

СОЗДАНИЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ДЕТЕКТОРОВ, ГЕНЕРАТОРОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Г.Н. Измайлов, проф. Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), д-р физ.-мат. наук

Описаны цели исследований, разработки технологии и создания полупроводниковых и сверхпроводниковых наноструктурных генераторных элементов и сверхчувствительных быстродействующих приемных модулей терагерцового диапазона на основе соединений $A^{III}B^V$.

Ключевые слова: наноструктуры, терагерцовое излучение, генераторы и детекторы.

Терагерцовым (ТГц) называют участок электромагнитного спектра, соответствующий частотам $10^{11} - 10^{12}$ Гц или 0,1 мм – 30 мкм шкалы длин волн. Существенно, что ТГц – излучение неионизирующее, то есть не вызывает повреждений при облучении человека. Подобно микроволновому этот тип излучения легко проникает через одежду, картон, дерево, пластмассу и керамику, но задерживается металлами и водой. Малая длина излучения определяет большую разрешающую способность диагностики.

Уникальные особенности ТГц-излучения определили области его использования:

– фундаментальная важная особенность исследований в ТГц-диапазоне электромагнитных волн заключается, в частности, в проверке закона излучения Планка для абсолютно черного тела при низких (10–20 кельвин) температурах. Приложение видится в понимании результатов измерений излучения космической пыли в нашей и удаленных звездообразующих галактиках (субмиллиметровая астрономия), излучения Солнца в пропущенном ранее диапазоне от сотен ГГц до единиц ТГц, который существенен для прогнозов активности Солнца [1]. Другая фундаментальная значимость – в возможности изучения структур, образованных нековалентным взаимодействием между молекулами, что позволяет получить новую информацию в химии, биохимии, генетике и фармакологии, определять вещество;

– свыше 3/4 всех раковых опухолей расположены в разных слоях эпидермиса, но часто не обнаруживаются из-за своих малых размеров на начальной стадии развития. Неионизирующее действие ТГц-излучения определяет его диагностическую ценность и возможность неинвазивной терапии в медицине;

– большое внимание уделяется применению ТГц-излучения на больших высотах между летательными аппаратами разных типов. Недавно было сообщено [2], что использование ТГц-излучения в беспроводной связи (Wi-Fi) подняло скорость передачи информации до 3 Гбит в секунду на частоте 0,583 ТГц, то есть в 20 раз больше современного стандарта Wi-Fi. Оптимистические оценки допускают скорость до 100 Гбит/с;

– поскольку ТГц-излучение свободно проникает через ткани, пластик и керамику, а поглощение материалами носит специфический характер, то оно может быть успешно использовано для дистанционного наблюдения и выявления скрываемого оружия или общественно опасных предметов;

– в производстве продукции излучение благодаря своему бесконтактному, неразрушающему воздействию имеет преимущество, усиливаемое возможностью создания изображения 3D объекта и определения его химического состава. Эти преимущества активно используются в аэрокосмической и оборонной отраслях, фармакологии [3]. Так, НАСА использовала ТГц-технику, разработанную фирмой Picometrix (США), для контроля теплоизоляционной обшивки космического аппарата Space Shuttle. Фармацевтические фирмы заинтересованы в использовании ТГц-излучения для контроля качества таблеток, проверки уже упакованной продукции;

– возможность обнаружения неметаллических объектов под непрозрачным покровом (интроскопии) важна не только в обеспечении общественной безопасности. Искусствоведы и археологи проявляют интерес к использованию ТГц-излучения для обнаружения закрашенных или заштукатуренных фресок, вновь перекрашенных картин или для обнаружения внутренних полостей в скульптурах, исторически значимых артефактах [4].

Работы по созданию генераторов и детекторов ТГц-диапазона были начаты еще в 1980–90-х гг. Интерес к данной области исследования может быть подтвержден большим числом публикаций в отечественных и зарубежных изданиях (около 40 за последние три года), 25 полученными патентами в России, США и Японии. В работах группы Т. Соллнера [5–7] для создания высокочастотных генераторов на резонансных туннельных диодах (РТД) в качестве резонаторной системы использовались прямоугольные волноводные металлические резонаторы, размеры которых подбирались в соответствии с рабочей частотой генерации. Авторам удалось достигнуть рекордной на то время частоты ~ 720 ГГц, мощность генерации, приближенно оцененная по данным измерений, составляла десятые доли микроватта. Однако технологические трудности существенно ограничивали возможности применения таких систем. В дальнейшем появились работы, в которых в качестве резонаторной системы было предложено использовать микрополосковые резонаторы [8] либо планарные антенны [9–10], включая щелевые антенны [11–13]. Резонаторы этого типа более технологичны в изготовлении и допускают варьирование размеров в широких пределах без существенного удорожания их производства. Важным преимуществом микрополосковых линий является принципиальная возможность их интегрирования в твердотельные и гибридные интегральные схемы с использованием стандартной тонкопленочной технологии. Добротность микрополосковых резонаторов не очень высока, но может быть доведена до достаточно больших значений в высокочастотной области, в частности, за счет выбора геометрии резонатора. Использование специальным образом сконструированных планарных антенн в качестве резонатора позволило существенно продвинуться в высокочастотную область и получить генерацию на РТД на частотах порядка 1 ТГц.

В то же время достаточно интенсивно исследовались свойства самих РТД-структур. Процессы высокочастотной генерации в РТД теоретически моделировались в целом ряде работ [10–19]. Использование специальным образом сконструированных планарных антенн в качестве резонатора позволило существенно продвинуться в высокочастотную область и получить генерацию на РТД на частотах порядка 1 ТГц. В то же время достаточно интенсивно исследовались свойства самих РТД-структур. Процессы высокочастотной генерации в РТД теоретически моделировались в целом ряде работ [14–23] в нескольких научных группах, как в России, так и за рубежом. Важным достижением было сделанное группой В.Ф. Елесина предсказание особого «квантового» режима генерации в РТД [19–25, 26–28], обусловленного квазирезонансными переходами между резонансным уровнем квантовой ямы и одним из квазиэнергетических уровней электрона в поле электромагнитной волны. Согласно теоретическим оценкам этот режим наиболее эффективен именно в терагерцовом диапазоне частот и обещает резкое увеличение выходной мощности генерации. Следует отметить, что в традиционном, классическом режиме генерации резонансно-туннельного диода отличие от традиционного режима, при котором мощность генерации падает с увеличением рабочей частоты как $1/\omega^4$, в структурах, реализующих «квантовый» режим генерации, мощность зависит от частоты как $1/\omega$, что делает их более перспективными для продвижения в высокочастотную область спектра. В предсказанном «квантовом» режиме РТД способен давать генерацию высокой мощности на сверхвысоких частотах, значительно превосходящих ширину резонансного уровня. Ожидаемая мощность генерации в этом случае по оценкам может на порядки превосходить мощность генераторов, работающих в классическом режиме.

Поэтому важной задачей предлагаемого проекта является поиск оптимальной конфигурации резонансно-туннельных структур для экспериментальной реализации указанного режима генерации. В проекте планируются также работы по изучению оптических межподзонных

переходов и связанных с этим возможностей получения селективных источников терагерцового излучения на основе сверхрешеточных резонансно-туннельных структур. Механизм возникновения сильно деформированных и инвертированных распределений в сверхрешеточных структурах, содержащих широкие квантовые ямы, определяется резонансно-туннельным характером движения носителей заряда и принципиальным различием механизмов рассеяния с участием и без участия оптических фононов в нижних подзонах размерного квантования. Ожидается, что в рамках новой работы будут определены технологические условия выращивания методами молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых резонансно-туннельных наногетероструктур, оптимальных с точки зрения их использования в качестве источников и преобразователей микроволнового и терагерцового излучения, развиты методики контроля качества и диагностики структур, а также экспрессные методы, позволяющие осуществлять коррекцию технологического процесса в режиме реального времени на всех этапах изготовления наноструктур.

Квантовые эффекты, в том числе, связанные с резонансным туннелированием, широко используются в современной твердотельной и полупроводниковой электронике. Наибольшие успехи в плане расширения частотного диапазона достигнуты с использованием резонансно-туннельных диодных структур, изготовленных на основе квантовых ям, обладающих рекордно высоким быстродействием внутренних электронных процессов. Несмотря на исключительно малую инерционность процессов резонансного туннелирования переход в сторону наиболее высоких частот, соответствующих терагерцовому диапазону, чрезвычайно затруднен. Основные причины обусловлены резким возрастанием электрических потерь и трудностей изготовления резонаторных систем малых размеров, возрастанием роли паразитных индуктивностей и других параметров в системах соединения активного элемента с внешней резонаторной системой.

Одним из перспективных направлений, позволяющих обойти эти сложности, является использование планарных и микрополосковых резонаторов, занимающих промежуточное положение между закрытыми резонаторными устройствами, применяемыми в микроволновой радиофизике, и резонаторами открытого типа, используемыми в оптике. Резонаторы этого типа более технологичны в изготовлении и допускают варьирование размеров в широких пределах без существенного удорожания их производства. Важным преимуществом микрополосковых линий является принципиальная возможность их интегрирования в твердотельные и гибридные интегральные схемы с использованием стандартной тонкопленочной технологии. Добротность микрополосковых резонаторов не очень высока, но может быть доведена до достаточно больших значений в высокочастотной области, в частности, за счет выбора геометрии резонатора.

Использование прецизионных фотолитографических методов при изготовлении микрополосковых резонаторов и планарных антенн обеспечивает необходимую в области высоких частот более высокую точность изготовления элементов конструкции генератора, чем методы, обычно применяемые при изготовлении СВЧ-схем. Микрополосковая конструкция генератора совместима с многоэлементными планарными системами и допускает возможность его включения в качестве одного или нескольких элементов в различного типа полупроводниковые интегральные схемы.

Главные трудности связаны с реализацией экспериментальных возможностей наблюдения, предсказанных теорией эффектов, так как они должны проявляться в самой высокочастотной области микроволнового диапазона. В рамках данного проекта предполагается использовать методики субмиллиметровой спектроскопии для исследования высокочастотного отклика резонансно-туннельных структур, в частности, методику измерения усиления в РТД на субмиллиметровом ЛОВ-спектрометре, а также изучение генерации высокочастотных гармоник микроволнового излучения на РТД как нелинейном элементе.

В настоящем проекте предполагается исследовать и разработать резонансно-туннельные гетероструктуры для создания монолитно-интегрированных источников терагерцового диа-

пазона. Проект не предполагает повторение и развитие зарубежных достижений, он основан на оригинальных результатах теоретических исследований российских ученых, в том числе исследований, приведших к предсказанию «квантового» режима генерации в РТД, обусловленного квазирезонансными переходами между резонансным уровнем квантовой ямы и одним из квазиэнергетических уровней электрона в поле электромагнитной волны. Поэтому важной задачей предлагаемого проекта является поиск оптимальной конфигурации резонансно-туннельных структур для экспериментальной реализации указанного режима генерации. В проекте планируются также работы по изучению оптических межподзонных переходов и связанных с этим возможностей получения селективных источников терагерцового излучения на основе сверхрешеточных резонансно-туннельных структур [29]. Механизм возникновения сильно деформированных и инвертированных распределений в сверхрешеточных структурах, содержащих широкие квантовые ямы, определяется резонансно-туннельным характером движения носителей заряда и принципиальным различием механизмов рассеяния с участием и без участия оптических фононов в нижних подзонах размерного квантования.

К сегодняшнему дню именно субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны, граничащие с оптической областью и СВЧ-диапазоном, представляют значительный интерес с точки зрения задач различных разделов науки и техники, о чем упоминалось выше. С другой стороны, они же являются наименее освоенными и наиболее сложными для практической реализации. В гигагерцовом диапазоне работают многочисленные электронные источники СВЧ-излучения, а дальний инфракрасный диапазон успешно осваивается с помощью недавно разработанных лазеров на межподзонных переходах. Дальнейшее уменьшение частоты лазерных переходов ограничивается трудностями создания инверсной заселенности при уменьшении межподзонного расстояния. Поэтому для продвижения в субтерагерцовую область наиболее перспективным представляется исследование и разработка электронных твердотельных приборов. Однако частотный рабочий интервал уже созданных и применяемых твердотельных приборов, таких как полевые транзисторы, лавинно-пролетные диоды, ганновские генераторы, ограничен десятками гигагерц по физическим причинам фундаментального характера. Поэтому переход в область терагерцовых частот сопряжен с необходимостью поиска принципиально новых механизмов генерации, преобразования и детектирования, которые могли бы обеспечить достаточно высокую эффективность в этом диапазоне электромагнитных волн.

К их числу, в первую очередь, следует отнести использование квантовых эффектов типа резонансного туннелирования, характеризующихся чрезвычайно малой инерционностью внутренних электронных процессов (время переходных процессов менее 1 пс, что сопоставимо с быстродействием сверхпроводящих приборов на эффекте Джозефсона). Именно в этом направлении в мире достигнуты наивысшие в твердотельной электронике рекорды по быстродействию.

Но, чтобы быть полезными для широкого круга задач, и в том числе для промышленного применения, ТГц-излучатели и детекторы должны быть надежными, компактными, удобными в исследовании, обладать высокой эффективностью.

В рамках заделной НИР «Технологические основы и физические принципы создания нового поколения высокочувствительных сверхбыстродействующих детекторов, генераторов и преобразователей субтерагерцового и терагерцового диапазона частот на основе полупроводниковых диодных наноструктур с квантовыми ямами на основе соединений $A^{III}B^V$ » должны быть решены следующие задачи:

- определены технологические условия выращивания методами молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых резонансно-туннельных наногетероструктур, оптимальных с точки зрения их использования в качестве источников и преобразователей микроволнового и терагерцового излучения, развиты методики контроля качества и диагностики структур, а также экспрессные методы, позволяющие осуществлять коррекцию технологического процесса в режиме реального времени на всех этапах изготовления наноструктур;

– изучены закономерности резонансного туннелирования; поперечного транспорта, нелинейных свойств и излучательных процессов в резонансно-туннельных структурах GaAs/AlAs и InP с квантовыми ямами различной конфигурации, исследованы возможности повышения эффективности генерации в терагерцовом диапазоне за счет особенностей резонансного туннелирования, оптимизации структур и реализации квантового режима генерации излучения в симметричных и асимметричных резонансно-туннельных структурах;

– проведена схемотехническая разработка генераторных монолитно-интегрированных элементов структур на основе резонансно-туннельных диодов (РТД), оптимальных с точки зрения реализации квантового режима усиления и генерации электромагнитных колебаний в диапазоне субтерагерцовых и терагерцовых частот.

Предлагаемая тема исследований является продолжением работ, проводимых в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса Российской Федерации на 2007–2012 годы». В рамках проекта «Разработка и создание сверхбыстродействующих устройств нанoeлектроники на основе резонансно-туннельных гетероструктур» разработана первая в мире планарная технология ИС на базе резонансно-туннельных гетероструктур, позволяющая реализовать эту технологию для цифровых интегральных схем. Эти исследования получили дальнейшее развитие в проекте «Исследование и разработка технологии создания резонансно-туннельных гетероструктур для планарных источников и преобразователей микроволнового излучения» и в проекте «Исследование и разработка полупроводниковых и сверхпроводниковых многослойных наноструктур для источников и детекторов терагерцового диапазона в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса Российской Федерации на 2007–2012 годы». Эта технология будет использована при выполнении настоящего проекта.

В цикле теоретических работ, выполненных в том числе и участниками проекта, построена последовательная квантово-механическая теория генерации электромагнитного излучения в резонансно-туннельных диодных структурах, в частности, предсказан новый «квантовый» режим генерации, позволяющий существенно повысить эффективность генерации в области высоких частот. Показано, что в принципе возможна генерация сильных электромагнитных полей в терагерцовом диапазоне мощностью до 10^6 – 10^7 Вт/см². Наряду с аналитической теорией разработаны численные методы расчета характеристик РТД. Проведены расчеты высокочастотного отклика с учетом электронного взаимодействия в широком интервале частот и полей, а также для реальных структур с учетом энергетического распределения электронов, различных температур, свидетельствующие о реальности проявления квантового режима генерации в резонансно-туннельных структурах с правильно выбранными электрофизическими и структурными параметрами.

Полученные результаты теоретических расчетов и оценок, а также развитые методы расчета и понимание физики квантовых явлений будут использованы в ходе выполнения проекта и составляют основу для решения поставленной в проекте задачи.

Современные зарубежные исследования по данной тематике проводятся в рамках международного научного сотрудничества на основе «Соглашения о создании международного научного объединения «Полупроводниковые источники и детекторы в области терагерцовых частот», принятого в прошлом году рядом научных учреждений европейских государств и Японии с участием Национального центра научных исследований Франции (CNRS) и Российской академии наук (РАН). Конкретно данная работа может проводиться совместно с лабораторией Национального центра научных исследований Франции Университета г. Монпелье. С этой лабораторией ведутся совместные исследования в смежных областях физики полупроводников и полупроводниковых структур, связанные с изучением полупроводников и полупроводниковых структур, процессов генерации и детектирования терагерцового излучения. Эта лаборатория обладает передовой техникой измерений в этом диапазоне

электромагнитного спектра и может быть эффективно использована при проведении работ и решении задач, поставленных в данном проекте.

Создание твердотельных генераторов и преобразователей нового типа, а также сверхпроводниковых детекторных микрочипов с рекордными чувствительностью и быстродействием, предназначенных для работы в различных режимах в локационных системах космического и земного базирования, ретрансляторах передающих линий связи, системах радиовидения и интроскопии, в технике охранных и инспекционных систем и других областях двойных технологий, позволит повысить конкурентную способность и техническую оснащенность отечественной гражданской и военной техники, применение терагерцовой техники в медицине и в биологических исследованиях.

Список литературы

1. **Измайлов Г.Н., Квашнин А.Н., Максумов О.С., Махмутов В.С., Стожков Ю.И.** Сб. матер., 9-е Всероссийское совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26 янв. 2010 г.
2. **Ishigaki K., Shiraishi M., Suzuki S., Asada M., Nishiyama N., and Arai S.** Electronic Letters 48 (10) (10 May 2012). doi: 10.1049/el.2012.0849.
3. **Beigang R.** Physics World 21.4.2008.
4. **Jackson J.B., Mourou M. et al.** Opt. Commun. 281, 4. 15 February 2008.
5. **Brown E.R., Sollner T.C.L.G. et al.** J. Appl.Phys 64(3). 1988.
6. **Brown E.R., Sollner T.C.L.G. et al.** Appl.Phys.Lett. 55(17). 1989.
7. **Brown E.R., Sollner T.C.L.G. et al.** Appl.Phys.Lett. 58(20). 1991.
8. **Beloushkin A.A., Ignatyev A.S., Karuzskii A.L., Murzin V.N. et al.** Superlattices and Micro-structures, 22, No.1, 19–23. 1997.
9. **Reddy M., Martin S.C., Molnar A.C., Muller R.E. et al.** IEEE Electron. Device Lett.18, 218. 1997.
10. **Orihashi N., Suzuki S., Asada M.** Appl.Phys.Lett.87. 2005.
11. **Suzuki S., Asada M. et al.** Appl.Phys.Lett. 97. 2010.
12. **Asada M., Suzuki S. and Kishimoto N., Jap. J. Appl. Phys.** 47(6). 2008.
13. **Asada M., Suzuki S.** IEICE Electronics Express. 8(14). 2011.
14. **Feiginov M.N.** Appl. Phys. Lett. 76(20). 2000.
15. **Елесин В.Ф., Катеев И.Ю., Подливаев А.И.** Нелинейная теория когерентной генерации резонансно-туннельного диода в широком интервале частот // Физика и техника полупроводников. 2000. № 34. Вып. 11.
16. **Elesin V.F.** Phys. Low-Dim. Struct. 1/2. 2000.
17. **Елесин В.Ф.** ЖЭТФ 119, 816. 2001.
18. **Feiginov M.N.** Appl.Phys.Lett. 78(21). 2001.
19. **Елесин В.Ф.** Высокочастотный отклик двухбарьерных наноструктур // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2002. № 121. Вып. 4.
20. **Елесин В.Ф., Катеев И.Ю., Подливаев А.И.** Высокочастотный отклик и нелинейная когерентная генерация резонансно-туннельного диода в широком интервале частот с учетом межэлектронного взаимодействия // Физика и техника полупроводников. 2002. № 36. Вып. 9.
21. **Елесин В.Ф.** Резонансное туннелирование электронов, взаимодействующих с фононами // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2003. № 123. Вып. 5.
22. **Елесин В.Ф.** Резонансное туннелирование и нелинейный отклик в высокочастотном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2003. № 124. Вып. 2.
23. **Елесин В.Ф.** Высокочастотный отклик двухъямных наноструктур // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2005. № 127. Вып. 1.

24. **Елесин В.Ф.** Перестраиваемый терагерцовый генератор на двухъямной наноструктуре с когерентной электронной подсистемой // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2005. № 128. Вып. 5.
25. **Елесин В.Ф., Катеев И.Ю.** Высокочастотный нелинейный отклик двухъямных наноструктур // Физика и техника полупроводников. 2005. № 39. Вып. 9.
26. **Feiginov M.N., Chowdhury D.R.** Appl.Phys.Lett., 91. 2007.
27. **Feiginov M., Sydlo C., Cojocari O. and Meissner P.** Appl. Phys. Lett. 99. 2011.
28. **Feiginov M., Sydlo C., Cojocari O. and Meissner P.** Appl. Phys. Lett. 99. 2011.
29. **Теленков М.П., Митягин Ю.А.** Микроскопическая модель последовательного резонансно-туннельного транспорта в сверхрешетках со слабой туннельной связью // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2004. № 126. Вып. 3.