

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 19. № 5 ♦ 2017

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 и в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по техническим, физико-математическим и химическим наукам.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

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:

Агеев О. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Каляев И. А., д.т.н., проф., акад. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунов В. А., д.ф.-м.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Никитов С. А., д.ф.-м.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

Ситов 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)

Андриевский Р. А., д.х.н., проф.

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Быков В. А., д.т.н., проф.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Градецкий В. Г., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.

Кузин А. Ю., д.т.н., проф.

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Петросьянц К. О., д.т.н., проф.

Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Путилов А. В., д.т.н., проф.

Рыжий М. В., к.ф.-м.н., проф. (Япония)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н., проф.

Тодуа П. А., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шептунов С. А., д.т.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Алферов Ж. И., Zubov Ф. И., Цырлин Г. Э., Жуков А. Е., Шаврук Н. В., Павлов А. Ю., Пономарев Д. С., Клочков А. Н., Хабибуллин Р. А., Мальцев П. П. Создание первого отечественного квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот 259

Рыжий В. И., Рыжий М. В., Отсуджи Т. На пути к реализации терагерцовых лазеров на основе графеновых гетероструктур 265

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

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., Крапущин Д. В., Гамкрелидзе С. А. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия 273

Бугаев А. С., Глинский И. А., Пушкарев С. С., Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С. Разработка материалов и фотопроводящих антенн на их основе для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового (ТГц) излучения 294

Климов Е. А., Лаврухин Д. В., Пушкарев С. С., Рубан О. А., Алешин А. Н. Неразрушающие методы контроля арсенидных и нитридных гетероструктур с квантовой ямой 302

Шаврук Н. В., Редькин С. В., Трофимов А. А., Иванова Н. Е., Скрипниченко А. С., Кондратенко В. С., Стыран В. В. Разделение полупроводниковых пластин из твердого материала на кристаллы 317

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 Роспечати (индекс 79493);

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

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

Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586



Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **CHIEF EDITOR**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY CHIEF EDITOR

Editorial council:

Ageev O. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Labunov V. A., (Belorussia), Sci. (Phys.-Math.), Acad. NASB
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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.
Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryzhii M. V., (Japan), PhD (Phys.), Prof.
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Sheptunov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
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.
Grigorin-Ryabova E. V.
Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)
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

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

- Alferov Zh. I., Zubov F. I., Cirlin G. E., Zhukov A. E., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Ponomarev D. S., Klochkov A. N., Khabibullin R. A., Maltsev P. P.** The First Terahertz Quantum-Cascade Laser Fabricated in Russia 263
- Ryzhii V. I., Ryzhii M. V., Otsuji T.** Toward Realization of Terahertz Lasers Based on Graphene Heterostructures 270

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Fedorov Yu. V., Bugayev A. S., Pavlov A. Yu., Gnatyuk D. L., Matveyenko O. S., Pavlov V. Yu., Slapovskiy D. N., Tomosh K. N., Enushkina E. N., Galiev R. R., Maytama M. V., Zuyev A. V., Krapukhin D. V., Gamkrelidze S. A.** The Manufacturing Technology and Development of Monolithic Integrated Circuits Based on Gallium Nitride 286
- Bugaev A. S., Glinskiy I. A., Pushkarev S. S., Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S.** Fabrication of Materials and Photoconductive Antennas on their Basis for Generation and Detection of the Pulsed and Continuous-Wave Terahertz (THz) Radiation 299
- Klimov E. A., Lavrukhin D. V., Pushkarev S. S., Ruban O. A., Alyoshin A. N.** Nondestructing Methods for Control of the Arsenide and Nitride Heterostructures with a Quantum Well 311
- Shchavruk N. V., Redckin S. V., Trofimov A. A., Ivanova N. E., Skripnichenko A. S., Kondratenko V. S., Styran V. V.** Splitting of Semiconductor Plates from Hard Materials into Crystals 319

Our:	To subscribe, please contact with:
Web: www.microsystems.ru/eng ;	JSC "MK-Periodica":
e-mail: nmst@novtex.ru	Tel: +7 (495) 672-7012
	Fax: +7 (495) 306-3757
	E-mail: import@periodicals.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.373.826

DOI: 10.17587/nmst.19.259-265

Ж. И. Алферов, д-р физ.-мат. наук, акад. РАН, ректор,
Ф. И. Зубов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **Г. Э. Цырлин**, д-р. физ.-мат. наук, зав. лаб.,
А. Е. Жуков, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, проректор,
Санкт-Петербургский Национальный исследовательский Академический университет РАН,
Н. В. Щаврук, канд. техн. наук., ст. науч. сотр., **А. Ю. Павлов**, канд. техн. наук, зав. лаб.,
e-mail: p.alex.ur@yandex.ru, **Д. С. Пономарев**, канд. физ.-мат. наук, зам. директора,
А. Н. Ключков, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **Р. А. Хабибуллин**, канд. физ.-мат. наук, ученый секретарь,
e-mail: khabibullin@isvch.ru, **П. П. Мальцев**, д-р техн. наук., проф., научный руководитель,
Институт сверхвысококачастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва

СОЗДАНИЕ ПЕРВОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Поступила в редакцию 03.11.2016

Продемонстрирован первый отечественный квантово-каскадный лазер терагерцового диапазона (ТГц ККЛ), изготовленный в рамках коллаборации СПб АУ РАН и ИСВЧПЭ РАН. Авторами была предложена конструкция активной области ТГц ККЛ на основе трех туннельно-связанных квантовых ям с резонансно-фононным механизмом депопуляции нижнего лазерного уровня, разработаны технология роста многослойных GaAs/AlGaAs-гетероструктур (228 каскада) методом молекулярно-пучковой эпитаксии и постростовая обработка гетероструктур для изготовления ТГц ККЛ. Исследования вольт-амперных и излучательных характеристик изготовленных ТГц ККЛ, проведенные в ИФМ РАН, подтверждают стимулированный характер излучения в исследуемых приборах. Постростовая обработка была апробирована на гетероструктурах фирмы Trion Technology (США).

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, терагерцовый диапазон, GaAs/AlGaAs-гетероструктуры, туннельно-связанные квантовые ямы, резонансно-фононный дизайн

Введение

Квантово-каскадные лазеры, основанные на переходах электронов между уровнями внутри зоны проводимости гетероструктур GaAs/AlGaAs, являются уникальными источниками терагерцового излучения. Данные устройства работают в диапазоне частот 1,2...5,0 ТГц (без использования больших магнитных полей) в непрерывном режиме с выходной мощностью более 200 мВт [1] и в импульсном режиме с пиковой мощностью более 1 Вт. На основе различных принципов (микроэлектромеханического, использования внешнего резонатора и др.) была достигнута перестройка частоты терагерцового квантово-каскадного лазера (ТГц ККЛ) на 300 ТГц и более. Кроме того, на сегодняшний день продемонстрированы ТГц ККЛ в режиме частотной гребенки со спектральной полосой более

1 ТГц [2]. Это открывает перспективы по разработке ТГц спектрометров на основе ТГц ККЛ с большим отношением сигнал/шум (теоретически более 60 дБ на 3 ТГц).

Помимо того что ТГц ККЛ является уникальным источником ТГц излучения, данные устройства можно использовать в качестве локального осциллятора для гетеродинного детектирования, т.е. решать задачу по детектированию ТГц излучения. Спектральная ширина генерации ТГц ККЛ с распределенной обратной связью составляет десятки килогерц, что привело к использованию гетеродинов на их основе при запуске аэростатов NASA для решения современных астрофизических задач.

С учетом последних достижений в технологии ТГц ККЛ актуальной стала задача исследования и разработки систем ТГц визуализации, построения изображений объектов в ТГц спектре с примене-

нием ТГц ККЛ. В качестве детекторов в данных системах успешно применяются микроболлометрические матрицы, позволяющие достичь отношения сигнал/шум более 300 при частоте записи 20 кадров в секунду [3]. Была показана возможность терагерцовой визуализации объектов, удаленных на более чем на 25 м от источника (ТГц ККЛ) [4].

Альтернативным подходом по созданию систем терагерцовой визуализации в режиме реального времени является использование эффекта самосмешивания (self-mixing) в ТГц ККЛ, при котором ТГц излучение отражается от внешней мишени обратно в резонатор лазера и интерферирует (смешивается) с электромагнитным полем внутри резонатора [5, 6]. В данном случае ТГц ККЛ будет одновременно выполнять функции источника, смесителя и детектора. Это значительно упрощает конструкции терагерцовых систем и уменьшит их стоимость.

Разработка ТГц ККЛ является актуальной задачей для создания систем измерения скорости и перемещений удаленных мишеней, измерений вариации ТГц коэффициента отражения мишеней, а также для удаленного обнаружения скрытых объектов и построения их двумерных и трехмерных изображений, т.е. для досмотровых систем безопасности, что крайне важно для предотвращения террористических атак. В то же время о работах над созданием ТГц ККЛ в России до 2016 г. не сообщалось.

Целью данной работы является демонстрация первого отечественного ТГц ККЛ, изготовленного в рамках коллаборации СПб АУ РАН и ИСВЧПЭ РАН.

Разработка конструкции активной области ТГц ККЛ

На основе численного и самосогласованного решения системы уравнений Шредингера в приближении эффективной массы и Пуассона были исследованы зависимости положения электронных уровней и силы осциллятора переходов от приложенного электрического поля для ТГц ККЛ с резонансно-фононным дизайном на основе каскада, состоящего из трех квантовых ям [7, 8]. Динамика носителей заряда под действием приложенного электрического поля рассматривалась в рамках

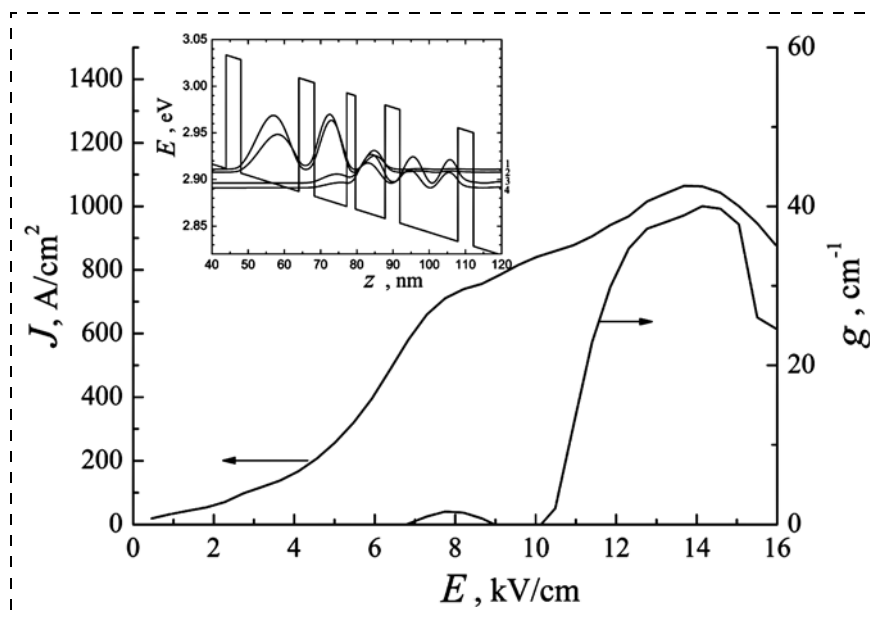


Рис. 1. Рассчитанные полевые зависимости плотности тока (J) и коэффициента усиления в ТГц ККЛ-гетероструктуре при 10 К. На вставке — зонная диаграмма и волновые функции электронов в электрическом поле, соответствующем порогу генерации (~12 кВ/см)

Fig. 1. Current density (J) and gain factor field dependences calculated for THz QCL's heterostructure at 10K. Inset: band diagram and wave functions of electrons in the electric field close to the generation threshold (~12 kV/cm)

метода неравновесных функций Грина с учетом процессов электрон-фононного взаимодействия и рассеяния электронов на примесях и шероховатостях гетерограниц. В результате была определена конструкция многослойной GaAs/AlGaAs-гетероструктуры с диагональными излучательными переходами и силой осциллятора перехода $f_{21} = 0,425$. Кроме того, в результате расчетов было оценено значение коэффициента усиления проектируемого ТГц ККЛ (рис. 1).

Эпитаксиальный синтез многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs

Предложенная конструкция многослойных GaAs/AlGaAs-гетероструктур была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 21. Рост осуществлялся на полуизолирующих подложках GaAs (100), обеспечивающих согласование параметров решетки с GaAs/AlGaAs, что важно ввиду большой толщины (около 10 мкм) всей структуры. Для уменьшения толщины переходных слоев были использованы специальные высокоскоростные заслонки, обеспечивающие время переключения алюминиевого и галлиевого потоков не более 0,15 с. Рост осуществлялся в мышьяк-стабилизированных условиях с температурой осаждения, контролируемой ИК пирометром. Состояние ростовой поверхности контролировалось с помощью дифракции быстрых электронов на отражение. Исследование структурных парамет-

ров с помощью рентгеновских кривых качания и энергии межзонных оптических переходов с помощью фотолюминесценции у выращенных структур подробно описано в работе [9]. Выращенные гетероструктуры обладают резкими гетерограницами эпитаксиальных слоев, что подтверждают снимки просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, рис. 2).

Постростовая обработка многослойных GaAs/AlGaAs-гетероструктур

Для создания ТГц ККЛ была использована схема двойного металлического волновода, в которой активная область заключается между двумя металлическими слоями. Такой волновод обеспечивает более сильную локализацию поля и меньшие потери по сравнению с плазмонным волноводом, хотя такой подход значительно усложняет постростовую обработку структур.

Многослойную GaAs/AlGaAs-гетероструктуру сращивали методом термокомпрессионного соединения с проводящей подложкой-носителем n^+ -GaAs. Затем проводилось последовательное травление исходной подложки GaAs до стоп-слоя AlGaAs с высоким содержанием Al, а затем и самого стоп-слоя, после чего сверху наносилась металлизация Ti/Au, которая служила в качестве маски для сухого травления гребневых мезаполосков и в качестве верхнего электрода ТГц ККЛ. В результате активная область ТГц ККЛ толщиной около 10 мкм оказывалась ограниченной двумя металлическими слоями. Подробное описание процессов формирования двойного металлического волновода дано в работе [10].

При изготовлении резонатора Фабри — Перо использовалась операция раскалывания гребневых мезаполосков ТГц ККЛ. Для улучшения качества сколов подложка-носитель n^+ -GaAs утонялась до толщины ~150 мкм. Кроме того, операцию раскалывания также упрощает формирование гребневых мезаполосков с так называемыми плечами. На снимке растрового электронного микроскопа изображен скол торца ТГц ККЛ с плечами (рис. 3). Чипы монтировались на медный теплопровод, являющийся нижним контактом к структуре.

Исследование изготовленных ТГц ККЛ

Измерение изготовленных ТГц ККЛ проводилось в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН). На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для исследуемого ТГц ККЛ. Наличие резкого излома на ВАХ (0,32...0,42 А) связано с образованием доменов электрического поля внутри лазерной структу-

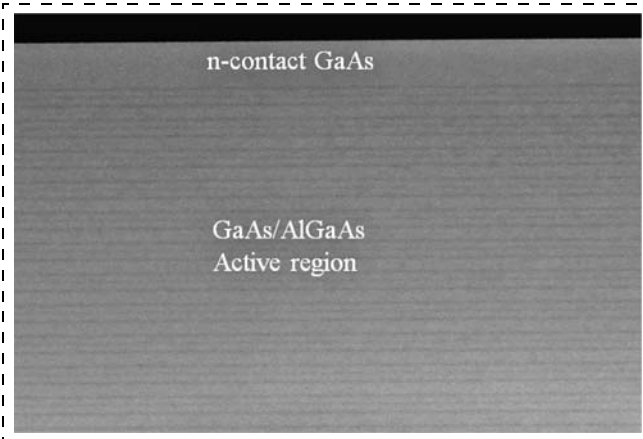


Рис. 2. ПЭМ-изображение активной области многослойной GaAs/AlGaAs-гетероструктуры

Fig. 2. TEM of the active area of the multilayer GaAs/AlGaAs-heterostructure

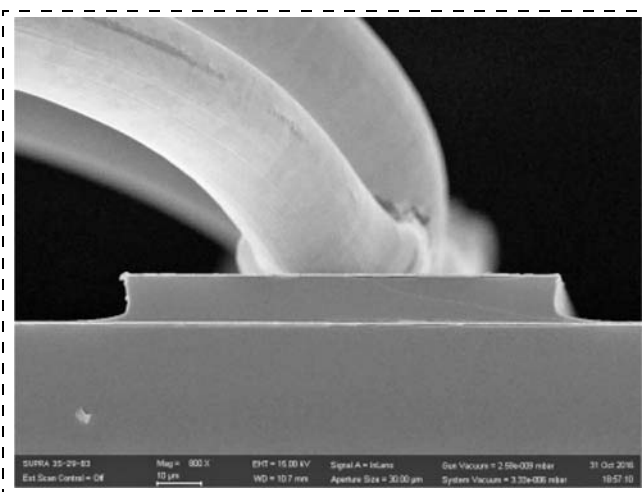


Рис. 3. РЭМ-изображение скола ТГц ККЛ

Fig. 3. SEM image of THz QCL cleavage

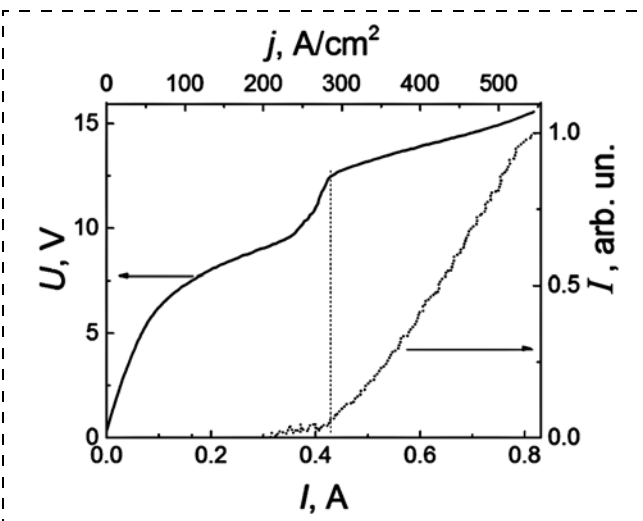


Рис. 4. ВАХ (сплошная линия) и зависимости интенсивности излучения от тока (пунктирная линия) исследуемого ТГц ККЛ

Fig. 4. CVC (full line) and emission intensity against current plot (dotted line) for THz QCL under study

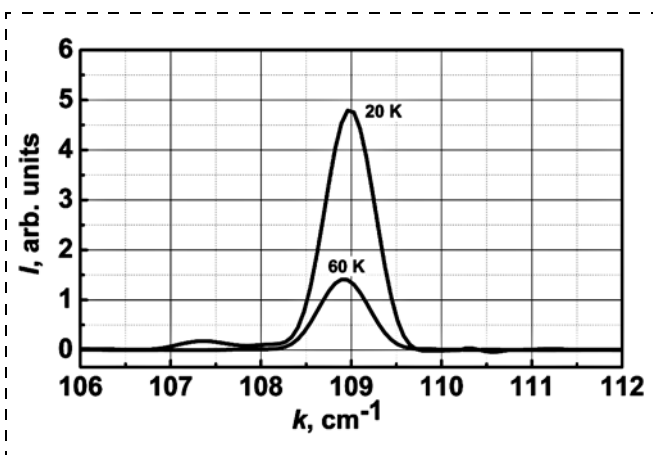


Рис. 5. Спектр излучения ТГц ККЛ на основе гетероструктуры фирмы Trion Technology при температуре 20 и 60 К

Fig. 5. Emission spectra of THz QCL based on the heterostructure from Trion Technology at 20 K and 60 K

ры. Далее ВАХ претерпевает резкий излом, свидетельствующий о приближении "нижнего" уровня инжектора к "верхнему" рабочему лазерному уровню, что способствует эффективному туннелированию электронов и быстрому росту тока через структуру. На зависимости интегральной интенсивности от тока видно, что излом на ВАХ при токе 0,42 А (280 А/см^2) соответствует началу резкого роста интенсивности излучения, что является признаком возникновения в структуре стимулированного излучения.

Апробация технологии изготовления ТГц ККЛ

Для апробации разработанной технологии была использована многослойная GaAs/AlGaAs-гетероструктура, изготовленная фирмой Trion Technology (США). Гетероструктура имеет резонансно-фонный дизайн на основе трех квантовых ям и рассчитана под частоту излучения вблизи 3,2 ТГц. Аналогично описанной выше постростовой обработке были изготовлены гребневые мезаполоски с шириной 100 мкм. Монтаж данных чипов был выполнен в АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха". В ИФМ РАН был измерен спектр излучения изготовленных ТГц ККЛ (рис. 5). В спектре излучения присутствует спектральная линия на частоте вблизи 109 см^{-1} , что соответствует 3,2 ТГц. При температуре 20 К на спектре присутствует более слабая спектральная линия вблизи $107,5 \text{ см}^{-1}$, соответствующая продольной моде резонатора.

Заключение

Несмотря на отсутствие задела в России в области создания ТГц ККЛ, авторами работы в период с 2015 по 2017 гг. удалось освоить проектирование

дизайна активной области ТГц ККЛ, разработать технологию синтеза многослойных GaAs/AlGaAs-гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, а также отработать процессы постростовой обработки выращенных гетероструктур для создания ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом. Исследования вольт-амперных и излучательных характеристик изготовленных ТГц ККЛ, проведенные в ИФМ РАН, подтверждают стимулированный характер излучения в исследуемых приборах. Для апробации постростовой обработки был изготовлен ТГц ККЛ на основе гетероструктуры фирмы Trion Technology (США). В спектре излучения данного ТГц ККЛ присутствует спектральная линия на частоте вблизи 109 см^{-1} , что соответствует 3,2 ТГц.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФМ РАН В. И. Гавриленко, К. В. Маремьянину и А. В. Иконникову за измерения изготовленных ТГц ККЛ и сотруднику АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха" А. И. Данилову за сборку чипов ТГц ККЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента № МК-6081.2016.8.

Список литературы

1. Wang X., Shen C., Jiang T. et al. High-power terahertz quantum cascade lasers with $\sim 0.23 \text{ W}$ in continuous wave mode // AIP Advances. 2016. Vol. 6, N. 7. P. 075210.
2. Li H., Laffaille P., Gacemi D. et al. Dynamics of ultra-broadband terahertz quantum cascade lasers for comb operation // Opt. Express. 2015. Vol. 23, N. 26. P. 33270.
3. Lee W. M., Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging using a microbolometer focal-plane array // Opt. Lett. 2005. Vol. 30, No. 19. P. 2563.
4. Alan W., Lee M., Kumar S. et al. Real-time terahertz imaging over a standoff distance ($>25 \text{ meters}$) // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89, N. 14. P. 141125.
5. Wienold M., Hagelschuer T., Rothbart N. et al. Real-time terahertz imaging through self-mixing in a quantum-cascade laser // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 109, N. 1. P. 011102.
6. Dean P., Mitrofanov O., Keeley J. et al. Apertureless near-field terahertz imaging using the self-mixing effect in a quantum cascade laser // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108, N. 9. P. 091113.
7. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu. et al. Terahertz Quantum-Cascade Laser Based on the Resonant-Phonon Depopulation Scheme, International Journal of High Speed // Electronics and Systems. 2016. Vol. 25, N. 03n04. P. 1640022.
8. Khabibullin R. A., Schchavruk N. V., Klochkov A. N. et al. Energy spectrum and thermal properties of terahertz quantum-cascade laser based on the resonant-phonon depopulation scheme // Semiconductors. 2017. Vol. 51, No. 4. P. 540.
9. Zhukov A. E., Cirlin G. E., Reznik R. R. et al. Multilayer heterostructures for quantum-cascade lasers operating in the terahertz frequency range // Semiconductors. 2016. Vol. 50, N. 5. P. 662.
10. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu. et al. Fabrication of a terahertz quantum-cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures // Semiconductors. 2016. Vol. 50, N. 10. P. 1377.

Zh. I. Alferov, Rector, **F. I. Zubov**, Senior Researcher, **G. E. Cirlin**, Head of Laboratory, **A. E. Zhukov**, Pro-rector, St. Petersburg National Research Academic University of RAS,
N. V. Shchavruk, Senior Researcher, **A. Yu. Pavlov**, Head of Laboratory,
D. S. Ponomarev, Deputy Director, p.alex.ur@yandex.ru, **A. N. Klochkov**, Senior Researcher,
R. A. Khabibullin, Scientific Secretary, e-mail: khabibullin@isvch.ru, **P. P. Maltsev**, Scientific Adviser,
Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Khabibullin Rustam A., Scientific Secretary, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: khabibullin@isvch.ru

The First Terahertz Quantum-Cascade Laser Fabricated in Russia

Received on November 03, 2016

Accepted on November 08, 2016

The first terahertz quantum-cascade laser (THz QCL) made in Russia in collaboration between SPbAU RAS and IUHFSE RAS was demonstrated. The design of the active region of THz QCL based on the three quantum wells with the resonant-phonon depopulation scheme was proposed. A molecular beam epitaxy growth of the multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures (228 cascades) was developed. Studies of I-V and of the emission characteristics of the fabricated THz QCL conducted in IPM RAS confirmed the nature of the stimulated emission in the test devices. The postgrowth processing was tested on the heterostructures from Trion Technology Co. (USA).

Keywords: quantum-cascade lasers, terahertz range, GaAs/AlGaAs heterostructures, tunnel-coupled quantum wells, resonant-phonon scheme

For citation:

Alferov Zh. I., Zubov F. I., Cirlin G. E., Zhukov A. E., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Ponomarev D. S., Klochkov A. N., Khabibullin R. A., Maltsev P. P. The First Terahertz Quantum-Cascade Laser Fabricated in Russia, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 259–265.

DOI: 10.17587/nmst.19.259-265

Introduction

Quantum cascade lasers (QCLs) based on electron transitions between energy levels within a conduction band in a GaAs/AlGaAs heterostructure are the unique sources of terahertz radiation. The devices operate in the 1.2...5.0 THz radiation range, without strong magnetic fields utilization, with the output power of more than 200 mW [1] in a continuous-wave mode and with the peak output power exceeding 1 W in a pulsed mode. Basing on a number of principles (microelectromechanical principle, external resonator application etc.), terahertz quantum cascade laser's (THz QCL's) frequency tuning range expansion toward 300 GHz and more is achieved. Besides, THz QCLs emitting over a spectral bandwidth of 1THz are demonstrated in a frequency comb operation mode [2], this opening a prospect of the development of a THz QCL-based THz spectrometer with a greater signal/noise ratio (theoretically, more than 60 dB per 3 THz).

Besides being a unique THz radiation source, the title device can be used as a local oscillator for heterodyne detection and thus provide an opportunity to solve the problem of THz radiation detection. Spectral range covered by the radiation generated by a THz QCL with a distributed feedback makes tens of KHz, this fact having lead to THz QCL-based heterodynes use in NASA aerostats for solving astrophysical problems.

The achievements in THz QCL technology make topical the task of the research and development of THz visualization systems and object imaging in the THz range using THz QCL. Microbolometer arrays ensuring signal-to-noise ratio over 300 at sampling frequency of 20 frame in second are successfully used for detectors [3]. A possibility is demonstrated of

THz visualization of objects situated more than 25 m away from the source (THz QCL) [4].

An alternative approach to building real-time THz visualization systems is the use of the self-mixing effect in THz QCL, when the THz radiation is reflected from an external target back into a laser's resonator and interferes (gets mixed) with the electromagnetic field inside the resonator [5, 6]. THz QCL in this case will function simultaneously as a source, a mixer, and a detector, which will simplify the structure of THz systems and reduce their cost.

A THz QCL development is a topical task for construction of systems for target velocity and displacement distant measuring and those for measuring the target's THz reflection factor variations and distant object detection and 2D and 3D imaging, this making THz QCL development important for inspection systems, which is extremely important for terrorist attack prevention. At the same time, no efforts on THz QCL creation undertaken in Russia have been reported before 2016.

The aim of the present work is to demonstrate the first domestic THz QCL.

Development of THz QCL active area design

The dependences of electron energy levels location and the transition oscillator strength upon the electric field applied for a THz QCL with resonance-phonon depopulation scheme and a cascade of three quantum wells are investigated on the basis of numerical and self-consistent solution to the system of Schrödinger's equations in effective-mass and Poisson approximations, [7, 8]. Charge carrier dynamics under the applied electric field's impact is considered in terms of nonequilibrium Green's functions method with the account

for electron-phonon interaction and electron scattering on admixtures and roughness of heteroboundaries. As a result, the structure of a multilayer GaAs/AlGaAs heterostructure with diagonal radiative transitions and the oscillator strength $f_{21} = 0.425$ is determined. Also, the estimated value of the gain factor of the THz QCL under construction is calculated (fig. 1).

Epitaxial synthesis of multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures

The offered structure of multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures is grown by molecular-beam epitaxy on a Riber 21 system. The growth was realized on semi-insulating GaAs (100) wafers providing for lattice parameters coordination with those of GaAs/AlGaAs heterostructure, which is important because of considerable thickness (about 10 μm) of the whole structure. Special high-speed shutters were used, in order to reduce the thickness of the transition layers. The shutters ensured that the time of the pattern change from Al- to Ga source did not exceed 0.15 s. The growth was realized in arsenic-stabilized conditions, with the sedimentation temperature controlled with an IR pyrometer. The growing surface condition *in-situ* control was carried out by the high-energy electron diffraction method.

Structural parameters of the grown multilayer heterostructures were studied using X-ray rocking curves; their band-to-band optical transition energy was investigated with the use of photoluminescence and is reported in detail in [9].

In the heterostructures obtained, the heteroboundaries of the epitaxial layers are very sharp, this being proved with the transmission electron microscopy (TEM, fig. 2).

Post-growth processing of multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures

In order to build a THz QCL, a double metal waveguide structure was used, in which the active area is placed between two metal layers. Such a waveguide ensures stronger field localization and lower losses, as compared to a plasmon waveguide, though this approach makes the post-growth structure processing more complicated.

The GaAs/AlGaAs heterostructure was joined with a conducting n^+ -GaAs wafer with a thermocompression bonding with subsequent wet etching of the initial GaAs wafer until the AlGaAs stop-layer rich in Al was reached. After etching the AlGaAs stop-layer, Ti/Au metallization was made, which served simultaneously as a mask for ridge mesostrips dry etching and as the top electrode of the THz QCL. Finally, the active area of the THz QCL with the thickness of about 10 μm turned out to be limited with two metal layers. The double metal waveguide formation is described in more details in [10].

At Fabry-Perot resonator fabrication, THz QCL's ridge mesostrip cleavage was used. To improve the cleavage quality, the n^+ -GaAs wafer thickness was reduced to $\sim 150 \mu\text{m}$. Besides, cleavage facilitates the formation of the ridge mesostrips with "shoulders". One can see a THz QCL end cleavage in the scanning electron microscope picture (fig. 3). The chips were mounted onto a copper heat sink, which also served as the bottom contact of the structure.

Study of fabricated THz QCLs

The performances of the THz QCLs made were measured at the Institute for Physics of Microstructures RAS (IPM RAS). Current-voltage (I – V) characteristics and total radiation intensity vs. current plot for the THz QCL under study are pre-

sented in the fig. 4. Presence of a knee in the I – V characteristics (0.32...0.42 A) is related to the electric field domains formation inside the laser structure. Further, I – V characteristics undergoes a sharp bend associated with the "lower level" of the injector approaching the laser's "upper" working level, this promoting efficient tunneling of electrons and fast growth of the electron current across the structure. In the plot of integral current intensity vs. current dependence, one can see that the bend in I – V characteristics at the current of 0.42 A (280 A/cm²) correlates with the sharp increase in radiation, which indicates the beginning of stimulated emission in the structure.

THz QCL fabrication technology testing

For testing the THz QCL fabrication technology, a multilayer GaAs/AlGaAs heterostructure from Trion Technology (USA) was used. The heterostructure had a three quantum well based phonon-resonance design and it was calculated for the radiation frequency of about 3.2 THz. In the way similar to the post-growth treatment described above, 100 μm wide ridge mesostrips were produced.

Chips were mounted at NII Polyus JSC. The emission spectrum of the fabricated THz QCLs was measured at IPM RAS (fig. 5). In the emission spectrum, a spectral line is present near the frequency of 109 cm^{-1} , which corresponds with 3.2 THz. At 20 K, a weaker line is present in the spectrum near 107.5 cm^{-1} , this corresponding with the longitudinal mode of the resonator.

Conclusion

Despite the absence of a groundwork for THz QCL fabrication in Russia, the authors succeeded in designing a THz QCL's active area, the development of multilayer GaAs/AlGaAs heterostructure synthesis technique using molecular-beam epitaxy, working out in detail the grown structure post-growth processing for building a THz QCL with a double metal waveguide; all this has been done within the period from 2015 to 2017.

Investigation of THz QCL's current-voltage characteristics carried out at IPM RAS, has proved the stimulated nature of the emission in the studied devices. In order to test the post-growth processing technique, a THz QCL was fabricated on the basis of a heterostructure from Trion Technology Company (USA). In the emission spectrum of the device, a spectral line is present near the frequency of 109 cm^{-1} , which corresponds with 3.2 THz.

The Authors are thankful to the research fellows from IPM RAS V. I. Gavrilenko, K. V. Marem'yanin, and A. V. Ikonnikov for measuring the characteristics of the fabricated THz QCLs.

The Authors are also grateful to the scientific associate of the NII Polyus JSC A. I. Danilov for mounting chips for THz QCL.

The work was supported by the Russian President's grant no. MK-6081.2016.8.

References

1. Wang X., Shen C., Jiang T. et al. High-power terahertz quantum cascade lasers with ~ 0.23 W in continuous wave mode, *AIP Advances*, 2016, vol. 6, no. 7, p. 075210.
2. Li H., Laffaille P., Gacemi D. et al. Dynamics of ultra-broadband terahertz quantum cascade lasers for comb operation, *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 26, p. 33270.

3. Lee W. M., Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging using a microbolometer focal-plane array, *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, no. 19, p. 2563.
4. Alan W., Lee M., Kumar S. et al. Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters), *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, no. 14, p. 141125.
5. Wienold M., Hagelschuer T., Rothbart N. et al. Real-time terahertz imaging through self-mixing in a quantum-cascade laser, *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 109, no. 1, p. 011102.
6. Dean P., Mitrofanov O., Keeley J. et al. Apertureless near-field terahertz imaging using the self-mixing effect in a quantum cascade laser, *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 108, no. 9, p. 091113.
7. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu. et al. Terahertz Quantum-Cascade Laser Based on the Resonant-Phonon

Depopulation Scheme, *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2016, vol. 25, no. 03n04, p. 1640022.

8. Khabibullin R. A., Schchavruk N. V., Klochkov A. N. et al. Energy spectrum and thermal properties of terahertz quantum-cascade laser based on the resonant-phonon depopulation scheme, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 4, p. 540.

9. Zhukov A. E., Cirilin G. E., Reznik R. R. et al. Multilayer heterostructures for quantum-cascade lasers operating in the terahertz frequency range, *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 5, p. 662.

10. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu. et al. Fabrication of a terahertz quantum-cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures, *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 10, p. 1377.

УДК 621.38

DOI: 10.17587/nmst.19.265-272

В. И. Рыжий, д-р физ. мат. наук, проф., член.-корр. РАН, гл. науч. сотр., e-mail: vryzhii@gmail.com, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва,
М. В. Рыжий, д-р техн. наук, доцент, e-mail: m-ryzhii@u-aizu.ac.jp, Department of Computer Sci. and Eng., University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan,
Т. Отсуджи, д-р техн. наук, проф., e-mail: otsuji@riec.tohoku.ac.jp, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Japan

НА ПУТИ К РЕАЛИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Поступила в редакцию 24.11.2016

Представлены недавние результаты, полученные взаимодействующими группами российских и японских исследователей, на пути реализации терагерцовых лазеров на основе графеновых гетероструктур с электрической (инжекционной) накачкой. Рассматриваются два типа терагерцовых графеновых лазеров: лазеры на основе однослойной и многослойной графеновых p-i-n гетероструктур с боковыми p- и n-инжектирующими областями, использующие межзонные внутрислойные излучательные переходы, и лазеры на основе двойных графеновых гетероструктур со слоями, разделенными туннельным барьерным слоем и индивидуальными контактами к каждому слою, использующие резонансно-туннельные внутризонные межслойные переходы, сопровождаемые излучением фотонов.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, графен, гетероструктура, инверсная заселенность, лазер

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного излучения расположен между микроволновым и оптическим спектральными областями (рис. 1). Этот диапазон покрывает частоты молекулярных колебаний в газах и жидкостях и частоты колебаний решетки твердых тел. На этом основаны многочисленные уже существующие и будущие применения ТГц излучения включающие: радиоастрономию, ночное видение, скрытую связь между космическими аппаратами и в локальных компьютерных сетях, детектирование отравляющих и взрывчатых веществ, мониторинг окружающей среды, медицинскую диагностику и др. Несмотря на многолетние усилия и замечательные достижения в электронике сверхвысоких частот и фотонике, реализация компактных, достаточно мощных и эффективных ТГц приборов, работающих при приемлемых температурах (т.е. при комнат-

ных температурах или, по крайней мере, при умеренном охлаждении), остается нерешенной проблемой. Ввиду практических и фундаментальных сложностей широкого использования ТГц излучения в мировой научно-технической литературе возник термин ТГц "щель".

Приборы и системы на их основе, ликвидирующие эту "щель", могут быть реализованы на основе твердотельных структур и, прежде всего, полупроводниковых гетероструктур из сравнительно традиционных материалов и, в особенности, новых материалов. Наибольший успех в продвижении внутрь ТГц "щели" связан с разработкой резонансно-туннельных диодов (РТД) [1] и квантовых каскадных лазеров (ККЛ) [2] на основе соединений III—V, перекрывающих ТГц "щель" соответственно с микроволновой и фотонной "сторон". Путь от изобретения этих приборов до их воплощения в работающих образцах занял несколько десятиле-