ru, В. В. Сарайкин¹, вед. специалист, И. С. Васильевский², д-р физ.-мат. наук, проф., А. Н. Виниченко², канд. физ.-мат. наук, вед. инженер, М. М. Грехов², канд. физ.-мат. наук, нач. научно-технического отдела, А. Н. Ключков², канд. физ.-мат. наук, вед. инженер

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХРЕШЕТОК {LTG-GaAs/GaAs : Si} НА ПОДЛОЖКАХ GaAs (100) И (111)A

Поступила в редакцию 27.12.2021

Предлагаемая новая структура для фотопроводящих антенн представляет собой многослойную эпитаксиальную пленку, выращенную на подложке GaAs(111)A и состоящую из чередующихся слоев нелегированного GaAs, полученных в низкотемпературном режиме (LTG-GaAs), и слоев GaAs, синтезированных в стандартном высокотемпературном режиме и легированных кремнием (GaAs : Si). Соотношение потоков As₄ и Ga (γ) выбрано таким, чтобы слои GaAs : Si имели дырочный тип проводимости. Слои LTG-GaAs выращивали при увеличенном значении γ. Аналогичная структура была выращена на подложке (100) в качестве опорного образца. Исследованы следующие структурные характеристики: фазовый состав с помощью высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии, рельеф поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии, распределение легирующей примеси Si по толщине с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, подложка GaAs (111)A, фотопроводящая антенна, низкотемпературный GaAs, вторично-ионная масс-спектрометрия

Введение

Полупроводниковые структуры на основе соединений A^{III}B^V, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в низкотемпературном режиме (LTG — low temperature growth), широко применяют в качестве материалов для изготовления фотопроводящих антенн (ФПА) — генераторов и детекторов электромагнитного излучения терагерцевого диапазона частот [1–3]. Одним из первых таких материалов был LTG-GaAs и структуры на его основе. Снижение температуры роста от стандартных для GaAs значений 500...600 °С до 120...350 °С приводит к внедрению в растущий слой GaAs избыточного нестехиометричного мышьяка. Вследствие избытка мышьяка образуются следующие точечные дефекты в LTG-GaAs: межузельные атомы мышьяка (As_i); атомы мышьяка в узлах атомов галлия (As_{Ga}), а также вакансии атомов галлия (V_{Ga}), концентрация которых примерно на порядок меньше, чем концентрация дефектов As_{Ga} [4]. Наличие указанных дефектов в LTG-GaAs обуславливает основные параметры материала для ФПА: большое удельное сопротивление (10⁶...10⁷ Ом·см) [5, 6]; высокую напряженность поля пробоя (~500 кВ/см) [7]; ультракороткое время жизни фотовозбужденных носителей (~10...20 пс для ФПА-эмиттера и ~0,5 пс для ФПА-детектора [8]). Кроме того, несмотря на большую дефектность материала, он должен обеспечивать достаточно высокую подвижность носителей

заряда (200...1000 см²/(В·с)) [5, 7], особенно это актуально для ФПА-эмиттеров.

Эпитаксиальные пленки LTG-GaAs, используемые в ФПА, как правило, подвергают постростовому отжигу, в результате чего улучшается кристаллическое совершенство пленок, возрастает их удельное сопротивление и подвижность носителей заряда, а также в матрице LTG-GaAs формируются наноразмерные преципитаты As [1].

Считается, что ультракороткое время жизни носителей и высокое удельное сопротивление в структурах на основе LTG-GaAs связаны преимущественно с ионизированными дефектами As_{Ga}⁺ — главными ловушками электронов. Концентрация дефектов As_{Ga} на порядок превосходит концентрацию ионизированных As_{Ga}⁺, поэтому прилагают усилия для активации нейтральных центров As_{Ga} с помощью легирования LTG-GaAs компенсирующими акцепторными примесями [9, 10]. Самой распространенной акцепторной примесью является бериллий. Незаполненные энергетические уровни атомов Be располагаются в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны. На них переходят электроны дефектов As_{Ga}, вследствие этого возникает заряженное состояние As_{Ga}⁺ или As_{Ga}⁺⁺. В легированных бериллием структурах LTG-GaAs уменьшается время жизни носителей за счет повышения отношения концентраций [As_{Ga}⁺]/[As_{Ga}] [10–13]. Однако использование моле-

кулярного источника Ве в установке МЛЭ может оказаться нежелательным ввиду повышенной концентрации фоновой примеси p -типа, что отрицательно сказывается на качестве других структур, выращиваемых в данной установке.

Другой возможностью влияния на время жизни носителей заряда в структурах LTG-GaAs является управление концентрацией дефектов, а также преципитатов As, их размером и распределением [6, 14–18], которые определяют удельное сопротивление материала и подвижность носителей заряда в нем [19], а также влияют на фотопроводимость. Увеличение удельного сопротивления LTG-GaAs после отжига в работе [20] объясняется тем, что полуметаллические преципитаты As, окруженные полупроводником LTG-GaAs, образуют внутренние барьеры Шоттки. Вследствие этого вокруг преципитатов формируются обедненные носителями заряда сферические области, которые начинают перекрываться при увеличении концентрации преципитатов.

В настоящей работе приведены результаты исследований структур нового типа, обладающих одновременно и проводимостью p -типа, и свойствами LTG-GaAs. Предложенные структуры представляют собой многослойные эпитаксиальные пленки, выращенные на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией (111)A, состоящие из чередующихся слоев нелегированного GaAs, полученных в низкотемпературном режиме, и слоев GaAs, синтезированных в стандартном высокотемпературном режиме и легированных атомами Si. Новая структура является сверхрешеткой {LTG-GaAs/GaAs : Si}. Соотношение потоков мышьяка и галлия $\gamma = P_{As4}/P_{Ga}$ было выбрано таким, чтобы выращенные слои GaAs : Si проявляли проводимость p -типа. Как известно, это реализуется при малом значении γ [21–25]. Вместе с тем, использование такого значения γ ограничивает концентрацию антиструктурных дефектов As_{Ga} , ответственных за характеристики ФПА, в слоях LTG-GaAs. Концентрацию дефектов As_{Ga} можно увеличить, выращивая слои LTG-GaAs при значении γ_1 , повышенном по сравнению со значением γ_2 , используемым при росте слоев GaAs : Si. В предлагаемой структуре можно также регулировать концентрацию носителей заряда (в данном случае дырок), изменяя толщину легированных слоев, повышая уровень легирования кремнием, изменяя период сверхрешетки.

Целью работы было формирование новой структуры для ФПА, представляющей собой сверхрешетку {LTG-GaAs/GaAs : Si} на подложке GaAs(111)A и обладающей проводимостью p -типа, при использовании разных температур и давлений мышьяка во время роста слоев LTG-GaAs и GaAs : Si, а также исследование электрофизических и структурных характеристик выращенных образцов.

Формирование образцов и методы исследования

Технологические режимы роста (T_g и γ) слоев исследуемых структур — сверхрешеток {LTG-GaAs/GaAs : Si} — были выбраны с помощью калиб-

ровочных образцов-спутников, которые представляли собой однородно легированные кремнием эпитаксиальные слои GaAs толщиной 0,86 мкм, выращенные на подложках GaAs(111)A при $\gamma = 28$ и различных температурах роста $T_g = 350...510$ °C. Было обнаружено, что образцы-спутники имеют проводимость p -типа. При понижении температуры роста концентрация и подвижность дырок резко уменьшаются, причем при $T_g \leq 410$ °C образцы становятся настолько высокоомными, что их проводимость сравнима с проводимостью полуизолирующих подложек, и достоверно измерить электрофизические параметры затруднительно. Из этих данных следует, что существует некоторая критическая температура роста, ниже которой при выбранном значении γ на эпитаксиальных пленках, выращенных на GaAs (111)A и легированных кремнием, невозможно получить проводимость p -типа. В рассматриваемом случае для $\gamma \approx 28$ эта критическая температура находится в диапазоне 410...430 °C, что соответствует данным работы [26], где критическая температура равна 430 °C. Незначительное различие данных, по-видимому, связано с погрешностью измерений γ и T_g в разных установках МЛЭ. Отметим, что при уменьшении γ от 28 до 12...14 при высокотемпературном режиме роста сохраняется проводимость p -типа [21, 27].

Исходя из этих данных, в качестве новой структуры для ФПА предлагаем структуру, схематически представленную в табл. 1. После буферного слоя GaAs толщиной 100 нм, выращенного при стандартной температуре роста 520 °C, была получена многослойная эпитаксиальная пленка, состоящая из чередующихся слоев нелегированного GaAs толщиной 230 нм, синтезированных в низкотемпературном режиме (LTG-GaAs), и слоев легированного атомами кремния GaAs толщиной 20 нм, выращенных в стандартном высокотемпературном режиме. Температура кремниевой ячейки при выращивании легированного кремнием слоя GaAs : Si в исследуемых структу-

Таблица 1

Общий дизайн структуры-сверхрешетки {LTG-GaAs/GaAs : Si}

| Слой | Толщина, нм | T_g , °C | γ |
|---------------------|-------------|------------|------------|
| 4-GaAs : Si | 20 | 480 | γ_2 |
| 4-LTG-GaAs | 230 | 240 | γ_1 |
| 3-GaAs : Si | 20 | 480 | γ_2 |
| 3-LTG-GaAs | 230 | 240 | γ_1 |
| 2-GaAs : Si | 20 | 480 | γ_2 |
| 2-LTG-GaAs | 230 | 240 | γ_1 |
| 1-GaAs : Si | 20 | 480 | γ_2 |
| 1-LTG-GaAs | 230 | 240 | γ_1 |
| Буферный слой GaAs | 100 | 520 | 20 |
| Подложка GaAs(111)A | — | — | — |

Примечание: T_g — температура роста, γ — соотношение потоков As_4 и Ga.

рах LTG-GaAs/GaAs : Si и калибровочных образцах-спутниках составляла 1120 °С. Это соответствовало в наших условиях значению концентрации электронов $n_e = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в эпитаксиальных слоях GaAs : Si, выращенных на подложках GaAs (100) при стандартных температурах роста ($T_g = 500 \dots 600 \text{ °С}$). По существу, описанная структура является сверхрешеткой {LTG-GaAs/GaAs : Si}. В такой структуре при использовании подложки GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (111)А можно сочетать свойства LTG-GaAs с проводимостью p -типа, которая обеспечивается легированием кремнием. Концентрацию дырок можно регулировать, изменяя толщину слоев GaAs : Si или изменяя уровень легирования этих слоев, а также период их повторения. Концентрацией дефектов As_{Ga} (одним из основных параметров, определяющих ультракороткое время жизни носителей) можно управлять путем изменения давления мышьяка во время роста слоев LTG-GaAs. Таким образом, предложенная структура позволяет сформировать материал для ФПА с такими технологически управляемыми параметрами, как концентрация дырок и концентрация точечных дефектов As_{Ga} . Структура защищена патентом [28].

Для исследования были выращены две разновидности структуры {LTG-GaAs/GaAs : Si}. Первая разновидность была получена при постоянном значении $\gamma = 25$, т. е. слои LTG-GaAs и GaAs : Si синтезировали при одинаковом давлении мышьяка P_{As_4} . Значение $\gamma = 25$ было выбрано из условия получения проводимости p -типа слоев GaAs : Si на подложках GaAs(111)А. В одном процессе выращивали два образца на подложках GaAs(100) и GaAs(111)А для последующего сравнения их характеристик (образцы 26V(100) и 26V(111)А). Вторая разновидность структуры отличалась тем, что слои LTG-GaAs получали при увеличенном значении $\gamma_1 = 60$, а слои GaAs : Si при уменьшенном значении $\gamma_2 = 15$ (образец 443). Уменьшение γ_2 от 28 (для калибровочных образцов) до 15 (для образца 443(111)А) более надежно обеспечивает p -тип проводимости. Технологические условия роста представлены в табл. 2.

Выращенные структуры были подвергнуты отжигу в камере роста установки МЛЭ при температуре 560 °С в течение 30 мин в потоке As_4 .

Кривые дифракционного отражения (КДО) в режимах $2\theta/\omega$ - и ω -сканирования были измерены на рентгеновском дифрактометре Ultima IV (Rigaku),

использовалось излучение $CuK_{\alpha 1}$ с длиной волны $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$.

Профили распределения кремния по глубине измеряли на вторично-ионном масс-спектрометре (ВИМС) IMS-4F фирмы "Самеса". При этом в качестве первичного пучка использовали ионы кислорода O^{+2} с энергией 3 кэВ. Площадь раstra составляла $250 \times 250 \text{ мкм}$, а сбор вторичных ионов кремния осуществлялся с центрального участка раstra размером $60 \times 60 \text{ мкм}$ при разрешении по массам 5000.

Особенности кристаллической структуры данных структур, выявленные с помощью просвечивающей электронной микроскопии, были опубликованы в работе [29]. Результаты эксперимента, в котором генерировались ТГц импульсы фотопроводящей антенной на основе данных структур, были опубликованы в работе [30].

Результаты и обсуждение

На КДО образца 443 до отжига, измеренной в режиме $2\theta/\omega$ -сканирования, слева от главного пика, соответствующего брэгговскому отражению от GaAs (111), имеется слабое "плечо" (рис. 1, а). Такая форма КДО указывает на то, что в составе пленки GaAs есть некоторое количество фазы с увеличенным параметром решетки. В результате отжига интенсивность этого "плеча" сильно снижается, что свидетельствует об уменьшении количества фазы с большим параметром решетки. На КДО образца 443 до отжига, измеренной в режиме ω -сканирования, слева также наблюдалось "плечо", интенсивность которого после отжига, наоборот, выросла (рис. 1, б). Это свидетельствует о том, что до отжига имелось некоторое количество фазы с недеформированной решеткой GaAs, но разориентированной относительно подложки, а после отжига количество фазы с разориентированной кристаллической структурой увеличилось. Угол разориентации составляет $\sim 0,8^\circ$. Такую же форму имеют КДО от плоскостей (444) и (422) в режиме ω -сканирования, не приведенные здесь. Полученные экспериментальные данные можно интерпретировать следующим образом: нестехиометрический мышьяк, захваченный кристаллической структурой GaAs в процессе низкотемпературного роста и увеличивающий параметр решетки, при отжиге выделяется в преципитаты; кроме того, кристаллическая структура при отжиге релаксирует через разориентацию.

На толщинных профилях концентрации атомов Si в образцах, измеренных с помощью ВИМС и представленных на рис. 2, отчетливо видны три первых легированных слоя GaAs, а четвертый (приповерхностный) легированный слой замаскирован резким всплеском сигнала ВИМС. Как видно из рис. 2, а, профиль концентрации атомов Si в образце 443 после отжига изменился: толщина легированных областей увеличилась, а фоновый уровень концентрации в нелегированных областях вырос в несколько (от 2 до 5) раз. Причина заключается в диффузии атомов Si в процессе отжига, длину диффузии можно оценить как

Таблица 2

Особенности дизайна исследуемых структур

| № образца | Слои структуры | $T_g, \text{ °С}$ | $P_{As_4}, 10^{-5} \text{ Торр}$ | γ_1 | γ_2 |
|-----------|----------------|-------------------|----------------------------------|------------|------------|
| 26 V | LTG-GaAs | 240 | 1,6 | 25 | — |
| | GaAs : Si | 480 | 1,6 | — | 25 |
| 443(111)А | LTG-GaAs | 200 | 4,3 | 60 | — |
| | GaAs : Si | 480 | 0,7 | — | 15 |

5,8 нм. Также профиль концентрации атомов Si зависит от ориентации подложки, на которой происходит эпитаксиальный рост: на подложке GaAs (111)А фронт роста гетероструктуры более шероховатый, чем на подложке (100), вследствие чего границы областей легирования оказались более размытыми, а фоновый уровень в нелегированных областях — повышенным в 1,5–3 раза.

Экспериментальные профили всегда содержат искажения, являющиеся артефактами процесса измерения [31]. Наиболее существенные искажения информации о реальном распределении элементов вызваны шероховатостью поверхности и процессами, происходящими при ионном распылении. Влияние ионного распыления выражается в уширении и сдвиге к поверхности измеренного профиля относительно истинного в результате развития поверхностной шероховатости и атомного перемешивания в приповерхностном слое, вызванного пучком распыляющих ионов. Матричные эффекты приводят к нелинейной зависимости выхода вторичных ионов от концентрации соответствующего элемента в образце. Нестационарные режимы распыления в начале послойного анализа приводят к изменению коэффициентов выхода вторичных ионов и скоростей травления при анализе первых нанометров приповерхностного слоя. Также стоит отметить зависимость скорости распыления от состава исследуемой структуры или искривление дна кратера травления. Полностью исключить влияние всех этих факторов в эксперименте невозможно.

При сравнении значений средней квадратичной шероховатости поверхности гетероструктуры и дна кратера травления (табл. 3) видно, что травление пучком ионов O^{2+} делает изначально гладкую поверх-

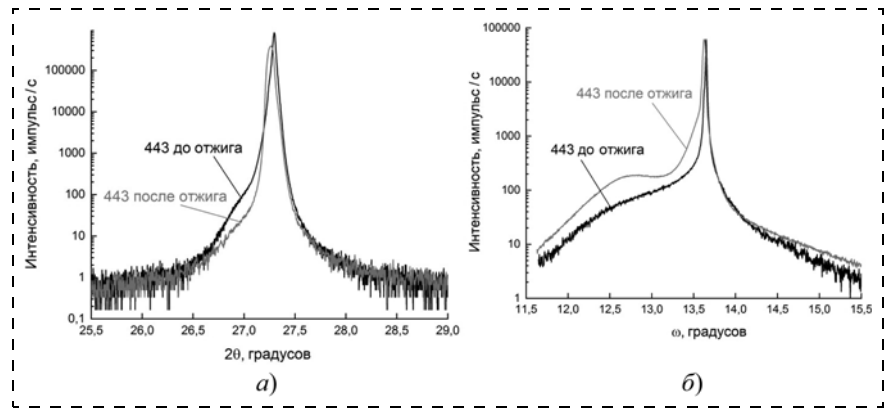


Рис. 1. КДО образца № 443 от плоскостей (111) до и после отжига: а — в режиме $2\theta/\omega$ -сканирования; б — в режиме ω -сканирования

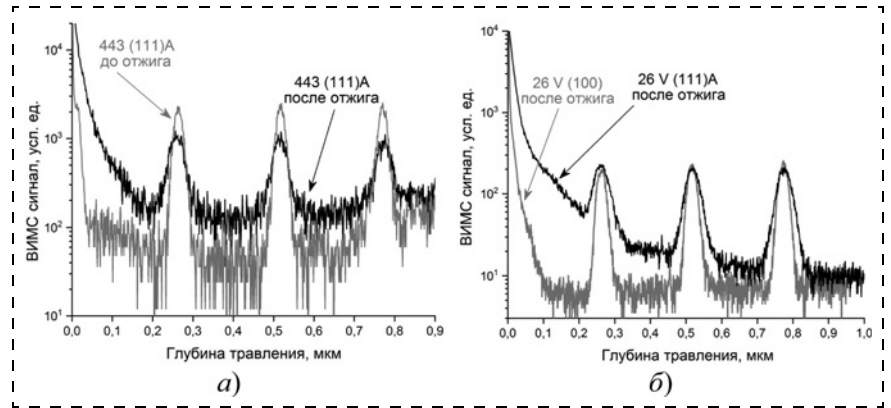


Рис. 2. Толщинные профили концентрации атомов Si в образцах, измеренные методом ВИМС

ность пленки на подложке (100) более шероховатой, однако изначально шероховатую поверхность пленки на подложке (111)А выглаживает до некоторой степени. Толщину области перемешивания можем оценить по изначально гладкому образцу 26 V следующим образом: $(4,0 - 0,7) \text{ нм} = 3,3 \text{ нм}$. Таким образом, толщина области перемешивания оказывается меньше как длины диффузии (5,8 нм), так и шероховатости фронта эпитаксиального роста (9...10 нм). Можем сделать вывод, что ионное травление могло бы вносить размытие профиля концентрации Si при измерении гетероструктур на подложках (100) до отжига,

Таблица 3

Распределение атомов Si в образцах, измеренное методом ВИМС (толщины легированных областей определены на уровне половины максимальной концентрации за вычетом фонового уровня); средняя квадратичная шероховатость поверхности, измеренная методом АСМ

| Образец | Толщина 3-GaAs : Si, нм | Толщина 2-GaAs : Si, нм | Толщина 1-GaAs : Si, нм | R_q , нм | | |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|-----|
| | | | | Поверхность пленки | Дно кратера ВИМС | |
| 443 (111)А | без отж. | 26,1 | 21,4 | 22,0 | 9,9 | 4,8 |
| | отж. | 36,5 | 33,9 | 34,0 | 9,7 | 8,1 |
| 26 V (100) отж. | 29,0 | 28,8 | 29,6 | 0,7 | 4,0 | |
| 26 V (111)А отж. | 45,6 | 40,8 | 43,4 | 9,1 | 6,2 | |

но вклад такого влияния в случае отоженных гетероструктур на подложках (100), а также любых гетероструктур на подложках (111)A незначителен.

Заключение

В настоящей работе исследованы эпитаксиальные структуры для фотопроводящих антенн, выращенные на подложках GaAs (111)A и состоящие из чередующихся слоев нелегированного GaAs, которые получены в низкотемпературном режиме (LTG-GaAs), и слоев GaAs, синтезированных в стандартном высокотемпературном режиме и легированных кремнием (GaAs : Si). Соотношение потоков As₄ и Ga (γ) выбрано таким, чтобы слои GaAs : Si проявляли проводимость дырочного типа. Слои LTG-GaAs выращивали при увеличенном значении γ .

Аналогичная структура была выращена на подложке GaAs (100) в качестве опорного образца. С помощью высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии показано, что нестехиометрический мышьяк, захваченный кристаллической структурой LTG-GaAs в процессе низкотемпературного роста, приводит к увеличению параметра решетки LTG-GaAs, а при отжиге он покидает междоузлия решетки, выделяясь в преципитаты. Также показано, что кристаллическая структура при отжиге частично релаксирует посредством разориентации, угол разориентации составляет $\sim 0,8^\circ$.

С помощью вторично-ионной масс-спектрометрии показано, что профиль распределения легирующей примеси кремния уширяется после отжига, а также при росте на подложках GaAs (111)A по сравнению с подложкой (100). Результаты атомно-силовой микроскопии позволяют сделать вывод, что кажущееся уширение профиля Si, обусловленное ионным травлением образцов, по крайней мере, вдвое меньше реального уширения, вызванного указанными выше факторами, а следовательно, результаты профилирования достоверны

Список литературы

1. Krotkus A. Semiconductors for terahertz photonics applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. Is. 27. P. 273001.
2. Kostakis I., Missous M. Optimization and temperature dependence characteristics of low temperature In_{0,3}Ga_{0,7}As and In_{0,53}Ga_{0,47}As-In_{0,52}Al_{0,48}As semiconductor terahertz photoconductors // *AIP Advances*. 2013. V. 3. P. 092131.
3. Roehle H., Dietz R. J. B., Hensel H. J., Büttcher J., Künzel H., Stanze D., Schell M., Sartorius B. Next generation 1.5 μm terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers // *Optics Express*. 2010. V. 18. Is. 3. P. 2296–2301.
4. Luysberg M., Sohn H., Prasad A., Specht P., Lilienthal-Weber Z., Weber E. R., Gebauer J., Krause-Rehberg R. Effects of the growth temperature and As/Ga flux ratio on the incorporation of excess As into low temperature grown GaAs // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. Is. 1. P. 561–566.
5. Gupta S., Frankel M. Y., Valdmanis J. A., Whitaker J. F., Mourou G. A., Smith F. W., Calawa A. R. Subpicosecond carrier

lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures // *Appl. Phys. Lett.* 1991. V. 59. Is. 25. P. 3276–3278.

6. Luo J. K., Thomas H., Morgan D. V., Westwood D. Transport properties of GaAs layers grown by molecular beam epitaxy at low temperature and the effects of annealing // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. Is. 7. P. 3622–3629.

7. Zamdmer N., Hu Q., McIntosh K. A., Verghese S. Increase in response time of low-temperature-grown GaAs photoconductive switches at high voltage bias // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75. Is. 15. P. 2313–2315.

8. Kamo Y., Kitazawa Sh., Ohshima S., Hosoda Ya. Highly efficient photoconductive antennas using optimum low-temperature-grown GaAs layers and Si substrates // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014. V. 53. P. 032201.

9. Krotkus A., Bertulis K., Kaminska M., et al. // *IEEE Proceed. J. Optoelectronics*. 2003. V. 149. Is. 3. P. 111.

10. Krotkus A., Bertulis K., Dapkus L., Olin U., Marcinkevicius S. Ultrafast carrier trapping in Be-doped low-temperature-grown GaAs // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75. Is. 21. P. 3336–3338.

11. Coutaz J.-L., Roux J.-F., Gaarder A., Marcinkevicius S., Jasinski J., Korona K., Kaminska M., Bertulis K., Krotkus A. Be-doped low-temperature grown GaAs for ultrafast optoelectronic devices and applications // *XI International Semiconducting and Insulating Materials Conf. Canberra, Australia, 2000*. P. 89–96.

12. Specht P., Lutz R. C., Zhao R., Weber E. R., Liu W. K., Bacher K., Towner F. J., Stewart T. R., Luysberg M. Improvement of molecular beam epitaxy-grown low-temperature GaAs through p-doping with Be and C // *J. Vacuum Sci. Technol. B*. 1999. V. 17. P. 1200–1204.

13. Specht P., Jeong S., Sohn H., Luysberg M., Prasad A., Gebauer J., Krause-Rehberg R., Weber E. R. Defect Control in As-Rich GaAs // *Mater. Sci. Forum*. 1997. V. 258–263. P. 951–956.

14. Harmon E. S., Melloch R. M., Woodall J. M., Nolte D. D., Otsuka N., Chang C. L. Carrier lifetime versus anneal in low temperature growth GaAs // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. Is. 16. P. 2248–2250.

15. Chang M. N., Pan J.-W., Chyi J.-I. Effect of column III vacancy on arsenic precipitation in low-temperature grown III–V arsenides // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 72. Is. 5. P. 587–589.

16. Breard M. C., Turner G. M., Schmuttenmaer C. A. Subpicosecond carrier dynamics in low-temperature grown GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 90. Is. 12. P. 5915–5923.

17. Look D. C. On compensation and conductivity models for molecular-beam-epitaxial GaAs grown at low temperature // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. Is. 6. P. 3148–3151.

18. Gebauer J., Börner F., Krause-Rehberg R., Staab T. E. M., Bauer-Kugelmann W., Kögel G., Triftshäuser W., Specht P., Lutz R. C., Weber E. R., Luysberg M. Defect identification in GaAs grown at low temperatures by positron annihilation // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. Is. 12. P. 8368–8379.

19. Look D. C., Walters D. C., Robinson G. D., Szelove J. R., Mier M. G., Stutz C. E. Annealing dynamics of molecularbeam epitaxial GaAs grown at 200 °C // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. Is. 10. P. 306–310.

20. Warren A. C., Woodall J. M., Freeouf J. L., Grischkowsky D., McInturf D. T., Melloch M. R., Otsuka N. Arsenic precipitates and the semiinsulating properties of GaAs buffer layers grown by low temperature molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. Is. 13. P. 1331–1333.

21. Piazza F., Pavesi L., Henini M., Johnston D. Effect of As overpressure on Si-doped (111)A GaAs grown by molecular beam epitaxy: a photoluminescence study // *Semicond. Sci. Technol.* 1992. V. 7. P. 1504–1507.

22. Ohachi T., Feng J. M., Asai K., Uwani M., Tateuchi M., Vaccaro P. O., Fujita K. Arsenic vapor pressure dependence of surface morphology and silicon doping in molecular beam epi-

taxial grown GaAs (n11)A ($n = 1-4$) substrates // Microelectronics J. 1999. V. 30, Is. 4-5. P. 471-476.

23. Мокеров В. Г., Галиев Г. Б., Слепнев Ю. В., Хабаров Ю. В. Влияние кристаллографической ориентации поверхности роста при молекулярно-лучевой эпитаксии на оптические свойства легированных кремнием слоев арсенида галлия // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. Вып. 11. С. 1320-1324.

24. Галиев Г. Б., Каминский В. Э., Мокеров В. Г., Велиховский Л. Е. Использование амфотерности примесных атомов кремния для получения планарных p-n-переходов на подложках GaAs с ориентацией (111)A методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 4. С. 427-430.

25. Pavesi L., Henini M., Johnston D. Influence of the As overpressure during the molecular beam epitaxy growth of Si doped (211)A and (311)A GaAs // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. Is. 21. P. 2846-2848.

26. Agawa K., Hirakawa K., Sakamoto N., Hashimoto Y., Ikoma T. Electrical properties of heavily Sidoped (311)A GaAs grown by molecular beam epitaxy // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65, Is. 9. P. 1171-1173.

27. Галиев Г. Б., Карачевцева М. В., Мокеров В. Г., Страхов В. А., Яременко Н. Г. // Доклады Академии Наук. 1999. Т. 367, № 5. С. 613.

28. Галиев Г. Б., Васильевский И. С., Виниченко А. Н., Климов Е. А., Клочков А. Н., Мальцев П. П., Пушкарев С. С. Полупроводниковая структура для фотопроводящих антенн. Патент РФ на изобретение № 2671286. патентообладатель ИСВЧПЭ РАН. — Заявка № 2017133046; заявл. 22.09.2017; опубл. 30.10.2018.

29. Галиев Г. Б., Трунькин И. Н., Васильев А. Л., Васильевский И. С., Виниченко А. Н., Климов Е. А., Клочков А. Н., Мальцев П. П., Пушкарев С. С. Новая структура для фотопроводящих антенн на основе сверхрешетки {LTG-GaAs/GaAs:Si} на подложке GaAs(111)A // Кристаллография. 2019. Т. 64, № 2. С. 184-191.

30. Клочков А. Н., Климов Е. А., Солянкин П. М., Конникова М. Р., Васильевский И. С., Виниченко А. Н., Шкурин А. П., Галиев Г. Б. Терагерцовое излучение фотопроводящих антенн на основе сверхрешеточных структур {LT-GaAs/GaAs:Si} // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. Вып. 7. С. 1004-1011.

31. Юнин П. А. Развитие методов вторично-ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии для исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур. Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Институт физики микроструктур РАН, 2016.

G. B. Galiev¹, D. Sc., Chief Researcher, E. A. Klimov¹, Ph. D., Head of Laboratory, S. S. Pushkarev¹, Ph. D., Leading Engineer, s_s_e_r_p@mail.ru, V. V. Saraykin¹, Leading Specialist, I. S. Vasil'evskii², D. Sc., Professor, A. N. Vinichenko², Ph. D., Leading Engineer, M. M. Grekhov², Ph. D., Head of Department, A. N. Klochkov², Ph. D., Leading Engineer,

¹ Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

Corresponding author:

Pushkarev Sergey. S., Ph. D., Leading Engineer, Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, Russia

E-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

Structural Properties of Superlattices {LTG-GaAs/GaAs : Si} on GaAs (100) and (111)A Substrates

Received on December 27, 2021

Accepted on January, 21, 2022

The proposed new structure for photoconductive antennas is a multilayer epitaxial film grown on a GaAs (111) A substrate and consisting of alternating layers of undoped GaAs grown at low temperature (LTG-GaAs) and GaAs layers formed in the standard high-temperature regime and doped with silicon (GaAs : Si). The ratio of As₄ and Ga fluxes (γ) was chosen such that the GaAs : Si layers had p-type conductivity. LTG-GaAs layers were grown at an increased γ value. A similar structure was grown on a (100) substrate as a reference sample. Phase composition was investigated using high-resolution X-ray diffractometry, surface relief — by mean of atomic force microscopy and distribution of Si impurity over thickness — using secondary ion mass spectrometry.

Keywords: molecular-beam epitaxy, GaAs (111)A substrate, photoconducting antenna, low-temperature-grown GaAs, secondary-ion mass spectrometry

For citation:

Galiev G. B., Klimov E. A., Pushkarev S. S., Saraykin V. V., Vasil'evskii I. S., Vinichenko A. N., Grekhov M. M., Klochkov A. N. Structural Properties of Superlattices {LTG-GaAs/GaAs:Si} on GaAs (100) and (111)A Substrates, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 74-80.

DoI: 10.17587/nmst.74-80

References

1. Krotkus A. Semiconductors for terahertz photonics applications, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, is. 27, pp. 273001.
2. Kostakis I., Missous M. Optimization and temperature dependence characteristics of low temperature $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ and $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}-\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ semiconductor terahertz photoconductors, *AIP Advances*, 2013, vol. 3, p. 092131.
3. Roehle H., Dietz R. J. B., Hensel H. J., Büttcher J., Künzel H., Stanze D., Schell M., Sartorius B. Next generation 1.5 μm terahertz antennas: mesa-structuring of $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ photoconductive layers, *Optics Express*, 2010, vol. 18, is. 3, pp. 2296–2301.
4. Luysberg M., Sohn H., Prasad A., Specht P., Liliental-Weber Z., Weber E. R., Gebauer J., Krause-Rehberg R. Effects of the growth temperature and As/Ga flux ratio on the incorporation of excess As into low temperature grown GaAs, *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 83, is. 1, pp. 561–566.
5. Gupta S., Frankel M. Y., Valdmanis J. A., Whitaker J. F., Mourou G. A., Smith F. W., Calawa A. R. Subpicosecond carrier lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, vol. 59, is. 25, pp. 3276–3278.
6. Luo J. K., Thomas H., Morgan D. V., Westwood D. Transport properties of GaAs layers grown by molecular beam epitaxy at low temperature and the effects of annealing, *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, is. 7, pp. 3622–3629.
7. Zamdmer N., Hu Q., McIntosh K. A., Verghese S. Increase in response time of low-temperature-grown GaAs photoconductive switches at high voltage bias, *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 75, is. 15, pp. 2313–2315.
8. Kamo Y., Kitazawa Sh., Ohshima S., Hosoda Ya. Highly efficient photoconductive antennas using optimum low-temperature-grown GaAs layers and Si substrates, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 53, p. 032201.
9. Krotkus A., Bertulis K., Kaminska M. et al. *IEEE Proceed. J. Optoelectronics*, 2003, vol. 149, is. 3, p. 111.
10. Krotkus A., Bertulis K., Dapkus L., Olin U., Marcinkevičius S. Ultrafast carrier trapping in Be-doped low-temperature-grown GaAs, *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 75, is. 21, pp. 3336–3338.
11. Coutaz J.-L., Roux J.-F., Gaarder A., Marcinkevicius S., Jasinski J., Korona K., Kaminska M., Bertulis K., Krotkus A. Be-doped low-temperature grown GaAs for ultrafast optoelectronic devices and applications, *XI International Semiconducting and Insulating Materials Conf. Canberra, Australia*, 2000, pp. 89–96.
12. Specht P., Lutz R. C., Zhao R., Weber E. R., Liu W. K., Bacher K., Towner F. J., Stewart T. R., Luysberg M. Improvement of molecular beam epitaxy-grown low-temperature GaAs through p-doping with Be and C, *J. Vacuum Sci. Technol. B*, 1999, vol. 17, pp. 1200–1204.
13. Specht P., Jeong S., Sohn H., Luysberg M., Prasad A., Gebauer J., Krause-Rehberg R., Weber E. R. Defect Control in As-Rich GaAs, *Mater. Sci. Forum.*, 1997, vol. 258–263, pp. 951–956.
14. Harmon E. S., Melloch R. M., Woodall J. M., Nolte D. D., Otsuka N., Chang C. L. Carrier lifetime versus anneal in low temperature growth GaAs, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 63, is. 16, pp. 2248–2250.
15. Chang M. N., Pan J.-W., Chyi J.-I. Effect of column III vacancy on arsenic precipitation in low-temperature grown III–V arsenides, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 72, is. 5, pp. 587–589.
16. Breard M. C., Turner G. M., Schmuttenmaer C. A. Subpicosecond carrier dynamics in low-temperature grown GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 90, is. 12, pp. 5915–5923.
17. Look D. C. On compensation and conductivity models for molecular-beam-epitaxial GaAs grown at low temperature, *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 70, is. 6, pp. 3148–3151.
18. Gebauer J., Börner F., Krause-Rehberg R., Staab T. E. M., Bauer-Kugelmann W., Kögel G., Triftshäuser W., Specht P., Lutz R. C., Weber E. R., Luysberg M. Defect identification in GaAs grown at low temperatures by positron annihilation, *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 87, is. 12, pp. 8368–8379.
19. Look D. C., Walters D. C., Robinson G. D., Sizelove J. R., Mier M. G., Stutz C. E. Annealing dynamics of molecularbeam epitaxial GaAs grown at 200 °C, *J. Appl. Phys.*, 1993, vol. 74, is. 10, pp. 306–310.
20. Warren A. C., Woodall J. M., Freeouf J. L., Grischkowsky D., McInturff D. T., Melloch M. R., Otsuka N. Arsenic precipitates and the semiinsulating properties of GaAs buffer layers grown by low temperature molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, vol. 57, is. 13, pp. 1331–1333.
21. Piazza F., Pavesi L., Henini M., Johnston D. Effect of As overpressure on Si-doped (111)A GaAs grown by molecular beam epitaxy: a photoluminescence study, *Semicond. Sci. Technol.*, 1992, vol. 7, pp. 1504–1507.
22. Ohachi T., Feng J. M., Asai K., Uwani M., Tateuchi M., Vaccaro P. O., Fujita K. Arsenic vapor pressure dependence of surface morphology and silicon doping in molecular beam epitaxial grown GaAs (n11)A ($n = 1-4$) substrates, *Microelectronics J.*, 1999, vol. 30, is. 4–5, pp. 471–476.
23. Mokerov V. G., Galiev G. B., Slepnev Yu. V., Khabarov Yu. V. Influence of crystal orientation of the growth surface due to molecular beam epitaxy on the optical properties of Si-doped GaAs layers. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, pp. 1175–1178, <https://doi.org/10.1134/1.1187586>
24. Galiev G. B., Kaminskii V. E., Mokerov V. G., Velikhovskii L. E. The use of the amphoteric nature of impurity silicon atoms for obtaining planar p-n junctions on GaAs (111)A substrates by molecular beam epitaxy. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, pp. 415–418.
25. Pavesi L., Henini M., Johnston D. Influence of the As overpressure during the molecular beam epitaxy growth of Si doped (211)A and (311)A GaAs, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, vol. 66, is. 21, pp. 2846–2848.
26. Agawa K., Hirakawa K., Sakamoto N., Hashimoto Y., Ikoma T. Electrical properties of heavily Sidoped (311)A GaAs grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, vol. 65, is. 9, pp. 1171–1173.
27. Galiev G. B., Karachevtseva M. V., Mokerov V. G., Strakhov V. A., Yaremenko N. G. Photoluminescence studies of amphoteric silicon behavior in gallium arsenide, *Doklady Physics*, 1999, vol. 44, no. 8, pp. 510–513.
28. Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Vinichenko A. N., Klimov E. A., Klochkov A. N., Maltsev P. P., Pushkarev S. S. Semiconductor structure for photoconductive antennas. Patent RU 2671286, filed 22.09.2017, published 30.10.2018 (in Russian).
29. Galiev G. B., Trunkin I. N., Vasiliev A. L., Vasil'evskii I. S., Vinichenko A. N., Klimov E. A., Klochkov A. N., Maltsev P. P., Pushkarev S. S. New Structure for Photoconductive Antennas Based on {LTG-GaAs/GaAs:Si} Superlattice on GaAs(111)A Substrate, *Crystallography Reports*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 205–211.
30. Klochkov A. N., Klimov E. A., Solyankin P. M., Konnikova M. R., Vasil'evskii I. S., Vinichenko A. N., Shkurinov A. P., Galiev G. B. THz Radiation of Photoconductive Antennas based on {LT-GaAs/GaAs:Si} Superlattice Structures, *Optics and Spectroscopy*, 2020, vol. 128, pp. 1010–1017.
31. Yunin P. A. Development of secondary ion mass spectrometry and X-ray diffractometry methods for studying multi-layer semiconductor heterostructures. Thesis of Ph. D., 2016.

И. А. Глинский, науч. сотр. ИСВЧПЭ РАН, **А. Э. Ячменев**, ст. науч. сотр. ИСВЧПЭ РАН, **Д. В. Лаврухин**¹, науч. сотр. ИСВЧПЭ РАН, **Р. А. Хабибуллин**, вед. науч. сотр. ИСВЧПЭ РАН, **С. А. Гамкрелидзе**¹, директор ИСВЧПЭ РАН, **К. И. Зайцев**, зав. лаб. ИОФ РАН, **И. Е. Спектор**, зав. отделом ОСС, ИОФ РАН, **Д. С. Пономарев**, зам. директора, вед. науч. сотр. ИСВЧПЭ РАН, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

Федеральное государственное автономное научное учреждение

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук" (ИОФ РАН), г. Москва

ПЛАЗМОННЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОМ ГЕНЕРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 31.01.2022

Предложены и изготовлены плазмонные метаповерхности для фотопроводящих антенн (ФПА) на основе сверхрешеточных гетероструктур InAlAs/InGaAs. В результате измерений ФПА в импульсном ТГц спектрометре установлено, что для ФПА-излучателей с высотой плазмонной метаповерхности $h = 150$ нм максимальная зарегистрированная интегральная мощность ТГц излучения составила 5,3 мВт (эффективность оптико-ТГц конверсии 0,19 %) при лазерной накачке со средней мощностью 2,8 мВт и напряжении смещения 8,6 В. Прирост сигнала за счет возбуждения плазмонных мод позволяет достичь высокого отношения сигнал/шум (~80 дБ). Эксперименты показали, что при большей высоте (толщине) металлизации метаповерхности наблюдается больший прирост плотности мощности ТГц излучения. Благодаря полученным параметрам, разработанные антенны могут быть использованы для создания ответственных систем ТГц спектроскопии и визуализации высокого разрешения.

Ключевые слова: источники терагерцового излучения, фотопроводящие антенны, терагерцовая частота, метаповерхности

Введение

Фотопроводящие антенны (ФПА) составляют основу элементной базы в современных системах импульсной и непрерывной ТГц спектроскопии и визуализации [1–3] и вызывают все больший интерес как эффективный инструмент диагностики злокачественных новообразований [4, 5]. Системы, работающие в ТГц диапазоне электромагнитного спектра, позволяют дифференцировать здоровые ткани и злокачественные новообразования, используя естественные маркеры патологии, в частности уровень гидратации тканей. Кроме того, поскольку в отличие от рентгеновских лучей ТГц излучение безопасно для человека благодаря низкой энергии (~1...10 мэВ), возможно применение ТГц систем для диагностики злокачественных новообразований *in vivo*, в реальном времени и без причинения ущерба ионизацией. ТГц излучение может проникать в ткани организма человека на глубину от сотен микрометров до миллиметра в зависимости от типа ткани и ее локализации, что тем не менее позволяет использовать ТГц системы для ранней неинвазивной диагностики злокачественных новообразований кожи и слизистой оболочки, малоинвазивной диагностики злокачественных новообразований кишечника, желудка и печени, интраоперационной диагностики тканей молочной железы и мозга.

Принцип работы ФПА-излучателя основан на воздействии на антенну лазерным импульсом фемтосекундной длительности, в результате чего в фотопроводящем слое ФПА происходит рождение электрон-дырочных пар, которые разделяет и ускоряет приложенное к антенне напряжение смещения. В результате, возникающий диполь Герца осциллирует с характерным субпикосекундным временем, и антенна излучает электромагнитный ТГц импульс. Лазерный импульс фокусируют в зазор ФПА с помощью системы параболических зеркал или передают посредством оптического волокна.

Ключевой особенностью ФПА является эффективность преобразования оптического лазерного излучения в генерируемое ТГц излучение, другими словами, эффективность оптико-ТГц конверсии. Эффективность ФПА ограничена низкими скоростями дрейфа фотоиндуцированных носителей заряда в полупроводниковых подложках [6–8] и порогом пробоя материала [9]. Кроме того, ФПА имеют низкую эффективность согласования импеданса антенны с сопротивлением фотопроводника [10–12].

Перспективным методом повышения эффективности ФПА является включение наноразмерных элементов (металлических частиц или так называемых "наноантенн") в зазор ФПА [13, 14]. В работе [9] было

показано, что использование наноантенн позволяет добиться значительного повышения эффективности оптико-ТГц конверсии. Систему, содержащую ФПА и массив оптических наноантенн, называют "гибридной" ФПА [14]. В работе [15] показано, что размещение серебряных частиц диаметром 170 нм в зазоре ФПА увеличило эффективность конверсии в 2 раза по сравнению с ранее сообщенными результатами для аналогичных структур. Однако недостатком ФПА с подобной геометрией является отсутствие непосредственного контакта наноантенны с электродами ФПА. Таким образом, площадь поверхности контакта антенны с той частью полупроводника, где происходит генерация носителей заряда, остается неизменной [16, 17].

Наиболее успешным методом повышения эффективности оптико-ТГц конверсии является использование металлических плазмонных метаповерхностей [16]. На границе фотопроводника с такими структурами наблюдается резонансное усиление напряженности электрического поля за счет возбуждения поверхностных плазмонных волн. Это приводит к росту числа фотовозбужденных носителей заряда, что позволяет добиться увеличения интенсивности генерации ТГц излучения. Такой метод является универсальным и может быть использован в любых типах антенн, работающих в режиме излучения ТГц волн и в режиме их приема. Впервые в работах [18, 19] было теоретически показано, что использование решеточной структуры может заметно увеличить интенсивность генерации ТГц излучения за счет возбуждения поверхностных плазмонных мод.

В данной работе предложено использовать плазмонную метаповерхность, сформированную в зазоре ФПА, для повышения эффективности и интегральной мощности генерации ТГц излучения. Численными методами оптимизированы и разработаны ФПА на основе сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs с имплементированными в зазоре плазмонными метаповерхностями разной толщины.

Оптимизация геометрии плазмонных метаповерхностей для ФПА

Плазмонные метаповерхности представляют собой дифракционную решетку, которая обеспечивает условия для возбуждения поверхностного плазмон-поляритона, а также повышает площадь контакта металла с фотопроводником. Резонансное усиление электрического поля световой волны накачки (плазмонный резонанс) в области контакта металла антенны с фотопроводящим слоем InGaAs приводит к увеличению эффективного коэффициента поглощения лазерного излучения в приповерхностном слое фотопроводника, и тем самым повышает эффективность конверсии энергии лазерного излучения в электромагнитные колебания ТГц диапазона [20].

Нами был исследован отклик плазмонной метаповерхности для ФПА на основе InGaAs при воздействии на нее лазерным излучением с длиной волны

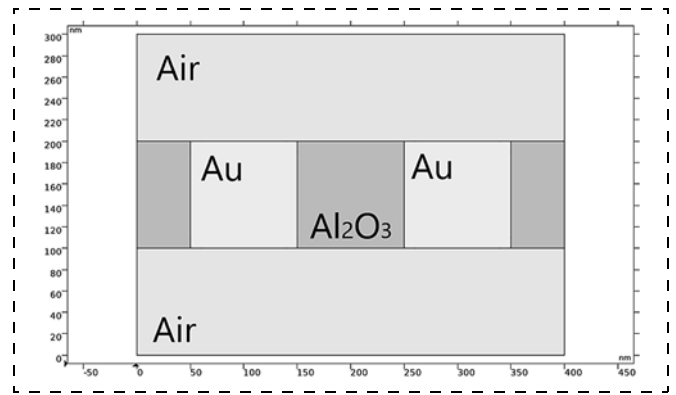


Рис. 1. Модель плазмонной решетки для расчета коэффициента пропускания

$\lambda_0 = 800$ нм и $\lambda_0 = 1560$ нм. Кроме того, были оптимизированы параметры плазмонной решетки, а именно ширина, период и длина электродов, и определены оптимальные параметры просветляющего слоя Al_2O_3 . Диэлектрик Al_2O_3 используют для заполнения зазоров между электродами плазмонной решетки и формирования интерфейса типа "металл—диэлектрик" вместо "металл—воздух", что за счет возбуждения более высоких мод плазмонных колебаний должно приводить к расширению спектра излучения ФПА, как было впервые теоретически предсказано в работе [21]. Слой Al_2O_3 , при соответствующем подборе толщины, является антиотражающим (просветляющим) покрытием для импульса лазерной накачки. Расчет эффективности возбуждения плазмонных мод в ФПА и оптимизация параметров плазмонной решетки были реализованы с помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов.

Первым этапом исследования плазмонной метаповерхности было определение геометрии решетки, при которой наблюдается максимальный коэффициент пропускания и максимум энергии излучения передается в фотопроводящие слои. Схема модели расчета приведена на рис. 1. Плазмонная решетка выполнена на основе системы металлов Ti/Au субволнового размера (100...250 нм). Для описания диэлектрических свойств системы металлов использовали приближение модели Друде—Лоренца [22], представляющее коллективные колебания заряда свободных носителей:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{\text{plasm}}^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma}, \quad (1)$$

где $\epsilon(\omega)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость; ω — угловая частота лазерного излучения; ω_{plasm} — плазменная частота; Γ — частота электронных столкновений. Пространство между металлом заполнено диэлектриком Al_2O_3 . Для корректного расчета коэффициента пропускания такой системы мы не учитывали поглощение в фотопроводнике и значение пропускания определяли как отношение между энергией, падающей с верхней границы волны лазерного излучения, и энергией, дошедшей до нижней границы моделируемого пространства.

Оптические свойства золота, из которого выполнена плазмонная решетка, были взяты из работы [23]. При длине волны $\lambda_0 = 800$ нм действительная и мнимая части показателя преломления золота составляют $n = 0,08019$ и $k = 5,05$ соответственно. Комплексный показатель преломления диэлектрика Al_2O_3 при длине волны $\lambda_0 = 800$ нм составил $n = 1,75$, $k = 0,02$ [24].

Рис. 2, а (см. четвертую сторону обложки) демонстрирует зависимость коэффициента пропускания плазмонной метаповерхности от высоты электродов h и периода решетки p при постоянном соотношении ширины электрода w к зазору g между ними. Видно, что полоса пропускания данной структуры находится при высоте электродов от 150 до 180 нм. Рис. 2, б позволяет определить оптимальные значения ширины электрода и зазора между ними при высоте электрода $h = 170$ нм. Максимальный коэффициент пропускания равный 85 % достигается при ширине $w = 100$ нм и зазоре $g = 120$ нм.

Следующим этапом было определение оптимальной толщины просветляющего слоя диэлектрика. Для этого были использованы рассчитанные параметры решетки с максимальным коэффициентом пропускания ($h = 170$ нм, $w = 100$ нм, $g = 120$ нм). В модель был добавлен фотопроводящий слой InGaAs толщиной 500 нм ($n = 3,66$, $k = 0,28$ для $\lambda_0 = 800$ нм) [25].

На рис. 3 приведена зависимость коэффициентов отражения от толщины диэлектрика над металлом. Добавление фотопроводящего слоя в модель заметно повышает потери на отражение, но увеличение толщины диэлектрика над металлической структурой до 120 нм позволяет нивелировать данный эффект и снизить коэффициент отражения до 26 %.

Также нами были построены аналогичные зависимости для $\lambda_0 = 1560$ нм. Оптические свойства металла, диэлектрика и фотопроводника составили $n = 0,1898$, $k = 10,35$ (Au), $n = 1,746$, $k = 0,018$ (Al_2O_3) и $n = 3,6$, $k = 0,08$ (InGaAs) соответственно. Как показано на рис. 4, а и б (см. четвертую сторону обложки), в случае длины волны 1560 нм оптимальные параметры решетки составляют: $h = 50$ нм, $w = 50$ нм и $g = 250$ нм.

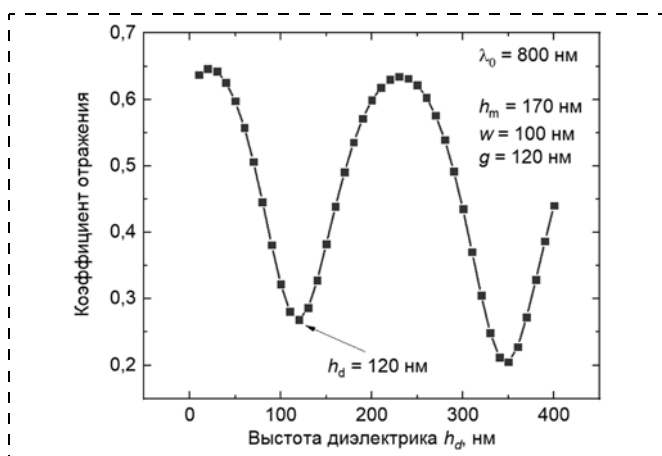


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от толщины диэлектрика над металлом при длине волны накачки $\lambda_0 = 800$ нм

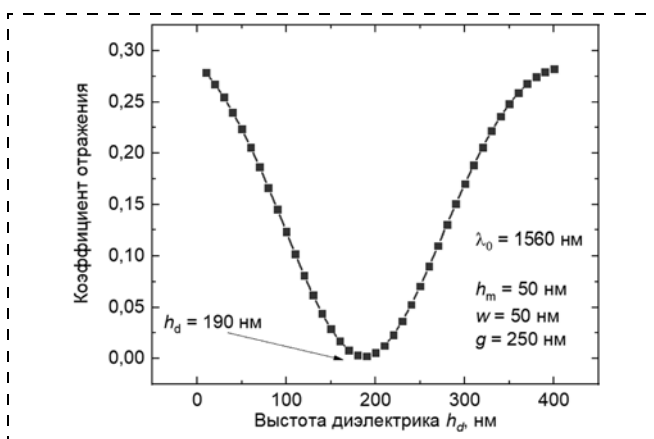


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от толщины диэлектрика над металлом при длине волны накачки $\lambda_0 = 1560$ нм

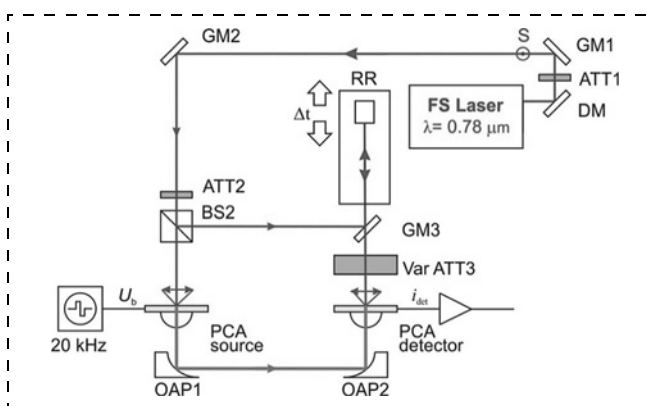


Рис. 6. Оптическая схема установки лабораторного импульсного спектрометра для исследования процессов генерации и детектирования ТГц излучения в ФПА

Максимальный коэффициент пропускания при таких параметрах плазмонной решетки составляет 91 %.

Оптимальная толщина просветляющего слоя диэлектрика над металлической структурой, при которой наблюдается минимальное отражение (0,003 %), составила 190 нм (рис. 5).

Проведенный электромагнитный расчет плазмонной метаповерхности для ФПА на основе InGaAs показал, что в области краев металла плазмонной решетки наблюдается резкое усиление электрического поля, вызванное возбуждением поверхностных плазмонных мод. При этом за счет применения предложенной методики оптимизации геометрии плазмонной решетки возможно снизить потери на отражение и добиться максимально эффективной передачи энергии лазерного излучения в фотопроводящие слои.

Испытания изготовленных ФПА с плазмонными метаповерхностями в составе лабораторного импульсного ТГц спектрометра

Измерения проводили с помощью оригинального лабораторного импульсного ТГц спектрометра [26, 27]. На рис. 6, 7 приведены его принципиальная схема и фотографии.

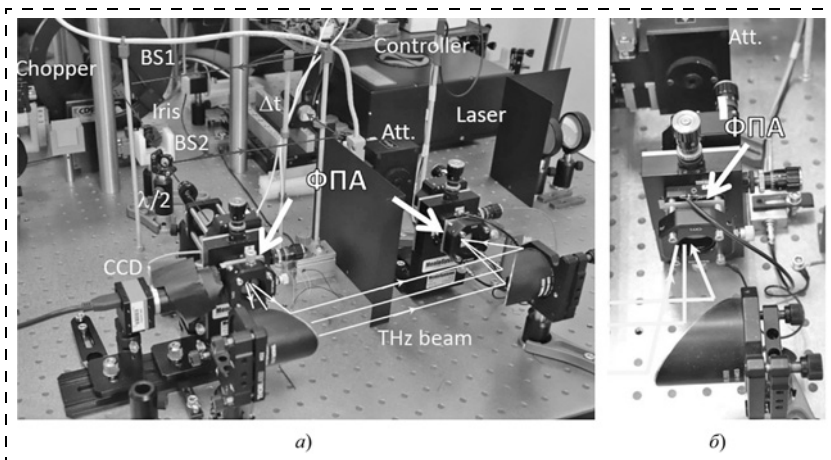


Рис. 7. Внешний вид импульсного ТГц спектрометра для исследования процессов генерации и детектирования ТГц излучения в ФПА (а) и увеличенное изображение оптического плеча и канала детектора (б)

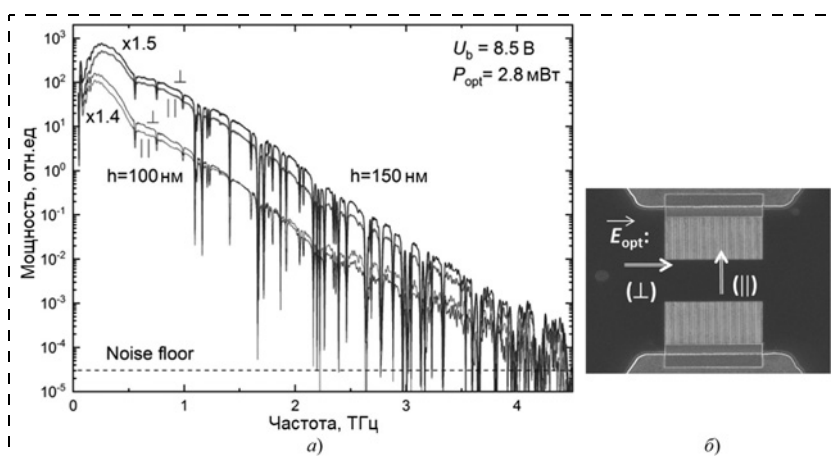


Рис. 8. Результаты измерения спектров мощности ФПА-излучателей с высокоаспектными плазмонными метаповерхностями высотой 100 и 150 нм (а) и схематичное изображения обозначения направления вектора напряженности электрического поля (б)

На антенну-излучатель подавалось переменное напряжение питания с амплитудой в диапазоне 1...30 В и частотой следования прямоугольных импульсов 10 кГц. Точковый сигнал с антенны-приемника синхронно выпрямлялся на данной частоте, что позволило добиться высокого значения сигнал/шум ~80 дБ. Для накачки антенны-излучателя и антенны-приемника использовали импульсы фемтосекундной длительности от перестраиваемого волоконного лазера AVESTA EFOA-SH со следующими параметрами излучения: длина волны 1550 нм, частота повторения импульсов 100 МГц, длительность импульсов 80 фс. Средняя мощность излучения в пучке зондирования составила 10 мВт, в то время как в пучке накачки с помощью фильтров интенсивность варьировалась в пределах 0,1...15 мВ. Для коллимации ТГц пучков на антенну-излучатель и на антенну-приемник устанавливали плоско-выпуклые кремниевые линзы. Положение каждой из исследуемых ФПА перед проведением измерений в THz-TDS подстраивали для достижения максимального сигнала с приемника. Условия

тестирования ТГц генерации в ФПА представлены в табл. 1.

Результаты измерения спектров мощности ФПА-излучателей с высокоаспектными плазмонными метаповерхностями приведены на рис. 8. Эксперименты показали, что при большей высоте (толщине) металлизации метаповерхности наблюдается больший прирост плотности мощности ТГц излучения. Мы связываем это с изменением характера распространения плазмонных мод в резонаторе с большей высотой ($h = 150$ нм против 100 нм) — возбуждением мод щелевого резонатора. Отметим, что вследствие экранирования прикладываемого к зазору антенны электрического поля смещения фотовозбужденными носителями заряда, "прирост" в спектрах плотности мощности ТГц излучения не является постоянной величиной. Отношение экспериментально измеренного фототока при ориентации вектора напряженности электрического поля световой волны поперек и вдоль электродов решетки для разной высоты (толщины) металлизации h и при разных условиях оптической накачки показано на рис. 9.

Смена ориентации оптического излучения E_{opt} относительно электродов решетки осуществляется $\lambda/2$ -пластинкой. Видно, что с увеличением напряжения смещения прирост фототока снижается, при этом по своей форме спектры мощности ТГц излучения в случае ТМ-поляризации и ТЕ-поляризации не отличаются.

Согласно полученным экспериментальным данным для ФПА-излучателей с высотой плазмонных электродов $h = 150$ нм максимальная зарегистрированная интегральная мощность ТГц излучения составила 5,3 мкВт (эффективность оптико-ТГц

Таблица 1

Условия тестирования ТГц генерации образцами ФПА

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Коллимирующая ТГц гиперполусферическая линза из HRFZ-Si | Ø12 мм, высота 7,1 мм |
| Фокусирующая оптическая линза Тип модуляции | Ø6 мм, f 10 мм Переменное напряжение питания антенны (меандр) |
| Частота модуляции Время интегрирования Временной шаг сканирования | 10 кГц 160 мкс 2 фс |
| Детектор Длина оптического пути ТГц пучка | TERA8-1 от MenloSystems 30 см |

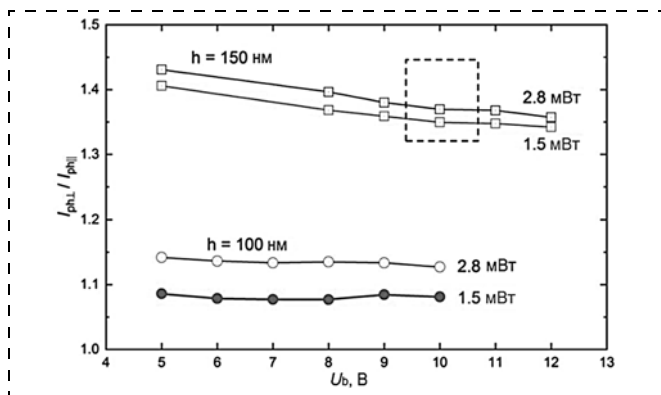


Рис. 9. Отношение экспериментально измеренного фототока при ориентации вектора напряженности электрического поля световой волны поперек и вдоль электродов решетки для разной высоты (толщины) металлизации h и при разных условиях оптической накачки

Таблица 2

Рабочий режим ФПА-излучателей

| Параметры | Значения |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Длительность лазерного импульса (τ) | < 100 фс |
| Частота следования импульсов (f) | 50...100 МГц |
| Средняя мощность накачки (P) | < 15 мВт |
| Фототок | < 300 мкА |
| Напряжение смещения (U) | < 25 В |
| Темновое сопротивление $U = 10$ В | 200 МОм |
| Фотосопротивление $U = 10$ В, $\tau = 100$ фс, $f = 60$ МГц и $P = 10$ мВт | 390 КОм |

конверсии 0,19 %) при лазерной накачке со средней мощностью 2,8 мВт и напряжении смещения 8,6 В. Прирост сигнала за счет возбуждения плазмонных мод превышает прирост шума, вследствие чего должно увеличиться отношение сигнал/шум. Параметры рабочего режим ФПА-излучателя приведены в табл. 2.

Заключение

Предложены и изготовлены плазмонные метаповерхности для ФПА на основе сверхрешеточных гетероструктур InAlAs/InGaAs. Проведенный электромагнитный расчет плазмонной метаповерхности показал, что в области краев металла плазмонной метаповерхности наблюдается резкое усиление электрического поля, вызванное возбуждением поверхностных плазмонных мод. Предложенная нами методика оптимизации геометрии плазмонной метаповерхности позволяет снизить потери на отражение импульса лазерной накачки и добиться максимально эффективной передачи энергии лазерного излучения в фотопроводящие слои.

В результате измерений ФПА в импульсном ТГц спектрометре установлено, что для ФПА-излучателей с высотой плазмонной метаповерхности $h = 150$ нм максимальная зарегистрированная интегральная мощность ТГц излучения составила 5,3 мкВт (эффективность оптико-ТГц конверсии 0,19 %) при лазерной накачке со средней мощностью 2,8 мВт и напряжении смещения 8,6 В. Прирост сигнала за счет возбуж-

дения плазмонных мод позволяет достичь высокого отношения сигнал/шум ~ 80 дБ.

Эксперименты показали, что при большей высоте (толщине) металлизации метаповерхности наблюдается больший прирост плотности мощности ТГц излучения. Это связано с изменением характера распространения плазмонных мод в резонаторе с большей высотой ($h = 150$ нм против 100 нм) — возбуждением мод щелевого резонатора. Отметим, что ввиду экранирования прилагаемого к зазору антенны электрического поля смещения фотовозбужденными носителями заряда, значение "прироста" в спектрах плотности мощности ТГц излучения не является постоянной величиной.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-79-10195 и гранта по программе стипендии Президента Российской Федерации (СП-952.2021.4).

Список литературы

- Henri R., Nallappan K., Ponomarev D. S., Guerboukha H., Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Khabibullin R. A., Skorobogatiy M. Fabrication and Characterization of an 8×8 Terahertz Photoconductive Antenna Array for Spatially Resolved Time Domain Spectroscopy and Imaging Applications // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 117691–117702.
- Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Goncharov Y. G., Zaytsev K. I., Khabibullin R. A., Buryakov A. M., Mishina E. D., Ponomarev D. S. Strain-Induced InGaAs-Based Photoconductive Terahertz Antenna Detector // IEEE Trans. THz. Sci. Technol. 2021. Vol. 11 (4). P. 417–424.
- Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Reznik R. R., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Arsenides and related III–V materials-based multilayered structures for terahertz applications: various designs and growth technology // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2020. Vol. 66. P. 100485.
- Zaytsev K. I., Dolganova I. N., Chernomyrdin N. V., Katyba G. M., Gavidush A., Cherkasova O. P., Komandin G., Shchedrina M. A., Khodan A. N., Ponomarev D. S., Reshetov I. V., Karasik V., Skorobogatiy M., Kurlov V. N., Tuchin V. V. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: A review // J. Optics. 2020. Vol. 22. P. 013001.
- Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Glinskiy I. A., Zenchenko N. V., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khabibullin R. A., Otsuji T., Ponomarev D. S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: A review // Optical Engineering. 2019. Vol. 59. Is. 6. P. 061608.
- Loata G. C., Thomson M. D., Loffler T., Roskos H. G. Radiation field screening in photoconductive antennae studied via pulsed terahertz emission spectroscopy // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 91 (23). P. 232506.
- Hattori T., Egawa K., Ookuma S., Itatani T. Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45 (4L). P. L422.
- Piao Z., Tani M., Sakai K. Carrier Dynamics and Terahertz Radiation in Photoconductive Antennas // Japanese Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 39 (1R). P. 96.
- Jooshesh A., Smith L., Masnadi-Shirazi M., Bahrami-Yekta V., Tiedje T., Darcie T. E., Gordon R. Nanoplasmonics enhanced terahertz sources // Optics express. 2014. Vol. 22 (23). P. 27992–28001.
- Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Total efficiency of optical-to-terahertz conversion in photoconductive antennas based on LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ // Russian Microelectronics. 2017. Vol. 46, № 6. P. 408–413.

11. **Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Bilyk V. R., Mishina E. D., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E.** Epitaxial stresses in an InGaAs photoconductive layer for terahertz antennas // *Tech. Phys. Lett.* 2017. Vol. 43. N. 11. P. 1020–1022.
12. **Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Bilyk V. R., Mishina E. D., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E.** Epitaxial stresses in InGaAs photoconductive layer for THz antennas // *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 20–22 Sept. 2017. P. 1–3.
13. **Castro-Camus E., Alfaro M.** Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review // *Photon. Res.* 2016. Vol. 4. P. A36.
14. **Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P.** Enhancement of Terahertz Photoconductive Antennas and Photomixers Operation by Optical Nanoantennas // *Laser & Photonics Reviews*. 2017. Vol. 11. N. 1. P. 1600199 (20 p.).
15. **Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Toropov N., Vartanyan T. A., Belov P., Alu A., Rafailov E. U.** Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. N. 6624 P. 1–7.
16. **Burford N., El-Shenawee M.** Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas // *Journal of the Optical Society of America B*. 2016. Vol. 33. N. 4. P. 748–759.
17. **Ponomarev D. S., Gorodetsky A., Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Khabibullin R. A., Grekhov M. M., Zaytsev K. I., Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Mishina E. D.** Enhanced terahertz emission from strain-induced InGaAs/InAlAs superlattices // *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 125. N. 15. P. 151605.
18. **Catrysse P. B., Veronis G., Shin H., Shen J. T., Fan S.** Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88. P. 031101 (4 p.).
19. **Hsieh B.-Y., Jarrahi M.** Analysis of periodic metallic nano-slits for efficient interaction of terahertz and optical waves at nano-scale dimensions // *Journal Of Applied Physics*. 2011. Vol. 109. P. 084326 (6 p.).
20. **Yang S.-H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M.** High Power Terahertz Generation Using Large Area Plasmonic Photoconductive Emitters // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014. Vol. 4. P. 575–581.
21. **Catrysse P. B., Veronis G., Shin H., Shen J.-T., Fan S.** Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88. P. 031101.
22. **Ordal M. A., Long L. L., Bell R. J., Bell S. E., Bell R. R., Alexander R. W., Ward C. A.** Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22. N. 7.
23. **Babar S., Weaver J. H.** Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 477–481.
24. **Querry M. R.** Optical constants, Contractor Report CRDCR-CR-85034 (1985).
25. **Dinges H. W., Burkhard H., Losch R., Nickel H., Schlapp W.** Refractive indices of InAlAs and InGaAs/InP from 250 to 1900 nm determined by spectroscopic ellipsometry. *Applied Surface Science*. 1992. Vol. 54. P. 477–481.
26. **Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Ryzhii M., Otsuji T., Spector I. E., Shur M., Skorobogatiy M., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S.** Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps // *AIP Advances*. 2019. Vol. 9. P. 015112.
27. **Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Pavlov A. Yu., Khabibullin R. A., Goncharov Yu. G., Spector I. E., Komandin G. A., Yurchenko S. O., Chernomyrdin N. V., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S.** Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation // *Semi-cond. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34. N. 3. P. 034005.

I. A. Glinskiy, Researcher at IUHFSE RAS, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru,
A. E. Yachmenev, Senior Researcher at IUHFSE RAS, **D. V. Lavrukhin**, Researcher at IUHFSE RAS,
R. A. Khabibullin, Leading Researcher at IUHFSE RAS, **S. A. Gamkrelidze**, Director at IUHFSE RAS,
K. I. Zaytsev, Head of Lab, A. M. Prokhorov GPI RAS, **I. E. Spector**, Head of Department,
A. M. Prokhorov GPI RAS, **D. S. Ponomarev**, Deputy Director at IUHFSE RAS,
Institute of Ultra-High-Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow,
Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (GPI RAS), Moscow

Corresponding author:

Glinskiy Igor' A., Researcher, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru, Institute of Ultra-High-Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, Russian Federation

Plasmonic Metasurfaces for Controlling the Spectrum of Terahertz Radiation Sources

*Received on January 31, 2022
Accepted on February 11, 2022*

We report on the development and fabrication of a plasmonic metasurfaces for PCA based on InAlAs/InGaAs superlattice heterostructures. As a result of THz time-domain measurements, it was found that for PCA emitters with a 150 nm thick plasmonic metasurface, the maximum recorded overall THz power was 5.3 μW (the optical-THz conversion efficiency was 0.19 %) under laser pumping with an average power of 2.8 mW and a bias voltage of 8.6 V. The increase in the signal-to-noise ratio due to the excitation of plasmon modes exceeds ~80 dB. The experiments have shown that the increase of metallization thickness provides the increase of the emitted power. The results could open a pathway towards the development of the Russian THz spectroscopic and imaging systems.

Keywords: terahertz sources, photoconductive antenna, terahertz radiation, metasurfaces

For citation:

Glinskiy I. A., Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Khabibullin R. A., Gamkrelidze S. A., Zaytsev K. I., Spektor I. E., Ponomarev D. S. Plasmonic Metasurfaces for Controlling the Spectrum of Terahertz Radiation Sources, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 81–87.

DoI: 10.17587/nmst.24.81-87

References

1. **Henri R., Nallappan K., Ponomarev D. S., Guerboukha H., Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Khabibullin R. A., Skorobogatiy M.** Fabrication and Characterization of an 8×8 Terahertz Photoconductive Antenna Array for Spatially Resolved Time Domain Spectroscopy and Imaging Applications, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 117691–117702.
2. **Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Goncharov Y. G., Zaytsev K. I., Khabibullin R. A., Buryakov A. M., Mishina E. D., Ponomarev D. S.** Strain-Induced InGaAs-Based Photoconductive Terahertz Antenna Detector, *IEEE Trans. THz. Sci. Technol.*, 2021, vol. 11 (4), pp. 417–424.
3. **Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Reznik R. R., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S.** Arsenides and related III–V materials-based multilayered structures for terahertz applications: various designs and growth technology, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2020, vol. 66, p. 100485.
4. **Zaytsev K. I., Dolganova I. N., Chernomyrdin N. V., Katyba G. M., Gvdush A., Cherkasova O. P., Komandin G., Shchedrina M. A., Khodan A. N., Ponomarev D. S., Reshetov I. V., Karasik V., Skorobogatiy M., Kurlov V. N., Tuchin V. V.** The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: A review, *J. Optics*, 2020, vol. 22, p. 013001.
5. **Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Glinskiy I. A., Zenchenko N. V., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khabibullin R. A., Otsuji T., Ponomarev D. S.** Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: A review, *Optical Engineering*, 2019, vol. 59, is. 6, p. 061608.
6. **Loata G. C., Thomson M. D., Loffler T., Roskos H. G.** Radiation field screening in photoconductive antennae studied via pulsed terahertz emission spectroscopy, *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91 (23), p. 232506.
7. **Hattori T., Egawa K., Ookuma S., Itatani T.** Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45 (4L), p. L422.
8. **Piao Z., Tani M., Sakai K.** Carrier Dynamics and Terahertz Radiation in Photoconductive Antennas, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 39 (1R), p. 96.
9. **Jooshesh A., Smith L., Masnadi-Shirazi M., Bahrami-Yekta V., Tiedje T., Darcie T. E., Gordon R.** Nanoplasmonics enhanced terahertz sources, *Optics express*, 2014, vol. 22 (23), pp. 27992–28001.
10. **Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S.** Total efficiency of optical-to-terahertz conversion in photoconductive antennas based on LT GaAs and In_{0.38}Ga_{0.62}As, *Russian Microelectronics*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 408–413.
11. **Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Bilyk V. R., Mishina E. D., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E.** Epitaxial stresses in an InGaAs photoconductive layer for terahertz antennas, *Tech. Phys. Lett.*, 2017, vol. 43, no. 11, pp. 1020–1022.
12. **Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Bilyk V. R., Mishina E. D., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E.** Epitaxial stresses in InGaAs photoconductive layer for THz antennas, *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 20–22 Sept. 2017, pp. 1–3.
13. **Castro-Camus E., Alfaro M.** Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review, *Photon. Res.*, 2016, vol. 4, p. A36.
14. **Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P.** Enhancement of Terahertz Photoconductive Antennas and Photomixers Operation by Optical Nanoantennas, *Laser & Photonics Reviews*, 2017, vol. 11, no. 1, p. 1600199 (20 p.).
15. **Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Toropov N., Vartanyan T. A., Belov P., Alu A., Rafailov E. U.** Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 6624, pp. 1–7.
16. **Burford N., El-Shenawee M.** Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas, *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, vol. 33, no. 4, pp. 748–759.
17. **Ponomarev D. S., Gorodetsky A., Yachmenev A. E., Pushkarev S. S., Khabibullin R. A., Grekhov M. M., Zaytsev K. I., Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Mishina E. D.** Enhanced terahertz emission from strain-induced InGaAs/InAlAs superlattices, *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 15, p. 151605.
18. **Catrysse P. B., Veronis G., Shin H., Shen J. T., Fan S.** Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits, *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, p. 031101 (4 p.).
19. **Hsieh B.-Y., Jarrahi M.** Analysis of periodic metallic nano-slits for efficient interaction of terahertz and optical waves at nano-scale dimensions, *Journal Of Applied Physics*, 2011, vol. 109, p. 084326 (6 p.).
20. **Yang S.-H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M.** High Power Terahertz Generation Using Large Area Plasmonic Photoconductive Emitters, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, vol. 4, pp. 575–581.
21. **Catrysse P. B., Veronis G., Shin H., Shen J.-T., Fan S.** Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits, *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, p. 031101.
22. **Ordal M. A., Long L. L., Bell R. J., Bell S. E., Bell R. R., Alexander R. W., Ward C. A.** Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared, *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 7.
23. **Babar S., Weaver J. H.** Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited, *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, pp. 477–481.
24. **Querry M. R.** Optical constants, Contractor Report CRDC-CR-85034, 1985.
25. **Dinges H. W., Burkhard H., Losch R., Nickel H., Schlapp W.** Refractive indices of InAlAs and InGaAs/InP from 250 to 1900 nm determined by spectroscopic ellipsometry, *Applied Surface Science*, 1992, vol. 54, pp. 477–481.
26. **Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Ryzhii M., Otsuji T., Spektor I. E., Shur M., Skorobogatiy M., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S.** Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps, *AIP Advances*, 2019, vol. 9, p. 015112.
27. **Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Pavlov A. Yu., Khabibullin R. A., Goncharov Yu. G., Spektor I. E., Komandin G. A., Yurchenko S. O., Chernomyrdin N. V., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S.** Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation, *Semicond. Sci. Technol.*, 2019, vol. 34, no. 3, p. 034005.

Р. Р. Галиев, науч. сотр., e-mail: rgaliev@isvch.ru, **А. Ю. Павлов**, канд. техн. наук, зав. лаб., **Н. С. Тарасов**, мл. науч. сотр., **К. Н. Томош**, науч. сотр.,
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАТЕРАЛЬНО-СВЯЗАННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ ОДНОЧАСТОТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Поступила в редакцию 14.02.2022

Описан успешный опыт разработки и использования технологии формирования брэгговской дифракционной решетки для получения одночастотного режима работы полупроводникового полоскового лазера с распределенной обратной связью. С использованием данной технологии впервые в России были изготовлены передающие лазерные модули с длиной волны 1,55 мкм, работающие в одномодовом режиме с коэффициентом подавления боковых мод не менее 50 дБ. Разработанная технология позволяет формировать жесткую маску для травления латерально связанной решетки в области, непосредственно примыкающей к гребню, с шагом штрихов решетки в диапазоне 0,2...0,25 мкм, что соответствует диапазону рабочих длин волн 1,3...1,6 мкм.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография, травление полупроводников, брэгговская решетка, распределенная обратная связь, лазерный диод

Введение

В современном мире системы высокоскоростной связи уже давно играют одну из фундаментальных ролей. Среди прочих реализаций каналов для передачи данных существенное развитие и распространение получили волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), в которых в качестве носителя информации используется состояние электромагнитной волны (фотонов) несущей частоты — амплитуда, фаза, поляризация, а в качестве среды распространения — оптическое волокно различных видов. Для формирования сигнала в таких системах чаще всего используют полупроводниковые лазерные модули, в частности, полосковые (гребневые) лазеры с длиной волны в диапазоне $\lambda = 1,3...1,6$ мкм, излучение которых может быть многомодовым или одномодовым. Высокая плотность информационных каналов достигается в том числе с помощью их разделения по длине волны (WDM — *wavelength-division multiplexing*), для чего необходимо иметь одномодовые излучатели с очень точно задаваемой длиной волны, например полупроводниковые лазерные диоды с распределенной обратной связью (РОС-ЛД).

Полосковые РОС-ЛД можно разделить на два типа по расположению спектрозадающего элемента: в пределах проекции активной области и рядом с ней. Первый вариант предполагает модуляцию оптических характеристик активной области (например, коэффициента преломления [1]). Такие лазеры могут быть изготовлены с различным подходом к технологии, но во всех случаях это требует существенного изменения традиционной технологии полосковых ЛД, что усложняет и удорожает процесс. Второй вариант обычно представляет собой вытравленную в полупровод-

нике брэгговскую решетку, прилегающую к активной области с обеих сторон полоска или являющуюся частью полоска. В таком случае возникает латеральная связь распространяющейся в активной области электромагнитной волны и решетки за счет затухающих краев распределения энергии волны. В зарубежной литературе такие лазеры обозначают как *Laterally Coupled DFB* (с латерально-связанной РОС) [2, 3]. На рис. 1 показана общая схема подобного лазера, где w — ширина лазерного полоска (верхнего контакта); Λ — период решетки; a — ширина штриха решетки; h — высота штриха (глубина травления). Активная область, как видно из рисунка, лежит ниже.

Для оптимального контроля модового состава излучения (одночастотный режим) в решетку можно ввести сдвиг фазы на $\lambda/4$ (соответствует сдвигу части решетки первого порядка на дополнительные $\Lambda/2$) в центре кристалла ЛД [4]. Для $\lambda = 1,3...1,5$ мкм типичные периоды Λ (для решеток первого порядка) в за-

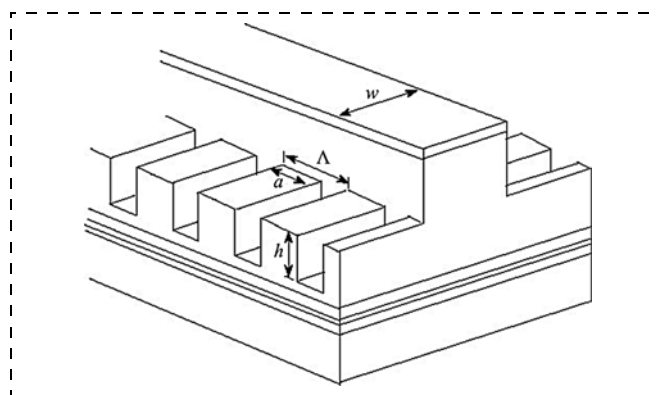


Рис. 1. Схема полоскового ЛД с латеральной связанной РОС

висимости от состава лазерных гетероструктур лежат в диапазоне 198...240 нм и должны быть заданы с точностью 0,1 нм. В зависимости от требуемой мощности ЛД длина кристалла и, соответственно, необходимая длина когерентности решетки может достигать нескольких миллиметров. Отсюда следует, что такая конструкция решетки требует особо прецизионной литографии.

Одним из возможных методов для формирования таких элементов является электронно-лучевая литография, которая может обеспечить формирование решеток с подобными периодами и при этом позволяет вводить произвольные фазовые сдвиги. Кроме того, такой метод позволяет формировать решетки с периодом, точно соответствующим параметрам конкретной пластины с лазерной структурой. Далее будет описано использование этой технологии в совместных работах АО НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха и ИСВЧПЭ им. В. Г. Мокерова РАН.

Постановка задачи

В рамках работ по созданию одночастотных (одно-модовых) РОС-ЛД было принято решение модифицировать технологический маршрут следующим образом: после формирования рельефа полосковых структур на четвертях двухдюймовой пластины в АО НИИ "Полюс" образцы передают в ИСВЧПЭ РАН чтобы сформировать жесткую маску для последующего ионно-химического травления решетки. Затем образцы возвращали обратно, и выполняли дальнейшие технологические операции, сборку модулей в корпус и исследование параметров. Таким образом, технологический блок формирования решетки РОС был практически "бесшовно" внедрен в уже устоявшуюся в АО НИИ "Полюс" последовательность операций.

В качестве материала маски была выбрана двух-слойная система диэлектриков $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, в которой верхний слой тонкого (около 100...150 Å) оксида алюминия, осажденного методом атомно-слоевого осаждения, использовали как маску для травления основ-

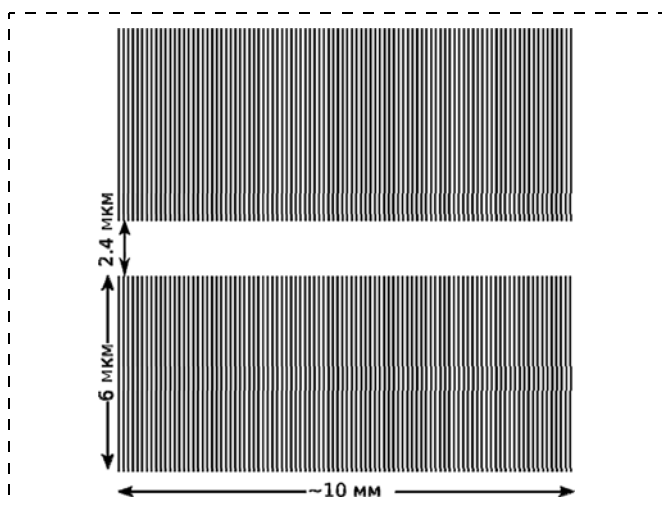


Рис. 2. Схема рисунка для экспонирования резиста электронным лучом

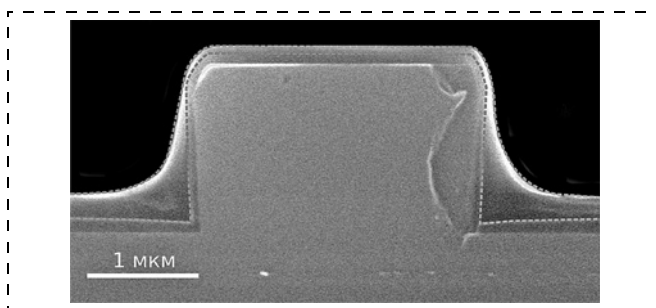


Рис. 3. Снимок РЭМ скола полоска лазерной структуры высотой около 1,5 мкм с нанесенным резистом (границы показаны красным пунктиром)

ного слоя оксида кремния (толщиной 0,12...0,15 мкм), осажденного методом ICP-CVD. Более подробно элементы этой технологии описаны в работе [5]. Первичная маска, сформированная из электронного резиста ПММА 950К с номинальной толщиной до 0,25...0,3 мкм, представляла собой ряд штрихов с периодом Λ , шириной штриха 90...120 нм и длиной штриха 6...10 мкм (рис. 2).

Особенности работы с резистом

Основные технологические трудности связаны с процессом литографии на пластине со сформированными гребнями высотой около 1,5 мкм. При этом требовалось сформировать в резисте решетки, непосредственно примыкающие к краям гребня в нижней части рельефа. На рис. 3 показано поперечное сечение лазерного полоска с нанесенным на центрифуге электронным резистом РММА950К А2.

Хорошо видно, что толщина резиста при приближении к полоску сильно увеличивается, но в то же время на верхних углах ступени практически сходит на нет. Такая ситуация приводит к ряду проблем, например, к существенной боковой засветке выходящими из грани полоска электронами, что проиллюстрировано на рис. 4, а. Дело в том, что невозможно исключить экспонирование верхней грани полоска, ширина которого технологически определяется не точно и может меняться на одной пластине, например, от 3 до 4 мкм. Боковая засветка приводит к уширению штрихов решетки вблизи полоска с возможным отрывом ("схлопыванием" ламелей) маски от подложки (рис. 4, б). Идеальным вариантом для литографии было бы наличие резиста однородной толщины только на горизонтальных поверхностях, но такой вариант практически нереализуем либо требует существенного усложнения процесса подготовки маски резиста. В этом случае удалось подобрать оптимальные условия нанесения резиста (концентрацию резиста и временной профиль скорости центрифуги), которые обеспечили приемлемые результаты литографии (рис. 4, в).

Недостаточная толщина резиста на углах полоска приводит к тому, что жесткая маска в этих местах истончается, а полупроводниковые слои (верхний контакт), соответственно, вытравливаются, что приводит

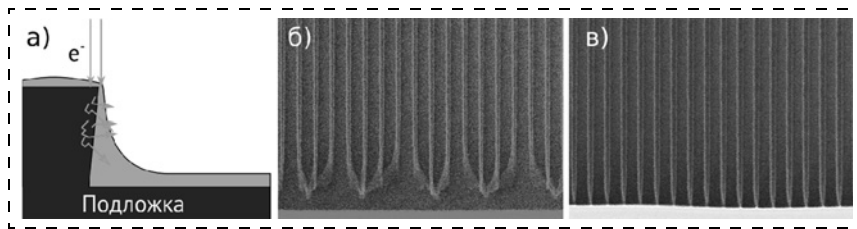


Рис. 4. Вид в разрезе:

a — схема паразитной боковой засветки резиста. Вид сверху; *б* — "схлопывание" ламелей резиста; *в* — приемлемый результат проявления резиста (светлый край полоска внизу)

к увеличению контактного сопротивления. Для решения этой проблемы был использован дополнительный слой SiO_2 (около 0,2 мкм), который оставался сверху полоска перед осаждением основных слоев жесткой маски. Таким образом, толщина жесткой маски на полоске была больше, чем рядом с ним, что дополнительно защитило контактный слой.

Для оптимального проявления структур в резисте использовали контрастный проявитель для ПММА на основе смеси изопропилового спирта и воды в соотношении (7:3). Такой проявитель позволяет проработать рисунок в утолщенном резисте в примыкании к полоску без существенного распроявления остальных областей.

Для каждого поддиапазона периода решетки Λ была подобрана оптимальная пара дозы экспонирования и номинальной ширины штриха решетки ($D = 250...260$ мкКл/см² и $w = 70...90$ нм).

Требования к литографическому оборудованию

Как уже было сказано выше, электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) используется здесь в качестве прецизионного метода литографии. Действительно, типичные характеристики установок ЭЛЛ — ускоряющее напряжение, а также размер и точность позиционирования луча — заведомо удовлетворяют требованиям для подобной работы. Например, энергии электронов 50 кэВ достаточно, чтобы эффективно засвечивать резист на глубину около 1,5 мкм, т. е. там, где резист утолщен в области примыкания к краю полоска. Однако задание периода с точностью 0,1 нм в рамках адресной сетки, даже 20-битного паттерн-генератора обычной системы ЭЛЛ, напрямую невозможно, так как линейный размер поля отклонения типичной системы ЭЛЛ не превышает 0,5 мм. Например, на установке ЭЛЛ *Raith Voyager* минимальный шаг адресации пикселей составляет 0,5 нм.

Кроме того, необходимость соблюдения пространственной когерентности штрихов решетки на расстояниях порядка миллиметров или более делает невозможной такую литографию напрямую ввиду неизбежных ошибок сшивки полей, составляющих даже на самых высококлассных установках единицы нанометров. И если первую проблему (масштаба пикселя) можно решить, например, дополнительным калибровочным изменением масштаба отклонения луча, то ошибку сшивки полей можно только уменьшить тща-

тельной калибровкой, хотя даже в этом случае она составит не менее 5...10 % от шага решетки, что является непредсказуемым и недопустимым фазовым скачком.

Такая задача при необходимости решается в том или ином приближении в зависимости от возможностей оборудования, но система ЭЛЛ *Raith Voyager* обладает уникальной опцией, которая позволяет решить эту задачу напрямую. Так называемый режим MBMS (*moving beam, moving stage*), в

котором развертка луча происходит синхронно с движением стола так, чтобы обеспечить точность задания среднего шага периодических структур в 0,1 нм, позволяет бесшовно экспонировать различные периодические структуры практически неограниченной длины. Для решетки с фазовым сдвигом базовая ячейка рисунка топологии может совпадать с полной длиной решетки или с ее половиной. Во втором случае расчет идет на то, что если участок решетки со сдвигом фазы будет находиться на краю базовой ячейки, то один сдвиг будет расположен, как и необходимо, примерно в центре кристалла ЛД, а другой сдвиг будет рядом с торцом ЛД и не будет влиять на поведение волны. При необходимости на одном образце можно формировать требуемое число вариантов решеток с разным шагом, например, 199,8 нм, 198,0 нм и т. д.

Результаты

Внешний вид типичного РОС-ЛД, изготовленного по описанной технологии, показан на рис. 5. Там же показано поперечное сечение решетки. В рамках данной технологии были изготовлены маломощные лазеры для прямой токовой модуляции с длиной резонатора 200 мкм, среднемощные лазеры постоянного режима работы с длиной резонатора 1,6 мм и другие варианты.

Для лазера на 1,55 мкм с длиной резонатора 1,6 мм преимущество РОС-версии перед обычной версией ЛД (с резонатором Фабри-Перо) было очевидным.

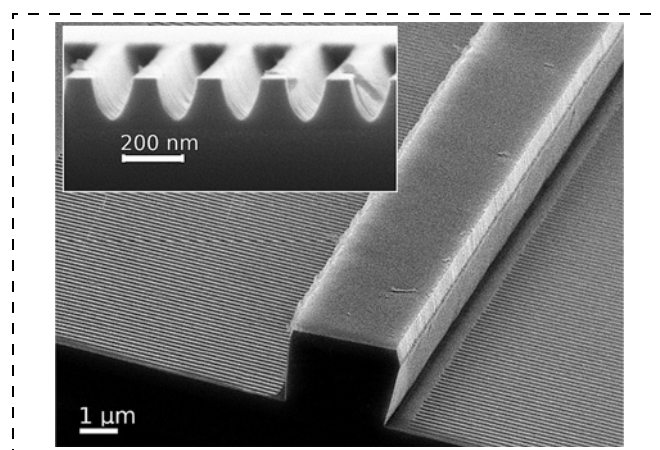


Рис. 5. Общий вид лазерного полоска (ребра) РОС-ЛД и фрагмент поперечного сечения брэгговской решетки (на врезке)

В частности, зависимость длины волны излучения от тока накачки и температуры была на порядки меньше, а коэффициент подавления боковых мод составил не менее 50 дБ, что говорит о высоком коэффициенте связи волны с решеткой. Более подробно параметры таких лазеров приведены в работе [6]. Сходные результаты получены и для лазеров с $\lambda = 1,3$ мкм.

Заключение

Описанные здесь результаты были получены и использованы при выполнении НИР "Фонон-4", "Фонон-12" и "Микро-П". Таким образом, разработанная технология показала свою применимость для формирования брэгговских решеток в широком диапазоне точно задаваемых периодов и с высокой пространственной когерентностью без существенного влияния на технологический маршрут и электрические параметры обычных полосковых ЛД.

Авторы благодарят членов коллектива АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха", в частности, Ю. В. Курнявко, В. Д. Курносову, А. В. Иванову и др. за плодотворную совместную работу.

Список литературы

1. Itaya Y., Matsuoka T., Nakano Y., Suzuki Y., Kuroiwa K., Ikegami T. New 1.5 μm wavelength GaInAsP/InP distributed feedback laser // *Electron Lett.* 1982. Vol. 18. P. 1006—1008.
2. Martin R. D., Forouhar S., Keo S., Lang R. J., Hunsperger R. G., Tiberio R. C., Chapman P. F. CW performance of an InGaAs-GaAs-AlGaAs laterally-coupled distributed feedback (LC-DFB) ridge laser diode // *IEEE Photonics Technology Letters.* 1995. Vol. 7, N. 3. P. 244—246.
3. Millett R., Dridi K., Benhsaien A., Schriemer H., Hinzer K., Hall T. Fabrication-tolerant 1310 nm laterally coupled distributed feedback lasers with high side mode suppression ratios // *Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications.* 2011. Vol. 9. P. 111—118.
4. Haus H. A., Shank C. V. Antisymmetric taper of distributed feedback lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* 1976. QE-12. P. 532—539.
5. Патент 2624600 РФ. Способ изготовления Т-образного затвора / Федоров Ю. В., Галиев Р. Р., Павлов А. Ю.; Приоритет от 07.10.2016 г.
6. Багаева О. О., Галиев Р. Р., Данилов А. И., Иванов А. В., Курносов В. Д., Курносов К. В., Курнявко Ю. В., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Романцевич В. И., Симарков В. А., Чернов Р. В., Шишков В. В. Экспериментальные исследования мощных полупроводниковых одночастотных лазеров спектрального диапазона 1,5—1,6 мкм // *Квантовая электроника.* 2020. Т. 50, № 2. С. 143—146.

Galiev R. R., Researcher, e-mail: rgaliev@isvch.ru, Pavlov A. Yu., Ph. D., Head of the Lab., Tarasov N. S., Junior Researcher, Tomosh K. N., Researcher, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics by V. G. Mokerov of Russian Academia of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow

Corresponding autor:

Galiev Rinat R., Researcher, IUHFSE RAS, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: rgaliev@isvch.ru

On The Technology of the Bragg Grating for the Laterally Coupled Single-Mode Distributed Feedback Laser Diodes

Received on February 14, 2022

Accepted on February 21, 2022

The paper presents the results of the successful development and application of the diffractive Bragg grating fabrication technology for the single-mode ridge-type DFB laser realization. The single-mode 1550 nm laser transmitters with SMSR not less than 50 dB were first made in Russia. The developed technology is capable of making a dielectric hard mask for etching the laterally coupled grating with periods in the range of 0.19—0.25 μm , which corresponds to a wavelength range 1.3—1.6 μm , and has been easily incorporated into the conventional route of the DFB-laser manufacturing process of the JSC "NII "Polyus" by M. F. Stelmakh".

Keywords: electron beam lithography, etching of semiconductors, Bragg grating, distributed feedback, laser diode

For citation:

Galiev R. R., Pavlov A. Yu., Tarasov N. S., Tomosh K. N. On The Technology of the Bragg Grating for the Laterally Coupled Single-Mode Distributed Feedback Laser Diodes, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 88—91.

DOI: 10.17587/nmst.24.88-91

References

1. Itaya Y., Matsuoka T., Nakano Y., et al. New 1.5 μm wavelength GaInAsP/InP distributed feedback laser, *Electron Lett.*, 1982, vol. 18, pp. 1006—1008.
2. Martin R. D., Forouhar S., Keo S., et al. CW performance of an InGaAs-GaAs-AlGaAs laterally-coupled distributed feedback (LC-DFB) ridge laser diode, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, vol. 7, no. 3, pp. 244—246.
3. Millett R., Dridi K., Benhsaien A., et al. Fabrication-tolerant 1310 nm laterally coupled distributed feedback lasers with

high side mode suppression ratios, *Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications*, 2011, vol. 9, pp. 111—118.

4. Haus H. A., Shank C. V. Antisymmetric taper of distributed feedback lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1976, QE-12, pp. 532—539.

5. Патент RU2624600C1. Method of manufacturing a T-shaped gate / Fedorov Yu. V., Galiev R. R., Pavlov A. Yu.; Priority date 07.10.2016. (in Russian).

6. Багаева О. О., Галиев Р. Р., Данилов А. И., et al. Experimental studies of 1.5—1.6 μm high-power single-frequency semiconductor lasers, *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, no. 2, pp. 143—146 (in Russian).

А. Н. Алёшин¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., a.n.aleshin@mail.ru,

Н. В. Зенченко^{1,2}, науч. сотр., zenchenko.nikolay@yandex.ru,

О. А. Рубан^{1,2}, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., mux.05@mail.ru

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

² МИРЭА — Российский технологический университет

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ В МЕМРИСТОРАХ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Поступила в редакцию 31.01.2022

Были получены экспериментальные данные по измерению сопротивления и электропроводности в низкоомном режиме работы мемристора на основе селенида германия с самоформирующимся токопроводящим каналом в виде серебряной нити в диапазоне рабочих частот и температур. В частотном эксперименте влияние частоты переключений проверяли при комнатной температуре в диапазоне 1...10 000 Гц. Основным результатом эксперимента явилось выявление в полулогарифмических координатах линейной взаимозависимости между значением электропроводности и временем рабочего цикла мемристора, что позволило ввести температурно-зависимую кинетическую константу. Данный экспериментальный факт позволил установить основной параметр, влияющий на форму ВАХ, — толщину токопроводящего канала.

Ключевые слова: мемристор, твердый электролит, аморфная матрица, агломерационные скопления, нанополости, закон Аррениуса, энергия активации

Введение

В настоящее время активно ведутся разработки новых компьютерных технологий, таких как квантовые компьютеры и нейроморфные системы. Нейроморфная система представляет собой искусственный объект, который имитирует работу человеческого мозга. Принцип действия подобной системы заключается в "запоминании" новой информации путем изменения проводимости контактов между искусственными нейронами (синапсами) [1—3]. Одним из вариантов реализации подобной системы может быть массив мемристоров.

Мемристор представляет собой функциональное устройство с двумя электродами, пространство между которыми заполнено диэлектриком. В процессе работы на один из электродов мемристора подается управляющий сигнал различного знака, а нижний электрод заземляется. Необходимым условием для появления эффекта резистивной памяти является формирование в рабочем теле мемристора токопроводящего канала

(ТК). В процессе работы мемристора происходит переключение его режима из высокоомного состояния HRS (HRS — *high resistance state*) в низкоомное состояние LRS (LRS — *low resistance state*) и обратно [4—6]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) биполярного мемристора образует петлю гистерезиса, что лежит в основе использования данного электротехнического устройства в качестве ячейки с резистивной памятью. Разные ветви ВАХ соответствуют двум разным режимам работы мемристора: LRS и HRS.

Так как нейроморфные системы на основе мемристоров все еще развиваются, то на сегодняшний день нет четких требований по характеристикам таких мемристоров. Однако поскольку нейроморфные системы являются платформой для вычислений нейроморфной сети, то вопрос быстродействия подобных систем ограничен сверху скоростью переключения отдельного искусственного нейрона, т. е. мемристора. Из этого следует, что изучение работы мемристора

при различных частотах является перспективным направлением.

Цель работы состояла в выявлении особенностей работы мемристоров на основе твердых электролитов.

Основная часть

Были исследованы единственные на сегодняшний день промышленно изготавливаемые СФК-мемристоры (мемристоры с самоформирующимся токопроводящим каналом на основе Ge_2Se_3 [7, 8]) путем измерения ВАХ при различных температурах и частотных режимах. Конструкция СФК-мемристора представляет собой многослойную тонкопленочную композицию, состоящую из активного и вспомогательного слоев (рис. 1). В СФК-мемристоре токопроводящий канал (ТК), образующийся при подаче на серебряный анод положительного напряжения, состоит из перекрывающихся между собой агломераций ионов серебра, плотность которых в агломерации при дальнейшей работе мемристора изменяется, разрывая или вновь создавая устойчивые связующие ионы серебра мостики. Агломерации ионов серебра (рис. 2) образуются вокруг изначально существующих в аморфной матрице димеров Ge-Ge, двух атомов Ge, образующих устойчивую пространственную связь и повторяющуюся в пространстве кристалла. Процессу образования агломераций ионов серебра способствуют два обстоятельства: 1) способность к быстрой миграции Ag^+ в аморфной матрице Ge_2Se_3 за счет определенной дефектности ее строения, что приближает механизм диффузии Ag^+ к межзельному механизму диффузии в кристаллической решетке; 2) наличие в активном слое ионов Sn^+ (попадающих туда благодаря создаваемому в мемристоре дополнительному слою SnSe). При приложении положительного потенциала к верхнему серебряному электроду ионы Sn^+ в силу законов дрейфа ионов в электрическом поле перемещаются из слоя SnSe в активный слой Ge_2Se_3 , в котором происходит их нейтрализация электронами, попадающими в твердый электролит из катода. При этом атомы Sn, располагающиеся в межатомных позициях аморф-

| | |
|------------------------------------------------|-----------------------------|
| Верхний электрод <i>Top electrode</i> | Ag |
| Твердый электролит <i>Solid electrolyte</i> | Ge_2Se_3 |
| | SnSe |
| | Ge_2Se_3 |
| | SnSe |
| | W+ Ge_2Se_3 |
| Нижний электрод <i>Bottom electrode</i> | W |

Рис. 1. Последовательность слоев и их функциональное назначение в мемристоре на основе Ge_2Se_3 с самоформирующимся токопроводящим каналом

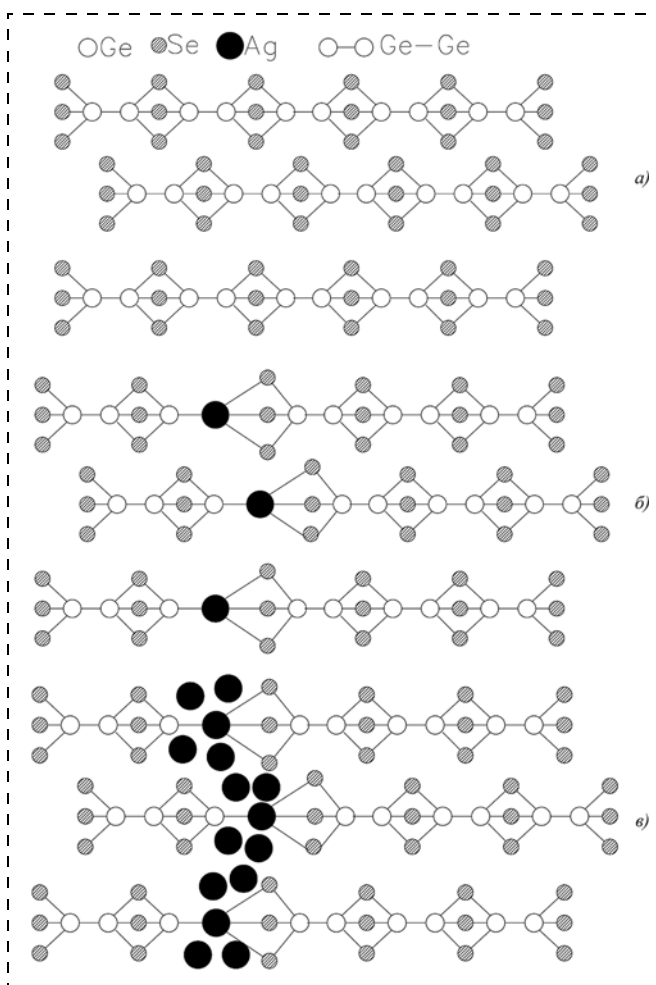


Рис. 2. Начальные стадии процесса агломерации ионов Ag^+ в аморфной матрице Ge_2Se_3 :

a — невозмущенный ближний порядок аморфной матрицы; *b* — образование нанополости вследствие замещения атома Ge на атом Ag в одном из димеров Ge-Ge; *c* — скопление ионов Ag^+ вокруг нанополости. Рисунок создан авторами статьи на основе работы [10]

ной матрицы, способствуют энергетически выгодной реакции замещения Ge на Ag в димере Ge-Ge (рис. 2, *a*) (при этом Sn выступает в качестве катализатора). Во время этой реакции аморфная структура Ge_2Se_3 искажается вследствие больших размеров атомов Ag (Ag уже находится в узле, а связь не является ионной), создавая в аморфной матрице нанополости (рис. 2, *b*). Эти нанополости можно рассматривать как центры агломерационных областей. Нанополости обеспечивают доступ других ионов Ag^+ к участку Ag-Ge, что способствует образованию ряда агломерационных областей, из которых состоит ТК (рис. 2, *c*). Таким образом, добавление или удаление ионов Ag^+ из мест агломерации изменяет сопротивление устройства [9, 10]. Полностью сформированный ТК соединяет верхний и нижний электроды, позволяя протекать электрическому току. Сопротивление ТК будет прямо зависеть от числа ионов серебра, перенесенных в нанополости аморфной матрицы из верхнего (активного) электрода.

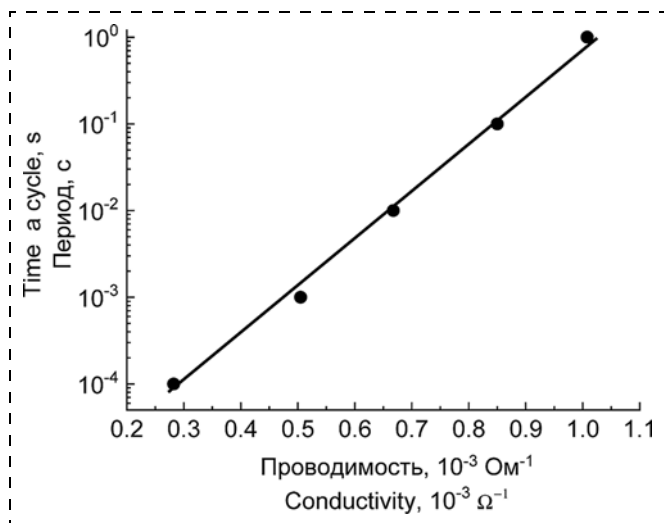


Рис. 4. Полулогарифмическая зависимость электропроводности СФК-мемристора от времени рабочего цикла мемристора

Исследование мемристоров проводили на автоматизированном измерительном стенде, созданном в ИСВЧПЭ РАН, который состоит из шасси NI PXI — 1078, источника-измерителя NI PXIe — 4140 и компьютера для управления измерительными приборами и обработки результатов. Такая установка позволяет проводить многократные и непрерывные измерения ВАХ мемристора, при различных частотах и температурах. Измерения ВАХ мемристора проводили на частотах 1, 10, 100, 1000 и 10 000 Гц в диапазоне измерения напряжения от -2 до 2 В. При измерении ВАХ мемристора на верхний электрод подавалось напряжение, изменяющееся во времени по двухполярному треугольному профилю.

На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) приведены ВАХ (зависимости тока I от напряжения U), полученные при комнатной температуре с рабочими частотами 1, 100 и 10 000 Гц. Видно, что с увеличением частоты форма ВАХ меняется: ветвь ВАХ, соответствующая нахождению мемристора в низкоомном режиме LRS, становится более пологой, что указывает на увеличение сопротивления ТК мемристора.

На рис. 4 показана полулогарифмическая зависимость электропроводности СФК-мемристора от времени рабочего цикла мемристора. Линейная форма этой зависимости позволяет ввести кинетическую константу, определяющую скорость изменения площади поперечного сечения токопроводящего канала.

Природу изменения формы ВАХ СФК-мемристора можно понять с помощью моделирования, распространяя принцип варьирования высоты ТК на ионные мемристоры. При моделировании (выполненном для кристаллического состояния GeSe) использовали те же подходы, что и при моделировании ВАХ для мемристора $\text{TiN} \setminus \text{HfO}_2 \setminus \text{Pt}$ [11]: дрейф ионов Ag^+ происходил в сильных электрических полях, скорость роста серебряной нити была равна скорости подвода ионов Ag^+ . Результатом моделирования являются ВАХи, соответствующие ТК с толщиной (радиусом) 5 и 10 нм

(рис. 5, см. четвертую сторону обложки). Видно, что форма ВАХ меняется с толщиной ТК: уменьшение толщины канала приводит к снижению максимального тока, протекающего через мемристор, и увеличению сопротивления канала. Таким образом, изменение формы ВАХ, вызванное увеличением частоты переключения сигнала, может быть объяснено уменьшением толщины ТК, что связано в первом случае со снижением времени формирования ТК. Следовательно, можно утверждать, что толщина ТК является основным конструкционным параметром, ответственным как за эффективность (стабильность) работы мемристора, так и за энергосберегающий режим его работы.

Заключение

В работе выполнены измерения сопротивления и электропроводности в биполярном мемристоре на основе Ge_2Se_3 с самоформирующимся токопроводящим каналом, консолидация и распад которого происходят за счет изменения плотности ионов Ag^+ в агломерационных скоплениях, образующихся при работе СФК-мемристора. Образование агломерационных областей ионов Ag^+ происходит за счет имеющихся в аморфной Ge_2Se_3 матрице нанополостей, образование которых способствуют присутствующие в активном слое мемристора атомы Sn, что обеспечивается конструкцией мемристора. Установлено, что в полулогарифмических осях электропроводность СФК-мемристора линейным образом связана с временем рабочего цикла мемристора, это позволило ввести кинетическую константу, определяющую скорость изменения площади поперечного сечения токопроводящего канала.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-03003 МК.

Список литературы

1. Chua L. O. Memristor — missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory, 1971. CT-18. P. 507—519.
2. Chua L. O., Kang S. M. Memristive devices and systems // Proceedings of the IEEE. 1976. Vol. 64. P. 209—223.
3. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing // Nature Nanotechnology. 2013. Vol. 8, N. 1. P. 13—24.
4. Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D., Kirsch P., Vandellic L., Padovani A., Larcher L., McKenna K., Shluger A., Iglesias V., Porti M., Nafria M. Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. P. 124518.
5. Kim K. M., Jeong D. S., Hwang C. S. Nanofilamentary resistive switching in binary oxide system; a review on the present status and outlook // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. P. 254002.
6. Waser R., Aono M. Nanoionics-based resistive switching memories // Nature Materials. 2007. Vol. 6, no. 11. P. 833—840.
7. Campbell K. A. Self-directed channel memristor for high temperature operation // Microelectronics Journal. 2017. Vol. 59. P. 10—14.

8. **Campbell K. A., Anderson C. M.** Phase-change memory devices with stacked Ge-chalcogenide/Sn-chalcogenide layers // *Microelectronics Journal*. 2007. Vol. 38. P. 52–59.

9. **Edwards A. H., Campbell K. A., Pineda A. C.** Self-trapping of single and paired electrons in Ge_2Se_3 // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2012. Vol. 24, N. 19. P. 195801.

10. **Devasia A., Kurinec S., Campbell K. A., Raoux S.** Influence of Sn migration on phase transition in GeTe and Ge_2Se_3 thin films // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. P. 141908.

11. **Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Рубан О. А.** Численное моделирование вольт-амперной характеристики биполярного мемристора на основе оксида гафния // *Письма в Журнал технической физики*. 2021. Т. 47. С. 39–42.

A. N. Aleshin¹, D. Sc., Chief Researcher, analeshin@mail.ru, **N. V. Zenchenko^{1,2}**, Researcher, zenchenko.nikolay@yandex.ru, **O. A. Ruban^{1,2}**, Ph. D., Senior Researcher, myx.05@mail.ru,
¹ V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105, Russian Federation
² MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russian Federation

Corresponding author:

Ruban Oleg A., Ph. D., Senior Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105, Russian Federation. MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russian Federation
E-mail: myx.05@mail.ru

Features of the Formation of Conductive Channels in Memristors Based on Solid Electrolytes

Received on January 31, 2022

Accepted on February 11, 2022

Experimental data were obtained on measuring the resistance and electrical conductivity in the low-resistance mode of operation of a memristor based on germanium selenide with a self-forming conductive channel in the form of a silver filament in the range of operating frequencies and temperatures. In the frequency experiment, the influence of the switching frequency was carried out at room temperature in the range of 1–10,000 Hz. The main result of the experiment was the identification in semi-logarithmic coordinates of a linear interdependence between the magnitude of the electrical conductivity and the operating cycle time of the memristor, which made it possible to introduce a temperature-dependent kinetic constant. This experimental fact made it possible to establish the main parameter that affects the shape of the I – V characteristic, the thickness of the conductive channel.

Keywords: memristor, solid electrolyte, amorphous matrix, agglomeration clusters, nanocavities

For citation:

Aleshin A. N., Zenchenko N. V., Ruban O. A. Features of the Formation of Conductive Channels in Memristors Based on Solid Electrolytes, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 92–95.

DOI: 10.17587/nmst.24.92-95

References

1. **Chua L. O.** Memristor — missing circuit element, *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1971, CT-18, pp. 507–519.

2. **Chua L. O., Kang S. M.** Memristive devices and systems, *Proceedings of the IEEE*, 1976, vol. 64, pp. 209–223.

3. **Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R.** Memristive devices for computing, *Nature Nanotechnology*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 13–24.

4. **Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D., Kirsch P., Vandelli L., Padovani A., Larcher L., McKenna K., Shluger A., Iglesias V., Porti M., Nafria M.** Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties, *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 110, p. 124518.

5. **Kim K. M., Jeong D. S., Hwang C. S.** Nanofilamentary resistive switching in binary oxide system; a review on the present status and outlook, *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, p. 254002.

6. **Waser R., Aono M.** Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature Materials*, 2007, vol. 6, no. 11, pp. 833–840.

7. **Campbell K. A.** Self-directed channel memristor for high temperature operation, *Microelectronics Journal*, 2017, vol. 59, pp. 10–14.

8. **Campbell K. A., Anderson C. M.** Phase-change memory devices with stacked Ge-chalcogenide/Sn-chalcogenide layers, *Microelectronics Journal*, 2007, vol. 38, pp. 52–59.

9. **Edwards A. H., Campbell K. A., Pineda A. C.** Self-trapping of single and paired electrons in Ge_2Se_3 , *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, vol. 24, no. 19, p. 195801.

10. **Devasia A., Kurinec S., Campbell K. A., Raoux S.** Influence of Sn migration on phase transition in GeTe and Ge_2Se_3 thin films, *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, p. 141908.

11. **Aleshin A. N., Zenchenko N. V., Ruban O. A.** Численное моделирование вольт-амперной характеристики биполярного мемристора на основе оксида гафния, *Письма в Журнал технической физики*, 2021, vol. 47, pp. 39–42 (in Russian).

Р. А. Хабибуллин, канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр., ученый секретарь, e-mail: khabibullin@isvch.ru, **С. С. Пушкарев**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: serp456207@gmail.com, **Р. Р. Галиев**, науч. сотр., e-mail: rgaliev@isvch.ru, **Н. В. Щаврук**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: kolq@mail.ru, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова РАН, Москва, **И. Н. Дюжиков**, науч. сотр., e-mail: din@cplire.ru, **В. В. Павловский**, науч. сотр., e-mail: pvv@cplire.ru, **О. Ю. Волков**, науч. сотр., Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Москва

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 23.12.2021

Квантово-каскадные лазеры терагерцевого диапазона (ТГц ККЛ) являются перспективными источниками излучения для высокоразрешающей газовой спектроскопии. Широкая полоса рабочих частот (1,2...5,4 ТГц), узкая линия генерации (до 10 кГц), возможность работы на нескольких излучательных переходах (двухцветные лазеры, генерация частотных гребенок) и другие уникальные характеристики ТГц ККЛ позволяют создавать газовые спектрометры нового поколения для медико-биологических и экологических приложений. В работе рассмотрены возможности управления спектральными характеристиками ТГц ККЛ путем изменения рабочей температуры и параметров импульсов тока инжекции: амплитуды, длительности и частоты повторения. Впервые проведено исследование перекачки энергии между продольными модами Фабри — Перо в ТГц ККЛ при изменении коэффициента заполнения цикла импульсов тока инжекции.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, терагерцевый диапазон, резонатор Фабри — Перо, квантовая яма, молекулярно-лучевая эпитаксия

Введение

Системы мониторинга окружающей среды и атмосферы на основе абсорбционной спектроскопии функционируют в среднем инфракрасном и терагерцевом (ТГц) диапазонах, что обусловлено наличием в этих диапазонах переходов между вращательными энергетическими уровнями многих молекул, в том числе молекул с изначально нулевым дипольным моментом (CO_2 , метан, тетрафторметан, этан и др.), которые приобретают малый дипольный момент и проявляют очень слабый вращательный спектр при центрифугировании или вследствие колебаний молекул [1].

Для создания газовой спектроскопии в ТГц области востребованными являются компактные твердотельные источники ТГц излучения с инжекционной накачкой — квантово-каскадные лазеры (ККЛ), основанные на межподзонных переходах электронов в зоне проводимости гетероструктур GaAs/AlGaAs, в которых за счет вариации толщин слоев можно получить частоту генерации в диапазоне 1,2...5,4 ТГц.

Несмотря на значительный прогресс ТГц ККЛ за последние 10—15 лет, задачи по улучшению характеристик таких источников по-прежнему актуальны, что связано как с фундаментальными вопросами ис-

следования электронного транспорта в чрезвычайно сложных квантовых системах, состоящих из более чем 1000 слоев нанометровой толщины, так и с прикладными задачами, где выдвигаются требования к температурным, мощностным и спектральным характеристикам ККЛ: частоте (длине волны) генерации, ширине лазерной линии и диапазону перестройки длины волны для идентификации веществ в многокомпонентной газовой смеси. По сравнению с прочими упомянутыми характеристиками расширение диапазона перестройки длины волны излучения ККЛ особенно актуально, поскольку малейшие неконтролируемые отклонения дизайна гетероструктуры во время эпитаксиального роста приводят к изменению длины волны излучения ККЛ и к "промаху" мимо линии поглощения конкретной молекулы, а поскольку линия генерации ККЛ очень узка, даже небольшое ее отклонение критично. В этом случае необходима возможность управления длиной волны излучения ККЛ для сканирования линий поглощения молекул.

На сегодняшний день одним из главных недостатков ТГц ККЛ является небольшой диапазон перестройки частоты генерации — в общем случае до 10 ГГц. Рекордные значения перестройки частоты генерации ККЛ (около 100 ГГц) были достигнуты за счет

использования микроэлектромеханической системы, которая позволяла менять расстояние между лазерным полоском и материалами с сильно отличающимся от GaAs показателем преломления. Например, если приближать к ККЛ металлический объект на расстояние оптической связи, то ТГц поле начинает "чувствовать" металл, а это приводит к изменению эффективного показателя преломления для ТГц волны и смещает частоту генерации в область более высоких частот.

При замене металла на кремний будет наблюдаться красное смещение частоты генерации ККЛ. Данный подход отлично решает задачу по перестройке частоты генерации, но является чрезвычайно сложным с точки зрения реализации: на сегодняшний день только одна лаборатория в мире [2] смогла продемонстрировать столь сложный подход, что вызывает большие сомнения в возможности использования его на коммерческом рынке.

Перестраиваемые ККЛ могут стать основой высоко-разрешающих терагерцевых спектрометров, применение которых крайне актуально для перехода к персонализированной медицине и высокотехнологичному здравоохранению, высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству, экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике.

Как известно, на спектральные характеристики излучения ККЛ можно влиять следующими способами: 1) регулируя температуру "холодного пальца", на который крепят ККЛ в криостате; 2) изменяя амплитуду импульсов тока инжекции; 3) регулируя длительность импульса тока инжекции; 4) регулируя коэффициент заполнения цикла инжекционного тока посредством уменьшения периода чередования импульсов тока. В настоящей работе были экспериментально апробированы все перечисленные способы, демонстрирующие возможность управления спектральными характеристиками ККЛ, изготовленных в ИСВЧПЭ РАН.

Образцы и методы исследования

Квантово-каскадные лазеры представляют собой активную область в виде многопериодной сверхрешетки {GaAs/AlGaAs} с тремя квантовыми ямами в периоде (общая толщина сверхрешетки ~10 мкм), заключенную между обкладками двойного металлического волновода (ДМВ) на основе золота. Процедура изготовления ТГц ККЛ с ДМВ подробно описана в работах [3–5]. На спектрах генерации ККЛ # 21211 присутствовала одна мода с частотой ~3,275 ТГц, а ККЛ # 21111 и ККЛ # 21212 генерировали многомодовое излучение. Как видно из рис. 1, спектр ККЛ # 21212 состоит из нескольких (в общем случае из шести) продольных мод *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* с эквидистантными частотами, определяемыми условиями

резонанса: $f_m = \frac{cm}{2n_{eff}L}$. Частоты мод следующие: $f_A \approx 3,265$ ТГц; $f_B \approx 3,278...3,279$ ТГц; $f_C \approx 3,289...3,291$ ТГц;

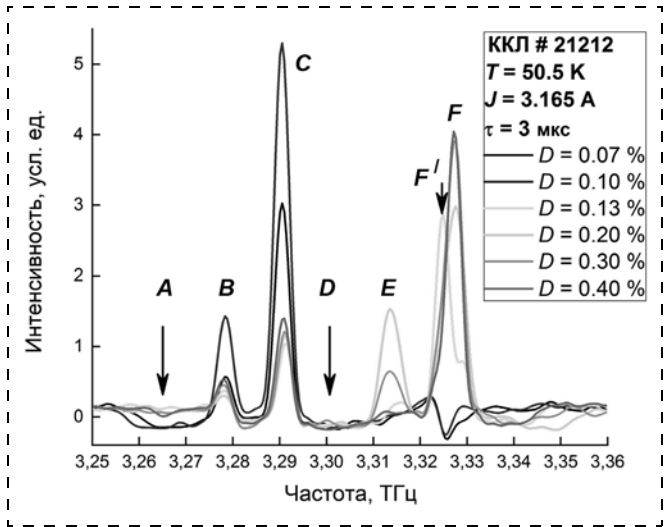


Рис. 1. Спектр излучения ККЛ # 21212 при импульсном (3 мкс) питании током 3,165 А, измеренный при температуре 50,5 К

$f_D \approx 3,302...3,303$ ТГц; $f_E \approx 3,313...3,316$ ТГц; $f_F \approx 3,327...3,329$ ТГц. Интервал между частотами немного изменяется в зависимости от режима работы лазера (температура лазера, амплитуда импульсов тока инжекции) и составляет в среднем 12,6 ГГц. При определенных режимах в спектре слева от моды *F* появляется мода *F'* с частотой $f_{F'} \approx 3,324$ ТГц, не входящая в набор мод резонатора Фабри—Перо. Вероятно эта мода отличается от остальных распределением интенсивности в пучке и является следующей поперечной модой (модой более высокого порядка) [6]. Суммарная мощность излучения неравномерно распределена между этими модами: в частности, когда лазер излучает с максимальной суммарной мощностью, она сосредоточена главным образом в моде *C*.

Спектры излучения квантово-каскадного лазера были измерены в ИРЭ РАН методом Фурье-спектроскопии на спектрометре Bruker, методика измерения подробно описана в работах [7, 8].

Влияние температуры

Как известно, увеличение температуры ККЛ, помещенного в криостат, приводит к сдвигу частоты излучения отдельно взятой моды в красную область и одновременно к затуханию интенсивности ТГц излучения [9, 10]. На рис. 2 показана исследованная нами температурная эволюция частоты линии излучения ККЛ # 21211.

Также известно, что в случае многомодового лазера путем увеличения температуры лазера в криостате можно возбуждать более высокочастотные продольные моды. Нагрев ККЛ # 21212 изменяет модовый состав ТГц излучения: основная доля мощности переходит из моды *C* в моду *D* и потом в моду *E*. Однако ввиду сильного снижения общей мощности излучения ККЛ перекачка мощности в высокочастотную

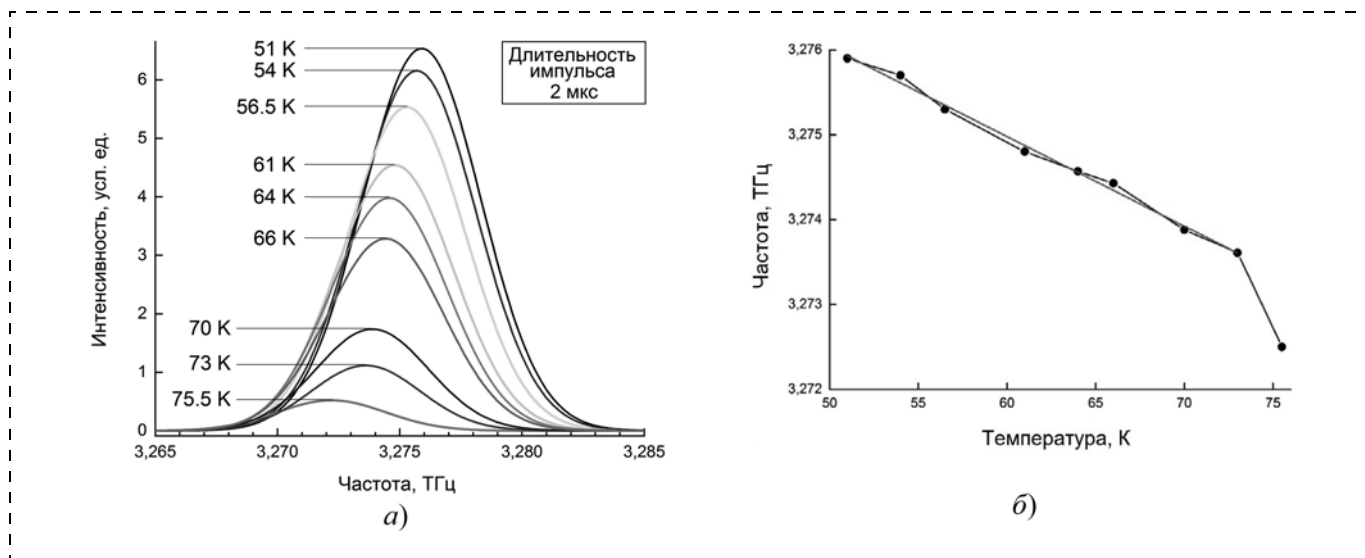


Рис. 2. Температурная эволюция частоты линии излучения ККЛ # 21211:

a — спектр излучения ККЛ # 21211 при различных температурах "холодного пальца". Амплитуда прямоугольных импульсов тока инжекции 3,12 А, длительность импульсов тока 2 мкс, частота повторения импульсов 499,5 Гц (коэффициент заполнения цикла 0,1 %); *б* — зависимость центральной частоты гауссиана, аппроксимирующего экспериментальный спектр, от температуры "холодного пальца"

моду с помощью повышения температуры лазера неэффективна.

Влияние амплитуды импульсов тока инжекции

Обычно при увеличении тока инжекции активная область ККЛ нагревается вследствие омических потерь, ввиду этого показатель преломления растет ([11], стр. R139), а частота генерации ККЛ смещается в красную область [12]. Однако некоторые ККЛ демонстрируют противоположное поведение: частота генерации смещается в синюю область при увеличении амплитуды импульсов тока инжекции [13].

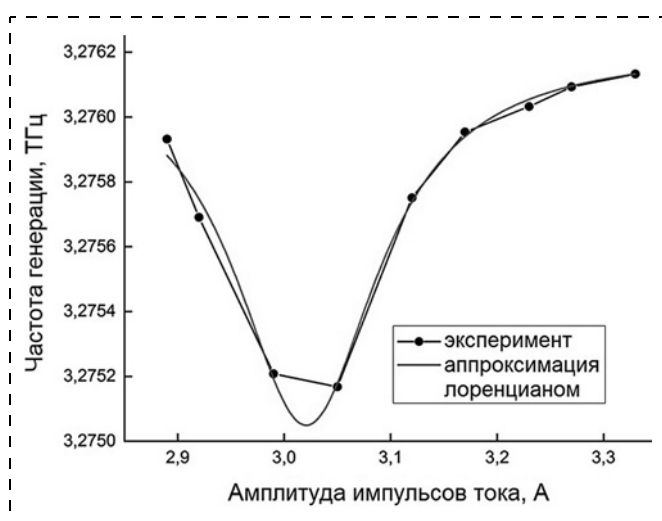


Рис. 3. Зависимость частоты генерации ККЛ # 21211 от амплитуды импульсов тока инжекции

Немонотонная в общем случае зависимость частоты генерации ККЛ от значения приложенного электрического поля объясняется эффектом затягивания продольных мод резонатора Фабри — Перо к центру (максимуму) спектра усиления, который сдвигается в синюю область при увеличении приложенного поля вследствие квантово-размерного эффекта Штарка [14].

Мы наблюдали похожий немонотонный сдвиг частоты генерации ККЛ # 21211 при изменении амплитуды импульсов тока инжекции (рис. 3).

Кроме того, увеличение амплитуды импульсов тока инжекции позволяет перераспределить основную часть интенсивности излучения ККЛ # 21212 из моды *B* в моду *C* (при температуре лазера 51 К) и из моды *C* в моду *E* (при температуре лазера 63 К). Таким образом, в комбинации с повышением температуры увеличение тока инжекции позволяет более эффективно перекачивать часть мощности в более высокочастотную моду.

Влияние длительности импульсов тока инжекции

Если увеличивать длительность импульса тока инжекции τ , сохраняя при этом коэффициент заполнения цикла $D = \tau/T = \text{const}$, то средний ток инжекции $\langle J \rangle$ не будет изменяться. Следовательно, выделение теплоты в активной области ККЛ, обусловленное омическими потерями, в среднем не изменяется, однако происходит кратковременный разогрев во время генерации излучения, который изменяет показатель преломления активной области и приводит к уменьшению частоты излучения ККЛ [15]. Наблюдаемые нами сдвиги частот различных ККЛ показаны на рис. 4. По значению смещения частоты на основании

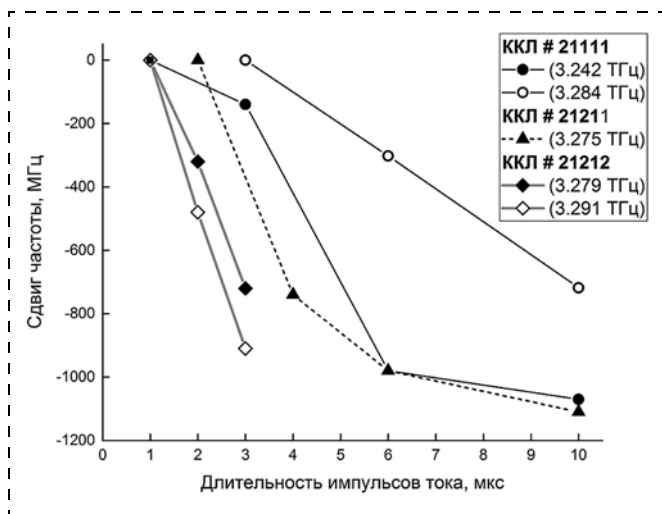


Рис. 4. Сдвиг частоты излучения различных ККЛ при увеличении длительности импульсов тока инжекции. Коэффициент заполнения цикла 0,1 % не изменяется. Температура измерений 15 К (ККЛ # 21111) и 51–52 К (ККЛ # 21211, # 21212)

температурной зависимости частоты можно оценить нагрев активной области ККЛ # 21211: при длительности импульса тока 10 мкс температура активной области повышается на 10,5 °С.

Влияние коэффициента заполнения цикла импульсов тока инжекции

Если увеличивать коэффициент заполнения цикла $D = \tau/T$ посредством уменьшения периода чередования импульсов тока T , при этом сохраняя длительность импульса $\tau = \text{const}$, то средний ток инжекции $\langle J \rangle$ растет, следовательно, и инжектируемая в лазер электрическая мощность повышается.

Экспериментальные данные показывают, что при увеличении D мощность излучения ККЛ # 21212 перераспределяется из моды C в моду F (рис. 5). Мо-да C доминирует при малой длительности импульса ($\tau = 1$ мкс), мо-да F сравнивается с ней при средней длительности импульса ($\tau = 2$ мкс) и превосходит ее при большой длительности импульса ($\tau = 3$ мкс).

Моды B и C являются наиболее стабильными и присутствуют при всех режимах инжекции тока, поэтому можно проследить за смещением частот этих мод в зависимости от длительности и коэффициента заполнения импульсов тока. Анализ экспериментально измеренных зависимостей (рис. 6, *a*, *б*) показывает, что при питании лазера сравнительно короткими импульсами длительностью $\tau = 1$ мкс увеличение коэффициента заполнения цикла D приводит к почти монотонному смещению частот обеих мод в красную область, что может свидетельствовать о постепенном повышении температуры активной области лазера. При питании лазера более длинными импульсами ($\tau = 2$ и 3 мкс) при $D = 0,13$ % частоты обеих мод резко возрастают, после чего увеличение D снова приводит к почти монотонному смещению частот обеих мод в красную область. Это может указывать на сочетание постепенного повышения температуры активной области лазера и скачкообразной перестройки электронной подсистемы, которая происходит после того, как инжектируемая в лазер электрическая мощность превышает некоторое пороговое значение. О резкой перестройке электронной подсистемы также свидетельствует перераспределение суммарной мощности излучения между модами: при превышении этого порога начинается резкий рост интенсивности моды F (см. рис. 5, *б*, *в*). Межмодовый интервал в целом уменьшается как при увеличении D , так и при увеличении τ (рис. 6, *в*), что также свидетельствует о постепенном нагреве лазера импульсами тока. Вместе с тем скачкообразные коле-

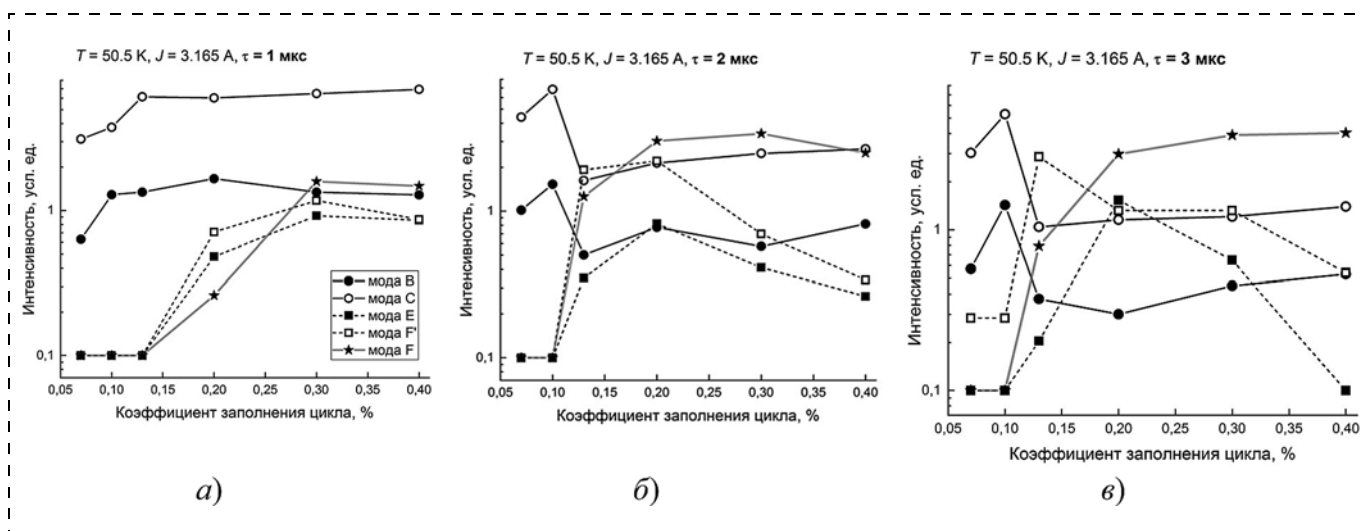


Рис. 5. Интенсивность отдельных мод ККЛ # 21212 в зависимости от коэффициента заполнения цикла при различных фиксированных значениях длительности импульса:

a — $\tau = 1$ мкс; *б* — $\tau = 2$ мкс; *в* — $\tau = 3$ мкс

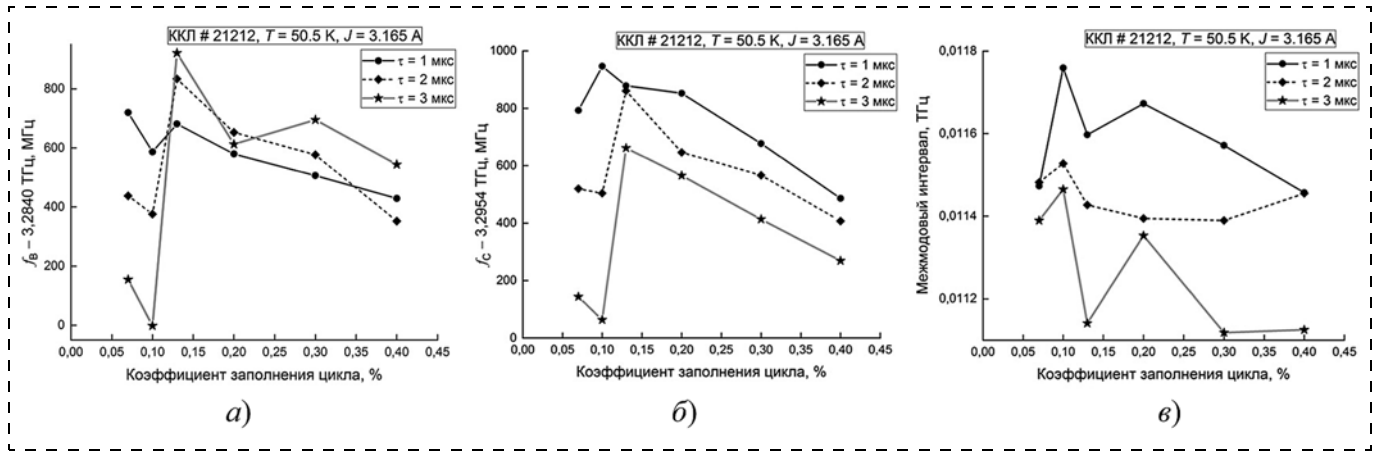


Рис. 6. Смещение частоты моды в зависимости от коэффициента заполнения цикла:
 а — для моды В; б — для моды С; в — для межмодового интервала

бания межмодового интервала не должны быть связаны с температурой активной области, а скорее объясняются перестройкой электронной подсистемы.

Экспериментальные зависимости мощности и частоты различных мод от коэффициента заполнения цикла D позволяют сделать вывод о сочетании постепенного повышения температуры активной области лазера и скачкообразной перестройки электронной подсистемы, которая происходит после превышения инжестируемой в лазер электрической мощности некоторого порогового значения (при $D = 0,13$ %).

Заключение

В настоящей работе экспериментально изучены различные методы управления спектром излучения многомодового 3,3 ТГц ККЛ, и показано, что наибольшей эффективностью и гибкостью отличается управление с помощью регулирования коэффициента заполнения цикла инжекционного тока в комбинации с изменением длительности импульсов тока. Выводы из проведенных экспериментов суммированы в таблице.

Методы управления спектром излучения 3,3 ТГц ККЛ

| Воздействие на лазер | Потребляемая лазером электрическая мощность | Температура активной области | Мода с наибольшей долей мощности в начале и в конце диапазона изменения данного параметра | Относительная эффективность перекачки мощности в более высокоэнергетичные моды |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Увеличение температуры "холодного пальца" в криостате | Не изменяется | Контролируемо увеличивается до заданного значения | $C \rightarrow E$ | Низкая |
| Увеличение амплитуды импульсов тока инжекции | 51 К 63 К Увеличивается пропорционально амплитуде импульсов тока | Неконтролируемо увеличивается вследствие выделения джоулева тепла | $B \rightarrow C$ $C \rightarrow E$ | Средняя |
| Увеличение длительности импульсов тока инжекции при сохранении коэффициента заполнения цикла | Не изменяется | Не изменяется в среднем по времени, однако происходит локальный кратковременный нагрев в области протекания тока | Зависит от коэффициента заполнения цикла: при $D \leq 0,1$ % главной модой остается мода С, при $D \geq 0,2$ % $C \rightarrow F$ | Высокая |
| Увеличение коэффициента заполнения цикла при сохранении длительности импульсов тока инжекции | Увеличивается пропорционально коэффициенту заполнения цикла | Неконтролируемо увеличивается вследствие выделения джоулева тепла | Зависит от длительности импульсов тока: при $\tau = 1$ мкс главной модой остается мода С, при $\tau = 2...3$ мкс $C \rightarrow F$ | Высокая |

Список литературы

1. Cuisset A., Hindle F., Mouret G., Bocquet R., Bruckhuisen J., Decker J., Pienkina A., Bray C., Fertein É., Boudon V. Terahertz Rotational Spectroscopy of Greenhouse Gases Using Long Interaction Path-Lengths // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Is. 3. P. 1229.

2. Qin Q., Williams B. S., Kumar S., Reno J. L., Hu Q. Tuning a terahertz wire laser // *Nature Photonics*. 2009. Vol. 3, Is. 12. P. 732–737.

3. Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Пономарев Д. С., Томош К. Н., Галиев Р. Р., Мальцев П. П., Жуков А. Е., Цырлин Г. Э., Зубов Ф. И., Алфёров Ж. И. Изготовление терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Том 50, вып. 10. С. 1395–1400.

4. Иконников А. В., Маремьянин К. В., Морозов С. В., Гавриленко В. И., Павлов А. Ю., Щаврук Н. В., Хабибуллин Р. А., Резник Р. Р., Цырлин Г. Э., Зубов Ф. И., Жуков А. Е., Алфёров Ж. И. Генерация терагерцового излучения в многослойных квантово-каскадных гетероструктурах // *Письма в ЖТФ*. 2017. Том 43, вып. 7. С. 86–94.

5. Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Пономарев Д. С., Ушаков Д. В., Афоненко А. А., Васильевский И. С., Зайцев А. А., Данилов А. И., Волков О. Ю., Павловский В. В., Маремьянин К. В., Гавриленко В. И. Температурная зависимость порогового тока и выходной мощности квантово-каскадного лазера с частотой генерации 3,3 ТГц // *Физика и техника полупроводников*. 2018. Том 52, вып. 11. С. 1268–1273.

6. Brandstetter M., Schönhuber S., Krall M., Kainz M. A., Detz H., Zederbauer T., Andrews A. M., Strasser G., Unterrainer K. Spectrally resolved far-fields of terahertz quantum cascade lasers // *Optics Express*. 2016. Vol. 24. P. 25462–25470.

7. Волков О. Ю., Дюжиков И. Н., Логунов М. В., Никитов С. А., Павловский В. В., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Хабибуллин Р. А. Исследование спектров терагерцового излучения в многослойных GaAs/AlGaAs гетероструктурах // *Радиотехника и электроника*. 2018. Том 63, вып. 9. С. 981–985.

8. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Maremyanin K. V., Volkov O. Yu., Pavlovskiy V. V., Dubinov A. A. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance // *Opto-Electronics Review*. 2019. Vol. 27, Is. 4. P. 329–333.

9. Tober R. L. Active region temperatures of quantum cascade lasers during pulsed excitation // *Journal Applied Physics*. 2007. Vol. 101, Is. 4. P. 044507.

10. Lastovkin A. A., Ikonnikov A. V., Gavrilenko V. I., Antonov A. V., Sadof'ev Y. G. Studying the frequency tuning of pulsed terahertz quantum cascade lasers // *Radiophys. Quantum Electron*. 2012. Vol. 54, Is. 8–9. P. 609–615.

11. Blakemore J. S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide // *Journal of Applied Physics*. 1982. Vol. 53, Is. 10. R123–R181.

12. Barkan A., Tittel F. K., Mittleman D. M., Dengler R., Siegel P. H., Scalari G., Ajili L., Faist J., Beere H. E., Linfield E. H., Davies A. G., Ritchie D. A. Linewidth and tuning characteristics of terahertz quantum cascade lasers // *Optics Letters*. 2015. Vol. 29, Is. 6. P. 575–577.

13. Beverini N., Carelli G., De Michele A., Moretti A., Mahler L., Tredicucci A., Beere H. E., Ritchie D. A. Frequency Characterization of a Terahertz Quantum-Cascade Laser // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007. Vol. 56, Is. 2. P. 262–265.

14. Fasching G., Tamosiunas V., Benz A., Andrews A. M., Unterrainer K., Zobl R., Roch T., Schrenk W., Strasser G. Sub-wavelength Microdisk and Microring Terahertz Quantum-Cascade Lasers // *IEEE Journal Of Quantum Electronics*. 2007. Vol. 43, Is. 8. P. 687–697.

15. Kainz M. A., Wenclawiak M., Schönhuber S., Jaidl M., Limbacher B., Andrews A. M., Detz H., Strasser G., Unterrainer K. Thermal-Dynamics Optimization of Terahertz Quantum Cascade Lasers with Different Barrier Compositions // *Physical Review Applied*. 2020. Vol. 14, Is. 5. P. 054012.

R. A. Khabibullin, Ph. D., Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Secretary, e-mail: khabibullin@isvch.ru, **S. S. Pushkarev**, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: serp456207@gmail.com, **R. R. Galiev**, Researcher, e-mail: rgaliev@isvch.ru, **N. V. Shchavruk**, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: kolq_@mail.ru, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105, Russian Federation, **I. N. Dyuzhikov**, Researcher, e-mail: din@cplire.ru, **V. V. Pavlovskiy**, Researcher, e-mail: pvv@cplire.ru, **O. Yu. Volkov**, Researcher, e-mail: O_Volkov@cplire.ru, Radio-engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009, Russian Federation

Corresponding author:

Khabibullin Rustam A., Ph. D., Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Secretary, e-mail: khabibullin@isvch.ru, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117105, Russian Federation

Tuning of Spectral Characteristics of Terahertz Quantum Cascade Lasers

Received on December 23, 2021

Accepted on December 30, 2021

Terahertz quantum cascade lasers (THz QCLs) are prospective radiation sources for high-resolution gas spectroscopy. A wide range of operating frequencies (from 1.2 to 5.4 THz), a narrow generation line (up to 10 kHz), the ability to operate on several radiative transitions (two-color lasers, generation of frequency combs) and other unique characteristics of THz QCLs make it possible to create a new generation of gas spectrometers for biomedical and environmental applications. The article discusses the possibilities of controlling the spectral characteristics of THz QCLs by changing the operating temperature and parameters of the injection current pulses: amplitude, duration, and repetition rate. For the first time, the study of energy transfer between longitudinal Fabry — Perot modes in THz QCLs with a change in the duty cycle of injection current pulses has been carried out.

Keywords: quantum-cascade laser, terahertz range, Fabry — Perot resonator, quantum well, molecular-beam epitaxy

For citation:

Khabibullin R. A., Pushkarev S. S., Galiev R. R., Shchavruk N. V., Dyuzhikov I. N., Pavlovskiy V. V., Volkov O. Yu. Tuning of Spectral Characteristics of Terahertz Quantum Cascade Lasers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 96—102.

DOI: 10.17587/nmst.24.96-102

References

1. Cuisset A., Hindle F., Mouret G., Bocquet R., Bruckhuisen J., Decker J., Pienkina A., Bray C., Fertein É., Boudon V. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, p. 1229.
2. Qin Q., Williams B. S., Kumar S., Reno J. L., Hu Q. *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, p. 732.
3. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Ponomarev D. S., Tomosh K. N., Galiev R. R., Malcev P. P., Zhukov A. E., Cyrilin G. E., Zubov F. I., Alforov Zh. I. Temperature dependences of the threshold current and output power of a quantum-cascade laser emitting at 3.3 THz, *Semicond.*, 2016, vol. 50, is. 10, pp. 1377—1382.
4. Maren'yanin K. V., Morozov S. V., Gavrilenko V. I., Pavlov A. Yu., Shchavruk N. V., Khabibullin R. A., Reznik R. R., Cyrilin G. E., Zubov F. I., Zhukov A. E., Alforov Zh. I., Ikonnikov A. V. Terahertz radiation generation in multilayer quantum-cascade heterostructures, *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, p. 362.
5. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Vasil'evskii I. S., Zajcev A. A., Danilov A. I., Volkov O. Yu., Pavlovskii V. V., Maren'yanin K. V., Gavrilenko V. I. Fabrication of a terahertz quantum-cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures, *Semicond.*, 2018, vol. 52, p. 1380.
6. Brandstetter M., Schönhuber S., Krall M., Kainz M. A., Detz H., Zederbauer T., Andrews A. M., Strasser G., Unterrainer K. *Optics Express*, 2016, vol. 24, pp. 25462—25470.
7. Volkov O. Y., Dyuzhikov I. N., Logunov M. V., Nikitov S. A., Pavlovskii V. V., Shchavruk N. V., Pavlov A. Y., Khabibullin R. A. Analysis of terahertz radiation spectra in multilayer $G_{\text{AAs}}/A_{\text{L}}G_{\text{AAs}}$ heterostructures, *Journal of Communication Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 1042—1046.
8. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Maren'yanin K. V., Volkov O. Yu., Pavlovskiy V. V., Dubinov A. A. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance, *Opto-Electronics Review*, 2019, vol. 27, is. 4, pp. 329—333.
9. Tober R. L. Active region temperatures of quantum cascade lasers during pulsed excitation, *Journal Applied Physics*, 2007, vol. 101, is. 4, pp. 044507.
10. Lastovkin A. A., Ikonnikov A. V., Gavrilenko V. I., Antonov A. V., Sadof'ev Y. G. Studying the frequency tuning of pulsed terahertz quantum cascade lasers, *Radiophys. Quantum Electron.*, 2012, vol. 54, is. 8—9, pp. 609—615.
11. Blakemore J. S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide, *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, is. 10, R123—R181.
12. Barkan A., Tittel F. K., Mittleman D. M., Dengler R., Siegel P. H., Scalari G., Ajili L., Faist J., Beere H. E., Linfield E. H., Davies A. G., Ritchie D. A. Linewidth and tuning characteristics of terahertz quantum cascade lasers, *Optics Letters*, 2015, vol. 29, is. 6, pp. 575—577.
13. Beverini N., Carelli G., De Michele A., Moretti A., Mahler L., Tredicucci A., Beere H. E., Ritchie D. A. Frequency Characterization of a Terahertz Quantum-Cascade Laser, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 56, is. 2, pp. 262—265.
14. Fasching G., Tamosiunas V., Benz A., Andrews A. M., Unterrainer K., Zobl R., Roch T., Schrenk W., Strasser G. Sub-wavelength Microdisk and Microring Terahertz Quantum-Cascade Lasers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, vol. 43, is. 8, pp. 687—697.
15. Kainz M. A., Wenclawiak M., Schönhuber S., Jaidl M., Limbacher B., Andrews A. M., Detz H., Strasser G., Unterrainer K. Thermal-Dynamics Optimization of Terahertz Quantum Cascade Lasers with Different Barrier Compositions, *Physical Review Applied*, 2020, vol. 14, is. 5, pp. 054012.

А. Ю. Павлов, канд. техн. наук, зав. лаб., e-mail: p.alex.ur@yandex.ru, **К. Н. Томош**, науч. сотр., **В. Ю. Павлов**, науч. сотр., **Д. Н. Слаповский**, науч. сотр., **А. В. Клековкин**, мл. науч. сотр., **И. А. Ивченко**, вед. спец.

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ AlGaIn/GaN С ПОДЗАТВОРНЫМ ЗАГЛУБЛЕНИЕМ В БАРЬЕРНЫЙ СЛОЙ

Поступила в редакцию 02.02.2022

Рассмотрено влияние толщины барьерного слоя нитридной гетероструктуры на характеристики полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов. Уменьшение толщины барьерного слоя позволит поднять крутизну транзистора, его рабочие частоты, коэффициент усиления, удельную выходную мощность. В работе рассмотрено изменение толщины барьерного слоя гетероструктуры за счет травления подзатворного заглабления ("реcess").

Используется разработанный и внедренный метод низкоэнергетического бездефектного сухого травления барьерного слоя AlGaIn, заключающийся в циклическом повторении операций плазмохимического окисления AlGaIn и удалении образованного оксидного слоя реактивным ионным травлением в индуктивно-связанной плазме в хлорсодержащей среде. Впервые с использованием предложенного метода травления изготовлены HEMT AlGaIn/AlN/GaN с заглабленным затвором. При этом значения токов полученных транзисторов не зависят от числа циклов травления, положение рабочей точки по затвору смещается в сторону положительных напряжений (вплоть до транзисторов, работающих в режиме обогащения).

Ключевые слова: полевой транзистор, гетероструктура, двумерный электронный газ, барьерный слой, плазмохимическое травление, подзатворное заглавление, нитрид галлия

Введение

Высокое пробивное напряжение в сочетании с большой плотностью электронов двумерного электронного газа (2DEG) в канале нитридной гетероструктуры, а также хорошая теплопроводность материала обеспечивают работу устройств в сверхвысокочастотной (СВЧ) области при больших напряжениях и высоких температурах, давая значительное преимущество по сравнению с другими материалами на основе соединений A_3B_5 и делая нитрид галлия ключевым материалом для СВЧ электроники.

Полупроводниковые приборы на основе широкозонных гетероструктур AlGaIn/GaN за три десятилетия исследований и эксплуатации хорошо зарекомендовали себя в низкочастотной (до 10 ГГц) области. Использование GaN приборов в миллиметровом диапазоне стало возможным благодаря прогрессивному развитию за последнее десятилетие технологий изготовления полевых транзисторов. Переход в более высокочастотный диапазон происходит за счет уменьшения длины затвора СВЧ транзистора [1–4], уменьшения толщины барьерного слоя ростовых гетероструктур [2–4], перехода к несплавной технологии омических контактов и технологии самосовмещенных затворов [5, 6].

Большое число работ посвящено технологии роста гетероструктур и технологии приборов для миллиметрового диапазона. Одним из направлений является

подзатворное заглавление для уменьшения расстояния до канала двумерного электронного газа.

Влияние толщины барьерного слоя на характеристики СВЧ транзисторов

При замене арсенидных монолитных интегральных микросхем (МИС) на нитридные сотрудниками ИСВЧПЭ РАН была опубликована работа с расчетно-аналитическими исследованиями предельных возможностей полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на данных материала [4]. В работе показано влияние толщины барьерного слоя на характеристики транзисторов. Используя результаты работы [7], в которой на основании анализа нитридных HEMT получено эмпирическое выражение $f_T L_G = 19,8 / (1 + 5,1(t_B/L_G))$, где f_T — предельная частота усиления по току; L_G — длина затвора; t_B — расстояние от затвора до двумерного электронного газа (примерно равно толщине барьерного слоя гетероструктуры). Представленные в работе расчетные зависимости $f_T L_G$ от аспектного отношения L_G/t_B , хорошо совпадают с экспериментальными данными, приведенными в работе [8], что видно из рис. 1. С ростом частоты происходит уменьшение длины затвора, требующее уменьшения толщины барьерного слоя гетероструктуры.

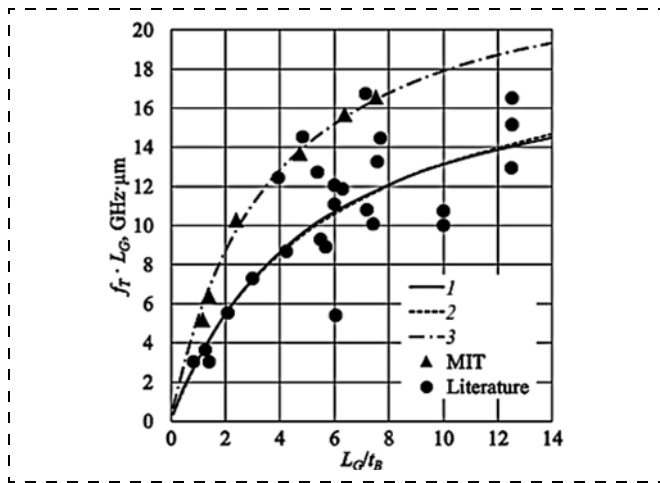


Рис. 1. Расчетные зависимости $f_T L_G$ от аспектного отношения L_G/t_B :

1 — эмпирическая зависимость из работы [7]; 2 — вариант НЕМТ1 из работы [4]; 3 — вариант НЕМТ3 из работы [4]; точки — данные работы [8]

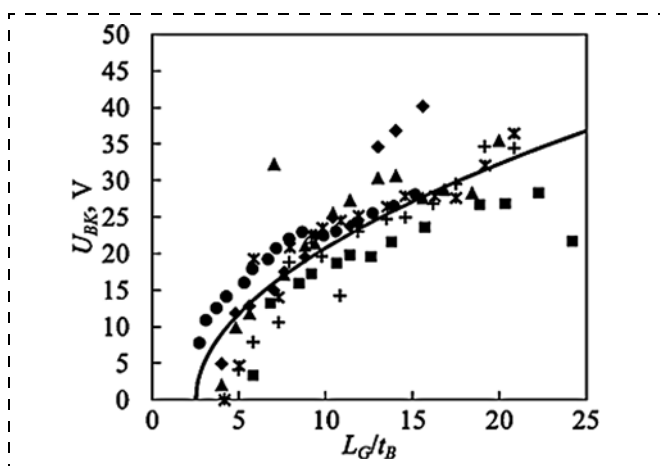


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения U_{BK} нитридных НЕМТ от аспектного отношения L_G/t_B (точки — экспериментальные значения из работы [7], линия — аппроксимация по формуле из работы [4])

Также в работе [4] рассмотрена зависимость мощностных параметров нитридных НЕМТ от толщины барьерного слоя гетероструктуры. Авторы, ввиду отсутствия развитой теории нитридных НЕМТ, использовали эмпирические данные, основанные на усреднении многочисленных экспериментальных результатов из работы [7], где представлен график зависимости напряжения пробоя U_{BK} от L_G/t_B (рис. 2). Отмечено, что максимальная удельная мощность нитридных НЕМТ определяется не только максимальным удельным током, т. е. параметрами гетероструктуры, но и аспектным соотношением L_G/t_B . Кроме того, поскольку при заданной частоте одновременно задана и требуемая длина затвора, то единственным способом повышения максимальной мощности нагрузки является уменьшение толщины барьерного слоя гетеро-

структуры при условии сохранения тока насыщения. Этот результат наглядно показан на рис. 3 [4], где построены одновременно возможные расчетные параметры транзисторов с использованием предложенных авторами выражений в координатах t_B-L_G . Как можно видеть, для повышения предельных частот, удельных мощностей и пробивных напряжений нитридных НЕМТ следует применять более тонкие гетероструктуры, допустимая толщина барьера которых резко уменьшается при повышении f_T .

В работе [3] показано, что для уменьшения коэффициента шума и улучшения сверхвысокочастотных характеристик необходимо оптимизировать как параметры наногетероструктур, так и технологию их изготовления. В частности, необходимо уменьшать толщину барьерного слоя и подбирать длину затвора такой, чтобы произведение квадрата максимальной частоты усиления по току внутренней части транзистора на выходное сопротивление между стоком и истоком было максимальным. Помимо этого необходимо уделять внимание форме затворов для уменьшения емкости C_{gd} . При определенных условиях изготовления нитридных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов можно добиться более низкого коэффициента шума, чем у транзисторов на арсенидных наногетероструктурах.

Таким образом, очевидно, что для увеличения рабочих частот приборов на нитридных гетероструктурах необходимо уменьшать толщину барьерного слоя. Рост гетероструктур с заведомо тонким барьерным слоем достаточно сложная задача. Для сохранения высокой концентрации электронов двумерного электронного газа при уменьшении толщины барьерного слоя гетероструктуры пришлось увеличивать в нем содержание Al: до 60 % в гетероструктуре AlGaIn/AlN/GaN, до 100 % в гетероструктуре AlN/GaN и до 83 % в гетероструктуре InGaIn/(AlN)/GaN [5]. Другой способ уменьшения толщины барьерного слоя — травление его на заданную толщину, тогда можно работать с ге-

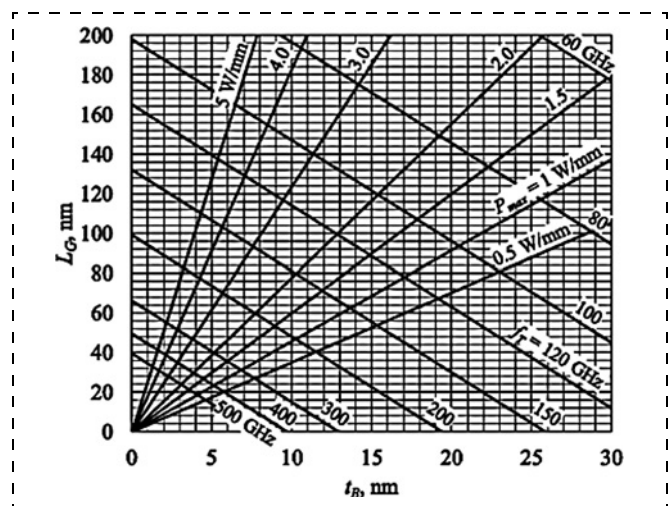


Рис. 3. Карта изолиний f_T и P_{max} для нитридных НЕМТ при $I_{sat} = 1,6$ А/мм

тероструктурами с разной толщиной барьерного слоя. Но гетеропару AlGaIn/GaN достаточно сложно потравить и выполняют этот процесс преимущественно "сухими" методами.

Подзатворное заглублиение в барьерный слой нитридной гетероструктуры полевого транзистора

Данная технология наиболее распространена в арсенид-галлиевой технологии за счет реализации подзатворного заглублиения ("реcessa") жидкостным химическим травлением в растворах, при этом использование стоп-слоев позволяет бесконтрольно осуществлять процесс травления защитных слоев структур GaAs/AlGaAs и обеспечивает необходимую однородность. В структурах AlGaIn/GaN необходимо заглублиться в AlGaIn без использования стоп-слоев. Химическим травлением в растворах данный процесс не реализуем ввиду сильной химической связи азота с галлием, поэтому используют так называемые "сухие" методы травления, с малыми энергиями заряженных частиц в хлорсодержащей среде. Обычно перед формированием "реcessa" вначале формируют приборную изоляцию, омические контакты к гетероструктуре, затем через маску осуществляют плазмохимическое травление подзатворной канавки. Изготовление транзистора завершается процессом литографии и напылением затворной металлизации Ni/Au. Для мощных транзисторов после "реcessa" осуществляют осаждение тонкого подзатворного диэлектрика за счет осаждения пленок Al₂O₃ или Si₃N₄ методами плазмохимического или атомно-слоевого осаждения (ALD). К преимуществам таких транзисторов можно отнести высокое пороговое напряжение отпираания, близкое к $V_{th} = +5$ В.

При изготовлении полевых транзисторов с подзатворным заглублиением на GaN происходит плазмохимическое воздействие на барьерный слой ионов разной энергии и возникают радиационные дефекты. При уменьшении толщины барьерного слоя до единиц нанометров возникающие дефекты в приповерхностной области влияют на электрофизические свойства гетероструктуры, что в конечном итоге сказывается на параметрах СВЧ транзисторов и их надежности. Для уменьшения этих эффектов при формировании подзатворной канавки разрабатывают методы бездефектного травления барьерного слоя AlGaIn гетероструктуры [9–13].

Одно из преимуществ технологии травления барьерного слоя состоит в относительно простом создании транзисторов разных типов на одном кристалле. На данный момент наиболее популярным методом травления барьерного слоя нитридной гетероструктуры является плазмохимическое окисление этого слоя с последующим удалением образованного оксида реактивным ионным травлением в хлорсодержащей среде. Уменьшение толщины барьерного слоя на определенное значение происходит за счет циклического повторения операций окисления и удаления оксида. Поскольку за каждый цикл травления удаляется

окисленный слой постоянной толщины, такое травление получило название "цифрового". Исследователи в последние годы начали отказываться от плазмохимического реактивного ионного удаления оксидов барьерного слоя нитридной гетероструктуры ввиду возникновения радиационных дефектов в приповерхностном слое, влияющих на электрофизические свойства гетероструктуры. В современных работах, посвященных "цифровому" травлению, предлагается удалять оксид барьерного слоя жидкостным химическим травлением, что позволит избежать образования дефектов, связанных с плазмохимическим травлением [12]. Однако такая технология имеет низкую скорость травления AlGaIn (около 0,5 нм за один цикл) и используется при работе с гетероструктурами, имеющими тонкие (около 5 нм) барьерные слои. Сам технологический процесс является весьма трудоемким ввиду необходимости использования нескольких установок для проведения одного цикла травления. В ИСВЧПЭ РАН был разработан низкоэнергетический бездефектный метод "цифрового" травления барьерного слоя AlGaIn в подзатворной области транзисторов и продемонстрированы созданные с использованием данного метода HEMT AlGaIn/AlN/GaN со смещенным положением рабочей точки по затвору вплоть до напряжений, характерных для транзисторов, работающих в режиме обогащения (*E-mode*). На данный способ имеется патент [13].

Бездефектное низкоэнергетичное травление барьерного слоя AlGaIn

Для реализации "цифрового" травления была использована установка с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП). Одно из главных преимуществ использования ИСП — это травление низкоэнергетичными ионами большой плотности. Процесс окисления барьерного слоя AlGaIn в кислородной плазме и процесс низкоэнергетического бездефектного травления образованного оксидного слоя осуществляли в одной камере без перезагрузки образца на установке Sentech SI-500 ICP с ИСП. Использование источника ИСП позволяет избежать возникновения радиационных дефектов в приповерхностных слоях гетероструктуры. Помимо этого большая концентрация заряженных частиц в реакторе во время плазмохимических процессов обеспечивает высокую скорость и качество травления. В процессах окисления и травления оксидного слоя источник ИСП использовали совместно с высокочастотным (ВЧ) электродом, что обеспечило режим реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме (РИТ-ИСП), позволяющий менять и контролировать напряжение смещения на ВЧ электроде.

Образец, подвергаемый плазмохимической обработке, располагали на ВЧ электроде, напряжение смещения на котором определяло энергию заряженных частиц, взаимодействующих с образцом. Предыдущие исследования показали [14], что для минимизации дефектообразования при проведении процессов

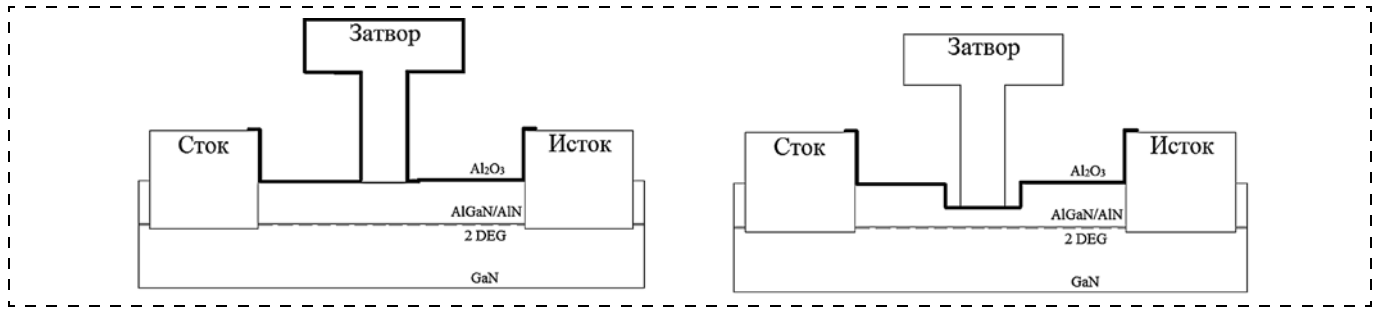


Рис. 4. Схематическое изображение НЕМТ без затворного заглабления и с затворным заглаблением

травления диэлектриков и полупроводников напряжение смещения на ВЧ электроде не должно превышать 40 В. Однако снятие оксидной пленки с поверхности нитридной гетероструктуры перед формированием омических контактов с использованием РИТ-ИСП при напряжении смещения на ВЧ электроде менее 20 В, по-видимому, не позволяет полностью удалить образованную в процессе плазмохимической обработки поверхности GaN ионами из плазмы BCl_3 "паразитную" пленку B_xCl_y , что, в свою очередь, препятствует полному удалению с поверхности гетероструктуры оксидного слоя. С учетом этого в работе был подобран режим травления оксидной пленки, сформированной при взаимодействии кислородной плазмы с поверхностью барьерного слоя AlGaIn, обеспечивающий напряжение смещения на ВЧ электроде в диапазоне от 20 до 40 В. Селективность была подтверждена отсутствием следов травления AlGaIn при длительном воздействии РИТ-ИСП через диэлектрическую маску. Удаление окисленного барьерного слоя за один цикл окисления и снятия оксида обеспечило скорость 1,5 нм за цикл.

Предложенный процесс бездефектного низкоэнергетичного травления барьерного слоя AlGaIn интегрируется в технологический цикл изготовления полевых транзисторов на нитриде галлия непосредственно

перед формированием затворной металлизации, обеспечивающей образование барьера Шоттки для управления двумерным электронным газом гетероструктуры [11, 13].

Предложенным методом были изготовлены полевые транзисторы без затворного заглабления и с затворным заглаблением с разным числом циклов (рис. 4). С полученных макетов полевых транзисторов трех типов были сняты статические и динамические характеристики. Были изготовлены двухзатворные транзисторы с шириной затвора 50 мкм. На транзисторе без заглабления получили длину затвора 0,18 мкм, на транзисторах с заглаблением, в силу технологических особенностей изготовления — около 0,22 мкм. Удельные ток насыщения и крутизна транзисторов представлены на рис. 5.

Как можно видеть из рис. 5, значения токов насыщения не зависят от числа циклов травления, что подтверждает отсутствие образования дефектов в ходе травления барьерного слоя. Значение удельной крутизны также остается на уровне 320 мСм/мм, при этом максимум смещается в сторону положительных напряжений на затворе при увеличении числа циклов травления.

Заключение

При изготовлении полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN используют подзатворное заглабление в барьерный слой. Изменение толщины барьерного слоя позволяет повлиять на частотные параметры прибора, на мощность и обеспечить более надежную работу. Схематическое изображение полевого транзистора с подзатворным заглаблением и без заглабления показаны на рис. 4.

В работе предложен и внедрен бездефектный низкоэнергетичный метод травления барьерного слоя AlGaIn полевого транзистора на гетероструктуре AlGaIn/GaN. Изготовленные макеты полевых транзисторов показали, что предложенный метод обеспечивает бездефектное травление барьерного слоя, позволяя приблизить затвор транзистора к каналу 2DEG. Полученные параметры макетов полевых транзисторов с разным заглаблением в барьерный слой показали, как влияет толщина барьерного слоя на статические и динамические характеристики полевых транзисторов на гетероструктуре AlGaIn/GaN. Предложенный

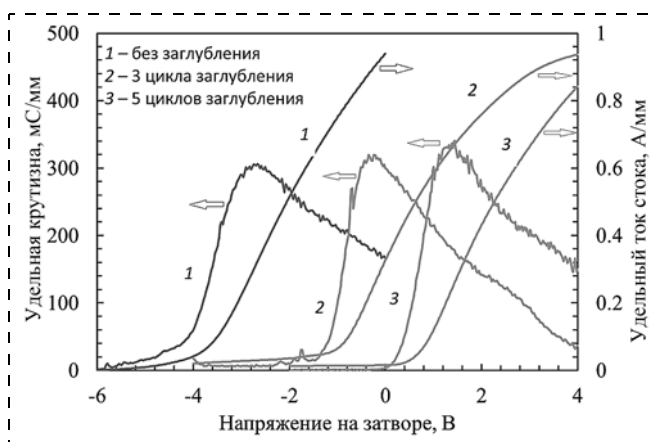


Рис. 5. Зависимости удельной крутизны и удельного тока стока от напряжения на затворе изготовленных полевых транзисторов с пятью циклами, тремя циклами "цифрового" травления и без травления, при напряжении между стоком и истоком 5 В

метод дает возможность заглибляться на любую глубину в барьерный слой, позволяя на одной пластине и в одном кристалле формировать полевые транзисторы с разной толщиной барьерного слоя. Можно получить полевые транзисторы в одном кристалле, работающие как в режиме обеднения канала, так и в режиме обогащения канала.

Список литературы

1. Мокеров В. Г., Кузнецов А. Л., Федоров Ю. В., Енюшкина Е. Н., Бугаев А. С., Павлов А. Ю., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Галиев Р. Р., Овчаренко Е. Н., Свешников Ю. Н., Цацульников А. Ф., Устинов В. М. AlGaIn/GaN-SBC HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, № 4. С. 561–567.
2. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Бугаев А. С., Матвеев О. С., Галиев Р. Р., Зуев А. В., Павлов А. Ю., Михайлович С. В. Разработка монолитных интегральных схем для Ka-, V- и W-диапазонов на основе нитрида галлия // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. Вып. 2. С. 135–143.
3. Михайлович С. В., Федоров Ю. В. Влияние толщины барьерного слоя наногетероструктур и емкости затвор-сток на сверхвысокочастотные и шумовые параметры полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на AlGaIn/GaN // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 2. С. 171.
4. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микро-системная техника. 2016. Т. 18, № 4. С. 217–226.
5. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Майтама М. В., Матвеев О. С., Михайлович С. В., Федоров Ю. В., Щербакова М. Ю. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микро-системная техника. 2015. № 2 (175). С. 21–32.
6. Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Слаповский Д. Н., Арутюнян С. С., Федоров Ю. В., Мальцев П. П. Несплавные омические контакты для транзисторов с высокой подвиж-

ностью электронов на гетероструктурах AlGaIn/GaN // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. Вып. 5. С. 340–347.

7. Jessen G. H., Fitch R. C., Gillespie J. K., Via G., Crespo A., Langley D., Denninghoff D. J., Trejo M., Heller E. R. Short Channel Effect Limitations on High-Frequency Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for T-Gate Devices // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol. 54, N. 10. P. 2589–2597.
8. Shinohara K., Regan D. C., Tang Y., Corrion A., Brown D. F., Wong J., Robinson J. F., Fung H., Schmitz A., Oh T., Kim S., Chen P., Nagele R., Margomenos A., Micovic M. Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications // IEEE Transactions on Electron Devices. 2013. Vol. 60, N. 10. P. 2982–2996.
9. Павлов А. Ю. Технология изготовления транзисторов с обеднением и обогащением канала на нитриде галлия // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2019. № 2 (174). С. 64–71.
10. Павлов А. Ю., Гамкрелидзе С. А., Томош К. Н., Федоров Ю. В., Павлов В. Ю., Галиев Р. Р., Мальцев П. П. Технология изготовления взаимодополняющих транзисторов на нитриде галлия // Проблемы разработки перспективных микро- нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. № 3. С. 69–74.
11. Михайлович С. В., Павлов А. Ю., Томош К. Н., Федоров Ю. В. Низкоэнергетическое бездефектное сухое травление барьерного слоя HEMT AlGaIn/AlN/GaN // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 10. С. 61–67.
12. Chakroun A., Jaouad A., Bouchilaoun M., Arenas O., Soltani A., and Maher H. Normally-off AlGaIn/GaN MOS-HEMT using ultra-thin Al_{0.45}Ga_{0.55}N barrier layer // Physica Status Solidi A. 2017. Vol. 214. N. 11. P. 1600836.
13. Пат. 2694164 Российская Федерация, МПК H01L 21/3065 (2006.01). Способ сухого травления нитридных слоев / Павлов А. Ю., Михайлович С. В., Томош К. Н., Федоров Ю. В.; заявитель и патентообладатель ФГБУН СВЧПЭ РАН. — № 2018113316, заявл. 12.04.2018 опублик. 09.07.2019. Бюл. № 19.
14. Томош К. Н., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Хабибуллин Р. А., Арутюнян С. С., Мальцев П. П. Исследование процессов изготовления HEMT AlGaIn/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ in situ // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 10. С. 1434–1438.

A. Yu. Pavlov, Ph. D., Head of Laboratory, e-mail: p.alex.ur@yandex.ru, K. N. Tomosh, Researcher, V. Yu. Pavlov, Researcher, D. N. Slapovskiy, Researcher, A. V. Klekovkin, Junior Researcher, I. A. Ivchenko, Leading Specialist, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Pavlov Aleksandr Yu., Ph. D., Head of Laboratory, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: p.alex.ur@yandex.ru

High Electron Mobility Transistors On AlGaIn/GaN Heterostructure with Recess in the Barrier Layer

Received on February 02, 2022

Accepted on February 11, 2022

The influence of thickness of barrier layer nitride heterostructure on characteristics of high electron mobility transistors (HEMT). Reducing thickness of the barrier layer will increase transconductance of transistor, its operating frequencies, gain, and specific output power. In the work, change in thickness of barrier layer of heterostructure due to etching of gate recess.

The developed and implemented method of low-energy defectless dry etching of the AlGa_N barrier layer is used, which consists in cyclic repetition operations of plasma-chemical oxidation of AlGa_N and removal of the oxide layer by means of reactive ion etching in inductively coupled plasma in chlorine-containing medium. AlGa_N/AlN/GaN HEMTs with a gate recess were fabricated using the proposed etching method for the first time. It is shown that the currents of obtained transistors are independent of the number of etching cycles, while the gate operating point shifts toward positive voltages (up to obtaining transistors operating in the enhancement mode).

Keywords: high electron mobility transistors, heterostructure, two-dimensional electron gas, barrier layer, plasma-chemical etching, gate recess, gallium nitride

For citation:

Pavlov A. Yu., Tomosh K. N., Pavlov V. Yu., Slapovskiy D. N., Klekovkin A. V., Ivchenko I. A. High Electron Mobility Transistors On AlGa_N/GaN Heterostructure with Recess in the Barrier Layer, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 103–108.

DoI: 10.17587/nmst.24.103-108

References

1. Mokerov V. G., Kuznetsov A. L., Fedorov Yu. V., Bugaev A. S., Pavlov A. Yu., Enyushkina E. N., Gnatyuk D. L., Zuev A. V., Galiev R. R., Ovcharenko E. N., Sveshnikov Yu. N., Tsatsulnikov A. F., Ustinov V. M. AlGa_N/GaN-HEMTs with a breakdown voltage higher than 100 V and maximum oscillation frequency f_{max} as high as 100 GHz, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 537–543.
2. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Bugaev A. S., Matveenko O. S., Galiev R. R., Zuev A. V., Mikhailovich S. V. Designing gallium nitride-based monolithic microwave integrated circuits for the Ka, V, and W bands, *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 2, pp. 128–136.
3. Mihajlovich S. V., Fedorov Yu. V. Vliyaniye tolshchiny bar'ernogo sloya nanogeterostruktury i yomkosti zatvor-stok na sverhvysochastotnyye i shumovyye parametry polevykh tranzistorov s vysokoy podvizhnost'yu elektronov na AlGa_N/GaN, *Izv. vuzov. Radiofizika*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 171 (in Russian).
4. Fedorov Yu. V., Mikhaylovich S. V. Perspektivy zameny arsenidnykh MIS na nitridnyye, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 217–226 (in Russian).
5. Galiev R. R., Gnatyuk D. L., Zuev A. V., Krapuhin D. V., Majtama M. V., Matveenko O. S., Mihajlovich S. V., Fedorov Yu. V., Shcherbakova M. Yu. Nitridnyye tekhnologii dlya osvoeniya millimetrovogo diapazona dlin voln, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 2 (175), pp. 21–32. (in Russian)
6. Pavlov A. Yu., Pavlov V. Yu., Slapovskiy D. N., Arutyunyan S. S., Fedorov Yu. V., Mal'tsev P. P. Nonalloyed ohmic contacts for high-electron-mobility transistors based on AlGa_N/GaN heterostructures, *Russian Microelectronics*, 2017, vol. 46, no. 5, pp. 340–347.
7. Jessen G. H., Fitch R. C., Gillespie J. K., Via G., Crespo A., Langley D., Denninghoff D. J., Trejo M., Heller E. R. Short Channel Effect Limitations on High-Frequency Operation of AlGa_N/GaN HEMTs for T-Gate Devices, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, vol. 54, no. 10, pp. 2589–2597.
8. Shinohara K., Regan D. C., Tang Y., Corrion A., Brown D. F., Wong J., Robinson J. F., Fung H., Schmitz A., Oh T., Kim S., Chen P., Nagele R., Margomenos A., Micovic M. Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, vol. 60, no. 10, pp. 2982–2996.
9. Pavlov A. Yu. Tekhnologiya izgotovleniya tranzistorov s obedneniem i obogashcheniem kanala na nitride galliya, *Elektronnaya tekhnika, Seriya 3: Mikroelektronika*, 2019, no. 2 (174), pp. 64–71. (in Russian)
10. Pavlov A. Yu., Gamkrelidze S. A., Tomosh K. N., Fedorov Yu. V., Pavlov V. Yu., Galiev R. R., Mal'cev P. P. Tekhnologiya izgotovleniya vzaimodopolnyayushchih tranzistorov na nitride galliya, *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- nanoelektronnykh sistem (MES)*, 2018, no. 3, pp. 69–74 (in Russian).
11. Mikhailovich S. V., Pavlov A. Yu., Tomosh K. N., Fedorov Yu. V. Low-energy defectless dry etching of the AlGa_N/AlN/GaN HEMT Barrier Layer, *Technical physics letters*, 2018, vol. 44, no. 5, pp. 435–437.
12. Chakroun A., Jaouad A., Bouchilaoun M., Arenas O., Soltani A., and Maher H. Normally-off AlGa_N/GaN MOS-HEMT using ultra-thin Al_{0.45}Ga_{0.55}N barrier layer, *Physica Status Solidi A*, 2017, vol. 214, no. 11, p. 1600836.
13. Pat. 2694164 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H01L 21/3065 (2006.01). Sposob suhogo travleniya nitridnykh sloev / Pavlov A. Yu., Mihajlovich S. V., Tomosh K. N., Fedorov Yu. V.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBUN SVCHPE RAN. — № 2018113316, zayavl. 12.04.2018 opubl. 09.07.2019 Byul. N. 19 (in Russian)
14. Tomosh K. N., Pavlov A. Yu., Pavlov V. Yu., Khabibulin R. A., Arutyunyan S. S., Maltsev P. P. Investigation of the fabrication processes of AlGa_N/AlN/GaN HEMTs with in situ Si₃N₄ passivation, *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 10, pp. 1416–1420.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Телефон редакции журнала 8(499) 270-1652. 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.

Сдано в набор 21.02.2022. Подписано в печать 23.03.2022. Формат 60×88 1/8. Заказ МС222. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье С. А. Гамкрелидзе, Д. Л. Гнатыюка, О. С. Матвеевко, С. А. Бугаева, Р. Р. Галиева, А. В. Зуева, Д. В. Лаврухина, А. О. Михалева, А. Ю. Павлова, Н. В. Щаврука, П. П. Мальцева

**«РАЗРАБОТКА МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НИТРИДА ГАЛЛИЯ»**

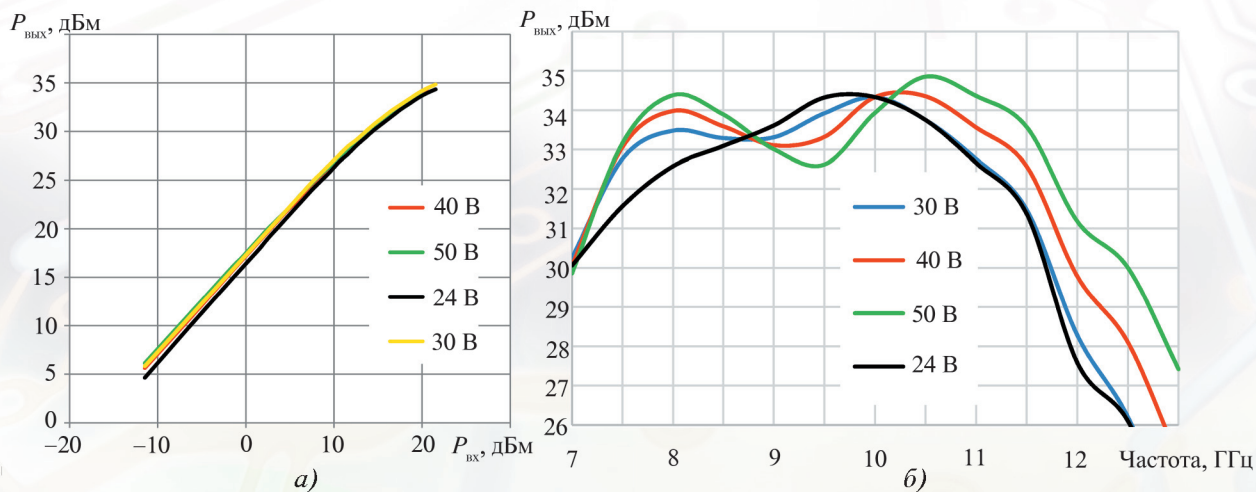


Рис. 4. Зависимости выходной мощности от входной мощности (а) и зависимости выходной мощности от частоты (б) МИС УМ X-диапазона при напряжениях питания 24 В, 30 В, 40 В и 50 В

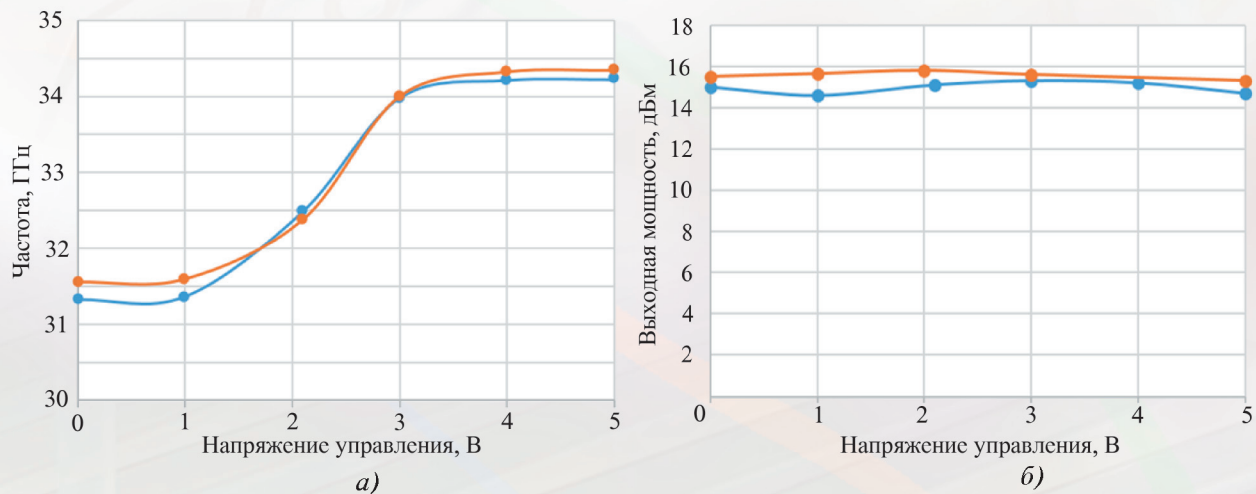


Рис. 11. Зависимости частоты генерации (а) и выходной мощности (б) МИС ГУН от напряжения управления

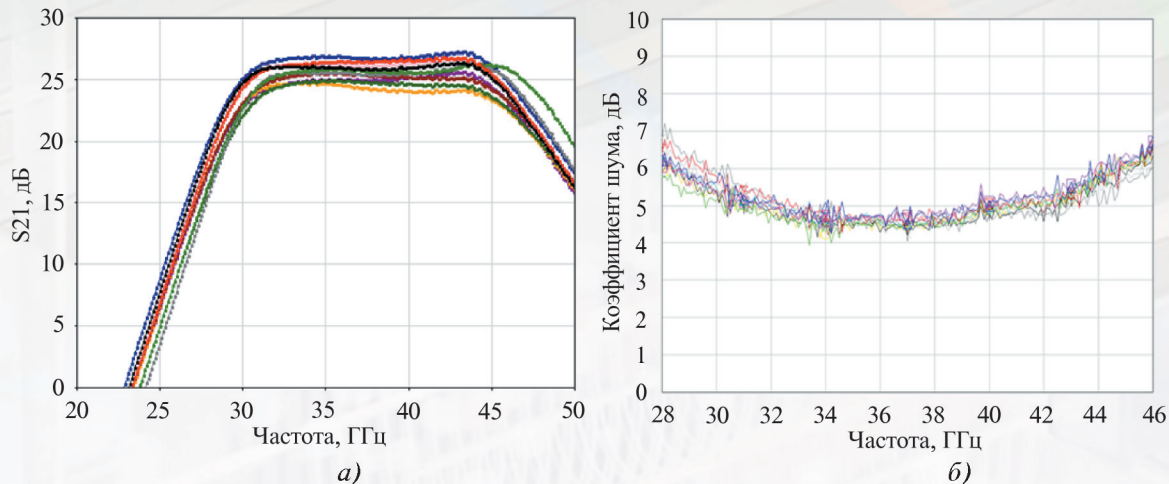


Рис. 13. Частотные зависимости S_{21} (а) и коэффициента шума (б) 10 образцов МИС МШУ Ka-диапазона

Рисунки к статье И. А. Глинского, А. Э. Ячменева, Д. В. Лаврухина, Р. А. Хабибуллина, С. А. Гамкрелидзе, К. И. Зайцева, И. Е. Спектора, Д. С. Пономарева
«ПЛАЗМОННЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОМ ГЕНЕРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

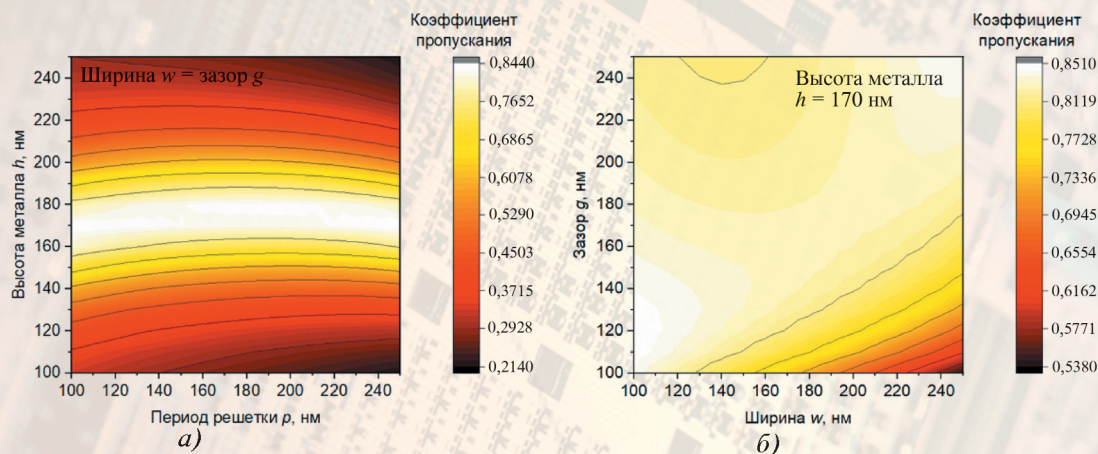


Рис. 2. Зависимости коэффициента пропускания плазмонной решетки от ее геометрических параметров при длине волны накачки $\lambda_0 = 800$ нм

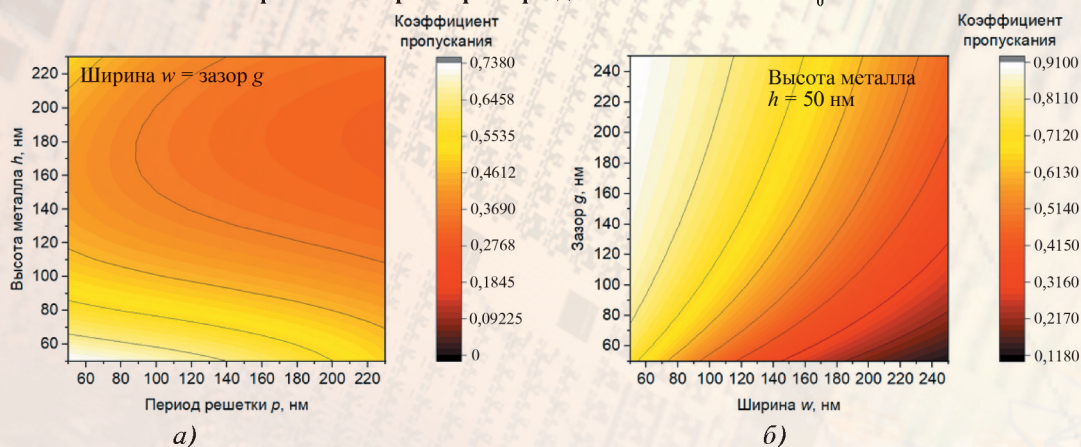


Рис. 4. Зависимости коэффициента пропускания плазмонной решетки от ее геометрических параметров при длине волны накачки $\lambda_0 = 1560$ нм

Рисунки к статье А. Н. Алёшина, Н. В. Зенченко, О. А. Рубана
«ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ В МЕМРИСТОРАХ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ»

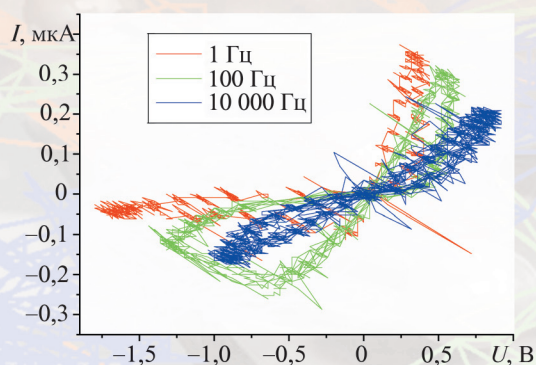


Рис. 3. Изменение формы ВАХ СФК-мемристора, работающего при комнатной температуре, по мере увеличения частоты переключения: 1 Гц, 100 Гц, 10000 Гц

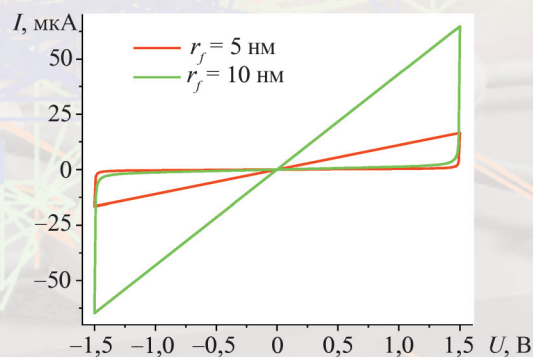


Рис. 5. Модельные вольт-амперные характеристики СФК-мемристора на основе селенида германия для различных толщин (радиусов) токопроводящего канала