

На правах рукописи

Павлов Сергей Геннадьевич

**ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ
НА ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРАХ
В КРЕМНИИ И ГЕРМАНИИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте физики микроструктур РАН и Институте исследований
планет Немецкого аэрокосмического центра (Institut für
Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Berlin).

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
Шастин Валерий Николаевич,
Институт физики микроструктур РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор
Андронов Александр Александрович,
Институт физики микроструктур РАН

доктор физико-математических наук,
профессор
Фирсов Дмитрий Анатольевич,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

доктор физико-математических наук,
профессор
Гольцман Григорий Наумович,
Московский педагогический
государственный университет

Ведущая организация: Физический институт имени П. Н.
Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 1 июля 2010 года в 14⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 002.098.01 в Институте физики
микроструктур РАН (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан 19 мая 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

К. П. Гайкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра (1-10 ТГц), альтернативно называемый также длинноволновым/дальним инфракрасным диапазоном длин волн (30-300 мкм), представляет значительный интерес в современных фундаментальных и прикладных исследованиях. Продвижение в данный спектральный диапазон может существенно раздвинуть достигнутые границы исследований в радиоастрономии для исследования физических процессов на ранней стадии развития Вселенной; в молекулярной и твердотельной спектроскопии - для изучения спектров колебаний органических соединений и спектров состояний конденсированной среды, ее дефектов и др. (см., например, монографию [1]). С прикладной точки зрения привлекают возможности терагерцового излучения в биологии для ранней диагностики дерматологических заболеваний; в системах безопасности - для дистанционного обнаружения потенциально опасных органических материалов, а также в системах сверхплотной и/или скрытной передачи информации. Основной проблемой развития перечисленных направлений является отсутствие доступных и эффективных источников терагерцового (ТГц) излучения, и, в первую очередь, ТГц полупроводниковых лазеров. Традиционные инжекционные лазеры на межзонных оптических переходах в отмеченном интервале частот практически не работоспособны. Это предопределило поиск новых подходов к решению данной проблемы. Первым серьезным достижением на этом пути стали лазеры на межподзонных переходах в дырочном германии (*p-Ge*), работающие в сильных электрическом и магнитном полях и перекрывающие диапазон излучения 1-4,2 ТГц (см. обзор [A32]). Отличительной особенностью данных лазеров является аномально широкий спектр усиления, позволяющий реализовывать широко и непрерывно перестраиваемые по частоте источники излучения. Однако низкая эффективность *p-Ge* лазеров, их высокие потребляемые мощности и импульсный режим генерации излучения ограничивают возможности широкого применения таких устройств. В последнее время достигнут существенный прогресс в расширении спектра излучения в длинноволновую часть для квантово-размерных

каскадных лазеров на арсенид-галлиевых гетероструктурах, перекрывших к настоящему времени диапазон 1-5 ТГц (см. обзор [2]). Необходимая для усиления света инверсная заселенность состояний двумерных подзон в этих лазерах формируется при вертикальном транспорте электронов по так называемому квантовому каскаду, что предопределяет высокие коэффициенты усиления ТГц излучения на переходах между подзонами двумерных электронов в квантовых ямах. Эти лазеры демонстрируют высокую эффективность – до единиц процентов, высокие рабочие температуры – до 150 К, непрерывный режим генерации, относительно низкое потребление энергии. К сожалению, серьезным недостатком каскадных лазеров являются ограничения, накладываемые микроскопическими размерами активной среды (типичные толщины структур не превышают 10-15 мкм), что предопределяет высокие потери длинноволнового излучения в субволновых резонаторах, не позволяет сформировать узкую диаграмму направленности выходного излучения, необходимую для использования данных устройств во многих оптических схемах. Продвижение арсенид-галлиевых каскадных лазеров в длинноволновую область ТГц спектра ограничено ростом потерь излучения в резонаторе и поглощением излучения свободными электронами, а в высокочастотную часть ТГц спектра - полярным решеточным поглощением.

Значительный интервал частот от 5 ТГц до 10 ТГц, остается до настоящего времени недоступным для полупроводниковых источников стимулированного излучения.

В данной диссертационной работе исследуется альтернативный подход к разработке лазеров ТГц диапазона частот на базе элементарных полупроводников. Он использует оптические переходы между локализованными состояниями водородоподобных примесных центров в кремнии, германии, кремний-германиевых соединениях. Кремний и германий характеризуются низким уровнем оптических потерь в указанном спектральном диапазоне, высокой теплопроводностью, технологичностью и наиболее высоким для полупроводников уровнем контроля дефектов и вводимых примесей, включая водородоподобные центры. Такие центры давно являются объектами разностороннего изучения. Однако большинство работ было посвящено исследованию спектров локализованных состояний в равновесных условиях, спектроскопии примесного поглощения

(см., например, обзор [3]), влиянию примесных центров на электропроводность полупроводников и связанные с этим проблемы захвата свободных носителей заряда на кулоновские центры [4]. Возможность создания полупроводниковых лазеров ТГц диапазона частот на основе внутрицентровых переходов, характеризующихся высокими значениями сил осциллятора и длинными по сравнению с состояниями подзон временами жизни, представляет значительный интерес как с чисто фундаментальной точки зрения, так и с позиции их потенциального интегрирования в цепях современных оптоэлектронных устройств [5]. В последнее время изучение примесных центров в кремнии снова вызвало повышенный интерес в связи со значительными успехами в технологии получения кристаллов кремния с высоким уровнем обогащения отдельными изотопами: ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si [6]. В таких кристаллах наблюдаются предельно узкие линии примесного поглощения, ширина которых определяется временем жизни возбужденных состояний центров. Другим стимулом исследований является принципиальная возможность разработки элементов памяти в квантовых компьютерах на основе моноизотопного кремния [7].

Все вышесказанное ставит новые задачи исследования физики неравновесных состояний доноров и акцепторов при их оптическом и полевым возбуждении и последующей релаксации при электрон-фононном взаимодействии. Таким образом, изучение эффектов стимулированного излучения примесными центрами в кремнии, германии и соединениях на их основе, которые определяются особенностями внутрицентровых процессов распада состояний, представляется актуальной задачей в связи с развитием новых устройств кремниевой оптоэлектроники.

Цель диссертационной работы

1. Экспериментальное исследование неравновесных населенностей состояний мелких доноров и акцепторов в полупроводниках кремнии и германии, а также соединениях на их основе в условиях электронного и оптического возбуждения.
2. Обнаружение эффектов и исследование характеристик стимулированного излучения на переходах между состояниями мелких примесных центров в кремнии и германии в условиях оптического и полевого возбуждения инверсной заселенности.

3. Идентификация рабочих переходов и анализ условий наблюдаемого в эксперименте терагерцового стимулированного излучения в кремнии, легированном водородоподобными донорными центрами.
4. Экспериментальное исследование эффектов вынужденного комбинационного рассеяния инфракрасного излучения на донорах V-й группы в кремнии.
5. Измерение малосигнального коэффициента терагерцового усиления / поглощения на межподзонных переходах валентной зоны германия в скрещенных электрическом и магнитном полях в зависимости от типа акцепторных центров.
6. Отработка методики низкотемпературной (< 20 К) внутрирезонаторной спектроскопии для измерения малых коэффициентов поглощения терагерцового излучения (3-4 ТГц) с использованием лазера на *p*-германии.

Научная новизна

1. Получена и экспериментально исследована генерация излучения терагерцового диапазона частот при вынужденном комбинационном рассеянии (стоксов процесс) инфракрасного излучения донорами V-й группы периодической системы (фосфор P, сурьма Sb, мышьяк As, висмут Bi) в монокристаллическом кремнии.
2. Получено и экспериментально исследовано стимулированное терагерцовое излучение на дипольно-разрешенных переходах между возбужденными состояниями доноров V-й группы при оптической накачке инверсной заселенности этих состояний. Установлены рабочие состояния и специфика лазеров, легированных различными центрами.
3. Экспериментально обнаружен эффект переключения частот (рабочих переходов) стимулированного излучения, связанного с инверсной заселенностью состояний водородоподобных доноров в кремнии, при изменении энергии кванта оптической накачки.
4. Экспериментально доказано наличие различных каналов внутрицентральной релаксации неравновесных носителей, захваченных на донорный кулоновский центр.
5. Установлено влияние внешних электрических (Si:P) и магнитных полей (Si:P, Si:Bi) и давления, приложенного к кристаллу (Si:As,

Si:P), на механизмы и эффективность стимулированного терагерцового излучения в кремнии.

- Показана зависимость малосигнального коэффициента усиления в лазере на межподзонных переходах валентной зоны германия в Фарадеевской конфигурации скрещенных электрического и магнитного полей от типа акцепторных центров. При оптимальных значениях концентрации легирующих центров коэффициент усиления ТГц излучения в германии, легированном бериллием, составляет $0,02 \text{ см}^{-1}$ и превышает полученный в германии при его легировании галлием, почти в два раза.

Практическая значимость

- Полученные результаты по эффектам стимулированного излучения доноров V-й группы в кремнии показывают новые возможности развития полупроводниковых лазеров терагерцового диапазона частот на основе примесных центров.
- Полученные результаты по временам релаксации возбужденных состояний доноров важны для разработки новых устройств на основе мелких доноров в кремнии, в частности, квантовых компьютеров на базе моноизотопного электронного кремния.

Основные положения, выносимые на защиту

- Комбинационное рассеяние инфракрасного излучения на локализованных состояниях доноров V-й группы (Sb, P, As, Bi) при низких температурах решетки в кремнии приводит к стоксовому процессу стимулированного излучения терагерцового диапазона частот. Стоксов сдвиг частоты определяется энергией внутрицентрового $1s(A_1)-1s(E)$ перехода между основным и возбужденным состояниями $1s$ мультиплета.
- Фотоионизация доноров V-й группы в кремнии при низких температурах решетки приводит к инверсной заселенности состояний и терагерцовому стимулированному излучению на внутрицентровых $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$ переходах в Si:Sb, на $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$, $1s(E)$ переходах в Si:As и на $2p_{\pm} \rightarrow 1s(E)$, $1s(T_2;\Gamma_8)$, $1s(T_2;\Gamma_8)$ переходах в Si:Bi.
- Рабочие уровни терагерцовых внутрицентровых кремниевых лазеров (Si:Bi, Si:Sb, Si:As), как нижние $1s(E)$, $1s(T_2)$, так и

- верхние $2p_0, 2p_{\pm}, 3p_0, 4p_0$, переключаются при изменении энергии кванта накачки.
4. Инверсная заселенность состояний оптически возбуждаемых доноров при низких температурах решетки в кремнии контролируется внутримолекулярными и междолинными переходами электронов при излучении акустических (Si:P, Si:Sb, Si:As) и оптических (Si:Bi) фононов. Специфика внутрицентровой релаксации конкретного донора определяется химическим сдвигом энергии связи основного состояния центра.
 5. Частота кремниевых Si:Bi лазеров, использующих внутрицентровые переходы $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$, $2p_{\pm} \rightarrow 1s(E)$, непрерывно перестраивается магнитным полем в соответствии с линейным эффектом Зеемана. Для лазеров с рабочим переходом $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$ магнитное поле не меняет частоты стимулированного излучения по крайней мере до 2 Тесла.
 6. Установлено, что механизм, связанный с поглощением на примесно-зонных переходах, приводит к существенному уменьшению результирующего коэффициента усиления ТГц излучения в лазерах на межподзонных переходах валентной зоны в дырочном германии.

Апробация результатов работы

Основные результаты данной диссертационной работы представлялись в 87 докладах на следующих конференциях, совещаниях и симпозиумах:

- XII *Всесоюзная конференция по физике полупроводников* (Киев, 1990);
- II *Всероссийский симпозиум по нелинейным и когерентным эффектам во внутримолекулярной лазерной спектроскопии* (Ленинград, 1991);
- I, III, V, VI, VII, VIII, IX *Российские конференции по физике полупроводников* (Нижний Новгород I РКФП 1993; Москва III РКФП 1997; Нижний Новгород - Казань V РКФП 2001; Санкт-Петербург VI РКФП 2003; Звенигород VII РКФП 2005; Екатеринбург VIII РКФП 2007; Новосибирск - Томск IX РКФП 2009);
- *Всероссийское Совещание "Наноструктуры на основе кремния и германия"* (Нижний Новгород, 1998);

- *Всероссийское Совецание "Нанофотоника"* (Нижний Новгород, 2000);
- IX, XII, XIV *Ежегодные Симпозиумы "Нанофизика и наноэлектроника"* (Нижний Новгород, 2005; 2008);
- 24th, 26th, 28th *International Conferences on Physics of Semiconductors* (Jerusalem, Israel, ICPS 1998; Edinburgh, UK, ICPS 2002; Vienna, Austria, ICPS 2006);
- 9th, 10th *International Conferences on Shallow-level centers in semiconductors* (Hyogo, Japan, SLCS 2000; Warsaw, Poland, SLCS 2002);
- 21st, 25th *International Conferences on Defects in Semiconductors* (Giessen, Germany, ICDS 2001; Санкт-Петербург ICDS 2009);
- 16th, 18th, 26th, 27th, 28th *International Conferences on Infrared and Millimeter Waves* (Lausanne, Switzerland, IRMMW 1991; Colchester, GB, IRMMW 1993; Toulouse, France, IRMMW 2001; San Diego, USA, IRMMW 2002; Otsu, Japan, IRMMW 2003);
- *the International Conference on Infrared and Millimeter Waves and Applications* (San Diego, USA, 1994);
- II *International Conference on Terahertz Spectroscopy and Applications* (Munich, Germany, 1999);
- 7th *International Conference on Hot Carriers in Semiconductors* (Nara, Japan, HCIS 1991);
- *the International Terahertz Workshop* (Sandbjerg Estate, Denmark, ITW 2000);
- 13th *International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors* (Modena, Italy, NCDS 2003);
- *the NATO Advanced Research Workshop "Towards the first silicon laser"* (Trento, Italy, 2002);
- 6th, 7th *International Symposiums "Nanostructures: Physics and Technology"* (Санкт-Петербург 1998; 1999);
- 10th, 11th *IEEE International Conferences on Terahertz Electronics* (Cambridge, UK, 2002; Sendai, Japan, 2003);
- 6th, 7th, 9th *Symposiums of IEEE/LEOS, Benelux Chapter* (Brussels, Belgium, 2001; Amsterdam, The Netherlands, 2002; Gent, Belgium, 2004);
- *Annual FOM Condensed Matter Conference* (Veldhoven, The Netherlands, 2001);
- 11th, 12th *International Conferences on Phonon Scattering in Condensed Matter* (Санкт-Петербург, 2004; Paris, France, 2007);

- *Joint 29th, 31st, 32nd, 33rd, 34th International Conferences on Infrared and Millimeter Waves and 12th, 14th, 15th, 16th, 17th International Conferences on Terahertz Electronics* (Karlsruhe, Germany, IRMMW-THz 2004; Shanghai, China; IRMMW-THz 2006, Cardiff, Wales, IRMMW-THz 2007; Pasadena, California, USA, IRMMW-THz 2008; Busan, Korea, IRMMW-THz 2009);
- *the International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources* (Rathen, Germany, 2005);
- *35th Workshop of the International School of Solid State Physics: Physics and Technology of THz Photonics* (Erice, Italy, 2005);
- *the Rank-Prize Funds Mini-Symposium on Si-based Optoelectronics* (Windermere, UK, 2006);
- *the E-MRS IUMRS ICEM Spring Meetings: 2006, Symposium D “Silicon-based Photonics”* (Nice, France, 2006), 2008, *Symposium C “Frontiers in silicon-based photonics”* (Strasbourg, France, 2008);
- *III SPIE Conference on Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy* (Orlando, USA, 2006);
- *the Joint Conference on Laser and Opto-Electronics (CLEO 2006) and the Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS 2006)* (Long Beach, USA);
- *12th International Conference on High Pressure Semiconductor Physics* (Barcelona, Spain, 2006);
- *XII International Conference “Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology”* (Erice, Italy, GADEST 2007);
- *the Material Research Society (MRS) Fall Meetings* (Boston, MA, USA 2007; 2009);
- *21st IEEE International Semiconductor Laser Conference* (Sorrento, Italy, ISLC 2008);
- *5th IEEE International Conference on Group IV Photonics* (Sorrento, Italy, GPF 2008);
- *2nd, 4th International Conferences on Advanced Optoelectronics and Lasers* (Ялта, Україна, CAOL 2005; Алушта, Україна, CAOL 2008);
- *the International Workshop “THz Radiation: Basic Research and Applications”* (Алушта, Україна, TERA 2008);
- *the Annual Meeting 2008 of the Scientific European Optical Society* (Paris, France, EOSAM 2008);
- *16th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures* (Montpellier, France, EDISON 2009);

- *the NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications* (Turunç-Marmaris, Turkey, TERA–MIR 2009);

- а также в Институте исследований планет Немецкого аэрокосмического центра в Берлине (Institut für Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Berlin, Germany), и 1-ом Физическом Институте Штутгартского университета (1. Physikalisches Institut, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany).

Представленные в диссертационной работе исследования выполнялись в рамках проектов 93-02-14661-а, 96-02-00249-ННИО-а, 96-02-19275-а, 99-02-17958-а, 00-02-04010-ННИО-а, 02-02-16790-а, 03-02-04010-ННИО-а, 05-02-16734-а РФФИ, РФФИ-ННИО, Президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-419.2008.2 «Фундаментальные научные проблемы развития кремниевой оптоэлектроники и освоения терагерцового диапазона с использованием полупроводниковых наноструктур».

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 50 статьях в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах и в 84 трудах и тезисах конференций. Список основных трудов автора по теме диссертации приведен в конце автореферата, полный список трудов автора по теме диссертации приведен в диссертации.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты исследований получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя в постановку задачи и проведение измерений является определяющим в работах по первому наблюдению стимулированного ТГц излучения на основе вынужденного электронного комбинационного рассеяния света в монокристаллическом кремнии, легированном донорами V-й группы периодической системы элементов [A35, A37, A49, A52, A57] в моноизотопном кремнии [A53]; в работах по первому наблюдению стимулированного ТГц излучения на переходах между

локализованными состояниями доноров в монокристаллическом кремнии, легированном висмутом [A17, A19, A21], сурьмой [A20, A22], мышьяком [A28], и поликристаллическом кремнии [A45, A48], легированном фосфором; в работах по наблюдению ТГц излучения из кремния, легированного междоузельными центрами I-й и II-й группы периодической системы [A46], кремний-германиевых монокристаллических сплавов [A47]; при анализе значений энергий связи четных возбужденных состояний доноров в кремнии [A39], при исследовании температурного режима кремниевых лазеров [A56]; в работах, посвященных определению влияния внешних магнитного [A36] и электрического полей [A60] на функциональность кремниевых лазеров; в работах по исследованию влияния примесного поглощения на усиление ТГц излучения в *p*-Ge:Be и *p*-Ge:Ga лазерах [A16]. Соискателю принадлежит основная роль в проведении экспериментов и в интерпретации полученных результатов по идентификации долгоживущего возбужденного состояния донорных центров в Si:P [A12]; определению порогов, спектров излучения и реализованных лазерных схем в условиях внутрицентрового возбуждения доноров в кремнии [A26]; влиянию одноосной деформации Si:As кристалла [A36] и магнитного поля (Si:Bi, Si:P) [A42] на функциональность кремниевых лазеров; в определении каналов внутрицентральной релаксации в Si:As [A50]. Работы [A25, A38, A40, A59] выполнены соискателем без соавторов. В остальных работах вклад соавторов равноправен. Это касается обнаружения эффектов внутрицентрового стимулированного излучения в *p*-Ge:Ga лазерах, включая исследование влияния одноосной деформации кристалла на внутрицентровое излучение *p*-Ge:Ga лазера [A1-A8]; использования техники внутрирезонаторной спектроскопии на основе ТГц *p*-Ge:Ga лазера [A9, A10]; обсуждения возможных схем усиления/генерации ТГц излучения и экспериментальных исследований по поиску усиления ТГц излучения в объемном кремнии [A11, A14, A18, A23, A24, A27, A29-A34, A41, A43, A55, A58] и низкоразмерных полупроводниках при оптическом [A15, A47] и полевым возбуждении [A54] примесных центров; исследовании усиления ТГц излучения в *p*-Ge:Ga лазерах [A13]; экспериментальном измерении времен жизни возбужденных состояний примесных центров [A44, A51].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 6 глав, введения и заключения. Общий объем 217 страниц, включая 158 рисунков и 13 таблиц. Список литературы автора содержит 134 наименования, цитируемой литературы - 193 наименования.

Содержание работы

Актуальность работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, вклад автора в представленный цикл работ и апробация результатов приведены во **Введении**.

Первая глава содержит обзор литературы по тематике работы с акцентом на спектры локализованных состояний мелких доноров и спектры фононов в кремнии, германии и кремний-германиевых сплавах – основы для построения активных материалов на базе легированных элементарных полупроводников. Приводятся теоретические представления о доминирующих механизмах внутрицентральной релаксации при низких температурах решетки, кратко обсуждаются вопросы формирования неравновесных распределений носителей заряда в полупроводниках. Из анализа широкого спектра экспериментальных результатов, дающих оценки времен внутрицентральной релаксации в кремнии и германии, и их сравнения с теоретически рассчитанными делается вывод о важности экспериментальной верификации различных методов описания внутрицентральной релаксации в полупроводниках.

Вторая глава посвящена исследованиям терагерцовых кремниевых лазеров на переходах между возбужденными состояниями мелких доноров в кремнии при их оптической накачке излучением лазеров среднего ИК диапазона – CO₂ лазеров (Рис. 1-3) и частотно-перестраиваемым инфракрасным лазером на свободных электронах, ИК ЛСЭ, FELIX (Рис. 3), при низких температурах решетки (< 5°K).

Разделы 2.1, 2.2 посвящены вопросам изготовления кремниевых кристаллов и образцов, и технике эксперимента. Для исследований германиевых лазеров был использован промышленный германий, в то время как исследование кремниевых лазеров и кремний-германиевых источников излучения потребовало значительной

технологической поддержки, в том числе разработку новых методов роста и легирования полупроводников.

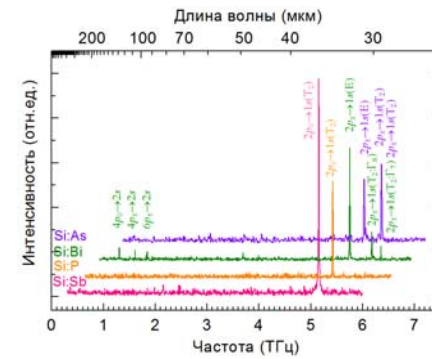


Рис. 1. Спектры ТГц кремниевых лазеров при накачке излучением CO₂ лазера (10,6 мкм), при 4,2 К.

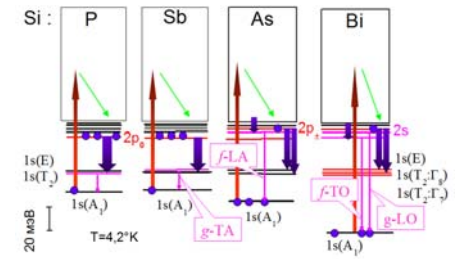


Рис. 2. Реализованные схемы ТГц внутрицентровой генерации в кремнии при накачке CO₂ лазером (10,6 мкм), при 4,2 К.

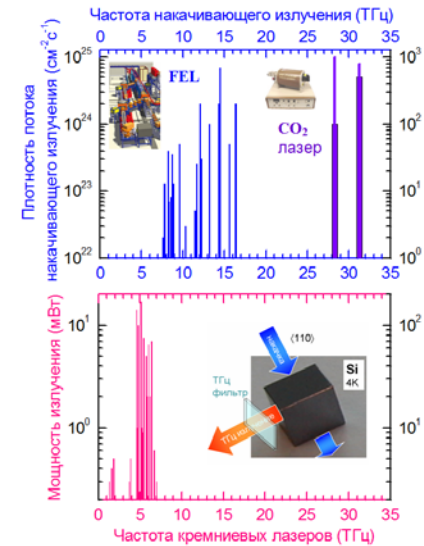


Рис. 3. Вверху: оптические пороги реализованных внутрицентровых кремниевых лазеров при накачке излучением ИК ЛСЭ и CO₂ лазера. Внизу: мощности импульсов выходного излучения кремниевых лазеров. Вставка: типичная геометрия возбуждения кремниевых лазеров.

В разделе 2.3 обсуждаются механизмы поглощения и внутрицентрового усиления ТГц излучения в кремнии, кратко формулируются теоретические предсказания усиления ТГц излучения с указанием ожидаемых схем генерации и условий наблюдения стимулированного излучения.

В следующих разделах (2.4-2.6) внимание концентрируется на достигнутых схемах генерации ТГц излучения: приводятся оптические пороги генерации для схем лазеров при резонансной накачке в различные возбужденные состояния донорных центров, приводятся спектры излучения лазеров, динамика лазерного излучения, а также температурные (Рис. 4) и концентрационные (Рис. 5) границы эффекта ТГц стимулированного излучения.

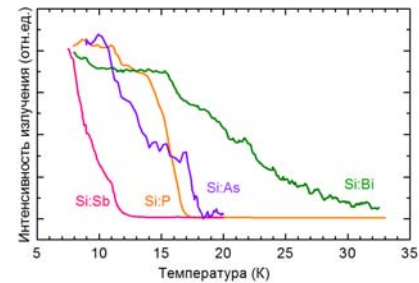


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения кремниевых лазеров от равновесной температуры решетки, для различных доноров; фотоионизация, длина волны излучения накачки 10,6 мкм.

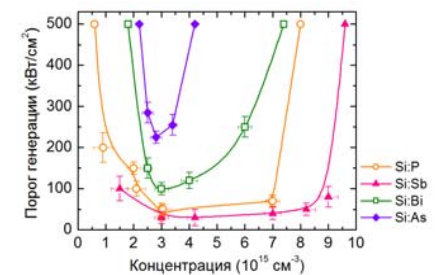


Рис. 5. Зависимости порога внутрицентральной ТГц генерации из электронного кремния для различных доноров; фотоионизация, длина волны излучения накачки 10,6 мкм, при 4,2 К.

Экспериментально обнаруженные лазерные схемы и их характеристики качественно отличаются от теоретически предсказанных, что подтверждает важность таких исследований для верификации моделей внутрицентральной релаксации электронов в кремнии. Обнаружены новые схемы генерации в Si:As и Si:Bi, свидетельствующие о доминирующем влиянии примесно-фононных резонансов и междолинных фононов во внутрицентральной релаксации и формировании инвертированных распределений в оптически накачиваемых кремниевых средах.

Исследуется влияние упругого и неупругого рассеяния фононов на стимулированное излучение в различных кремниевых матрицах, легированных фосфором (часть 2.5). Различные характеристики лазеров (оптические пороги, температурные режимы, спектры и динамика стимулированного излучения) сравниваются для случаев изотопно-обогащенной монокристаллической ($c\text{-}^{28}\text{Si:P}$) матрицы, природного многоизотопного монокристаллического ($c\text{-Si:P}$) и поликристаллического ($mc\text{-Si:P}$) кремния. Установлено различие в температурных режимах и порогах генерации таких лазеров.

В разделе 2.6 приводятся результаты наблюдения усиления ТГц излучения для образцов кремния, легированного междуузельными мелкими донорными центрами I-ой и II-ой группы. Показано, что наблюдаемое усиление ТГц излучения в Si:Mg , накачиваемом излучением CO_2 лазера, значительно превосходит аналогичные значения, полученные для водородоподобных доноров в кремнии.

В разделе 2.7 исследуется влияние стационарных внешних магнитного и электрического полей на функциональность кремниевых лазеров. Установлен диапазон перестройки частоты кремниевого Si:Bi лазера с магнитным полем в результате линейного эффекта Зеемана для возбужденных примесных уровней. Показано, что статическое электрическое поле подавляет внутрицентровую инверсию в оптически накачиваемых Si:P лазерах. Исследовано влияние одноосной деформации кристалла кремния на схемы и эффективность Si:As и Si:P лазеров.

Раздел 2.8 посвящен исследованию потерь ТГц излучения в оптически накачиваемых кремниевых активных средах. Потери измерены на частотах 2,5 ТГц и 3,1 ТГц непрерывных каскадных лазеров. Из анализа данных выносятся заключения о существенном влиянии на потери ТГц излучения в кремниевых лазерах т.н. D^- центров (нейтральный центр D^0 со слабо связанным дополнительным внешним электроном), концентрации которых остаются существенными вплоть до значений плотностей потоков фотонов накачки, соответствующих лазерной генерации.

Раздел 2.9 рассматривает эффекты стимулированного ТГц излучения в кремнии при внутрицентровом возбуждении доноров. Показано, что резонансное внутрицентровое возбуждение доноров в кремнии является эффективным способом накачки (наиболее низкий оптический порог, $\sim 10^{22}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, см. Рис. 3), и обеспечивает разнообразные схемы лазеров (Рис. 6). Существенное уменьшение

значений оптических порогов обеспечивается несколькими факторами: во-первых, уменьшением концентраций D^- центров и связанных с ними потерь ТГц излучения, а также отсутствием канала захвата электронов на D^0 центры; во-вторых, увеличением эффективности накачки вследствие больших сечений поглощения. Анализ различных схем лазеров для Si:P и Si:Sb, накачиваемых резонансно в различные возбужденные состояния (Рис. 6), позволяет сделать вывод о доминирующем влиянии междолинного акустического фонона g-TA в релаксацию возбужденного $1s(E)$ состояния в Si:Sb. Данный эффект объясняется резонансом пары состояний донора сурьмы, $1s(E)$ и $1s(A_1)$, с междолинным g-TA фононом. В результате $1s(E)$ состояние выступает в качестве нижнего рабочего лазерного уровня в Si:Sb, в то время как нижний лазерный уровень в Si:P – почти всегда состояние $1s(T_2)$.

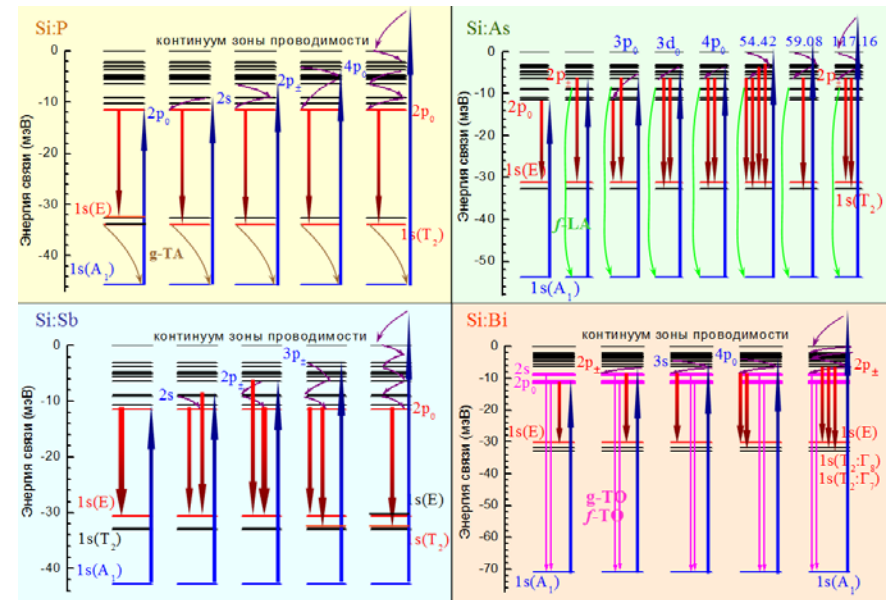


Рис. 6. Обзор различных схем генерации ТГц излучения (толстые вертикальные стрелки вниз), полученных для различных доноров при их резонансном внутрицентровом возбуждении излучением ИК ЛСЭ (вертикальные стрелки вверх). Тонкие стрелки показывают резонансные взаимодействия возбужденных и основного состояния центров с участием междолинных фононов.

Переключение лазерных схем с изменением верхнего лазерного уровня обнаружено для сред Si:Bi и Si:As, где отдельные возбужденные состояния примесного центра связаны резонансно с основным состоянием через взаимодействие с междолинными оптическими (f -TO, g -TO; случай Si:Bi) и междолинными акустическими (f -LA; случай Si:As) фононами.

Третья глава посвящена исследованиям стимулированного ТГц излучения на основе эффектов нелинейного преобразования частоты инфракрасного излучения в электронном кремнии.

Эффект вынужденного комбинационного рассеяния света на электронных резонансах мелких доноров в кремнии при накачке кремния фотонами энергий, соответствующих возбуждению в область энергий связи между значениями для возбужденных $3p_0$ и $2p_0$ состояний соответствующего центра, приводит к стимулированному ТГц излучению (Рис. 7, 8).

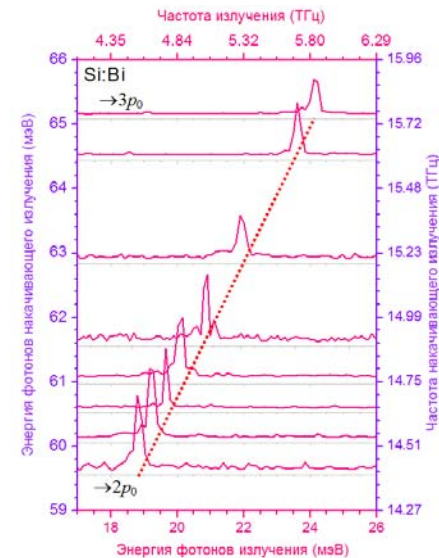


Рис. 7. Спектры стимулированного ТГц излучения из Si:Bi при внутрицентровом возбуждении. Точками показано смещение частоты стоксового излучения.

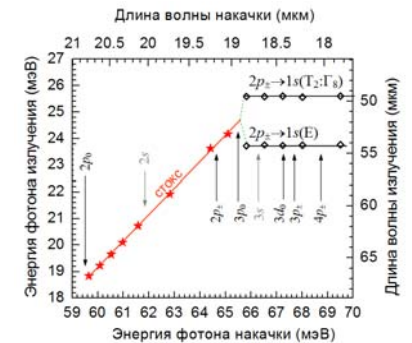


Рис. 8. Достигнутый диапазон генерации ТГц излучения в Si:Bi при накачке излучением ИК ЛСЭ, при 4,2 К.

Энергия фотонов стимулированного стоксового излучения $h\nu_S$ равна разнице энергий накачивающих фотонов $h\nu_L$ и энергии внутрицентрового электронного перехода $1s(E) \leftrightarrow 1s(A_1)$ (Рис. 8):

$$h\nu_S = h\nu_L - (E_{1s(A_1)} - E_{1s(E)}).$$

Стоксово излучение, как правило, имеет характерную задержку во времени, связанную с малым значением усиления по сравнению с излучением на локализованных состояниях донора. Это позволяет использовать временное разрешение при записи импульсов, а также спектров излучения и спектров накачки для разделения различных типов излучения. Одним из результатов временного разрешения явилось обнаружение конкуренции стоксового лазерного излучения и излучения на переходах между возбужденными состояниями примесного центра при резонансной накачке в возбужденные состояния донора. Это вызывает также сдвиг частоты «донорного» излучения относительно его невозмущенного значения.

Стимулированное стоксово излучение при вынужденном комбинационном рассеянии излучения на донорном электронном переходе $1s(E)-1s(A_1)$ обнаружено для всех водородоподобных донорных центров в кремнии (Рис. 9). Приводятся данные об оптических порогах генерации, спектральном анализе, временной динамике лазерного излучения. На примере Si:Sb показано, что оптимальная концентрация электрически активных центров для стимулированного стоксового излучения соответствует ее значению для кремниевых лазеров при фотоионизации (Рис. 4).

В кремниевых кристаллах, совместно легированных несколькими водородоподобными центрами, например двумя донорными центрами, фосфором и сурьмой (Si:Sb:P), наблюдается стимулированное стоксово излучение для обоих типов доноров.

Особое внимание уделено эффекту стимулированного излучения на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния света на электронном резонансе для изотопно-обогащенного (до уровня 99,99459 % ^{28}Si) монокристаллического кремния, легированного фосфором ($c\text{-}^{28}\text{Si:P}$). Отмечается существенное усиление эффективности и расширение спектрального диапазона стоксового излучения в моноизотопном $c\text{-}^{28}\text{Si:P}$ по сравнению с природным монокристаллическим кремнием ($c\text{-Si:P}$) (Рис. 10).

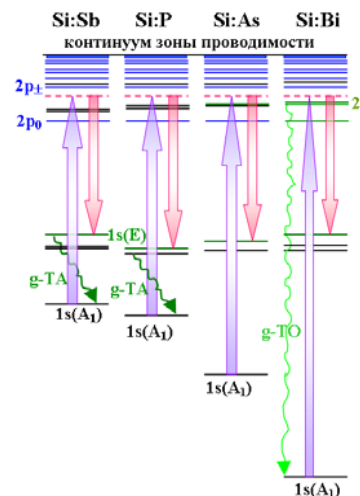


Рис. 9. Схемы стоксовых лазеров на основе электронного ВКРС в кремнии, легированном различными примесными центрами; при накачке излучением ИК ЛСЭ.

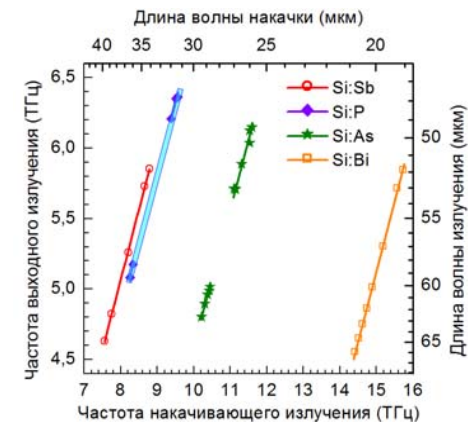


Рис. 10. Спектральные диапазоны в генерации ТГц излучения на основе электронного ВКРС в кремнии, легированном различными примесными центрами; при накачке ИК ЛСЭ.

В разделе 3.3 приводятся экспериментальные данные об обнаружении низкочастотного ТГц излучения из образцов Si:P при их накачке излучением ИК ЛСЭ, соответствующего формализму четырехволнового смешения частоты. Частота такого излучения отстроена от частоты накачки на суммарное значение энергии электронного примесного перехода $1s(E)-1s(A_1)$ и энергии междолинного поперечного акустического фоновина в кремнии, g -ТА или f -ТА. Данное излучение имеет самый высокий порог генерации из всех наблюдаемых лазерных схем и наблюдалось только для Si:P.

Лазеры на примесных переходах в дырочном германии, работающие в скрещенном электрическом и магнитном полях при низких равновесных температурах решетки ($< 20^\circ\text{K}$), рассматриваются в *четвертой главе* диссертации. Основное внимание уделяется сравнительному анализу эффективности p -Ge:Ga лазера, обладающего характерными линиями примесного излучения акцепторного центра (линии G и E на Рис. 11), и p -Ge:Be

лазера, для которого такие переходы при аналогичных условиях накачки не наблюдаются (Рис. 12).

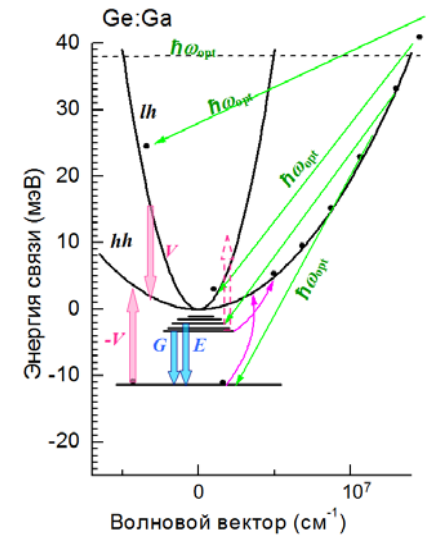


Рис. 12. Схема формирования населенностей на межподзонных состояниях и возбужденных состояниях в Ge:Ga. G , E – линии примесных переходов.

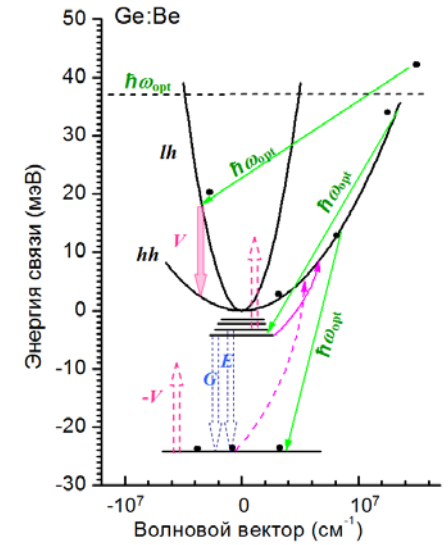


Рис. 13. Схема формирования населенностей на межподзонных состояниях в Ge:Be. Внутрицентровые переходы не инвертированы.

Механизмы поглощения и усиления ТГц излучения рассмотрены в разделе 4.1. Примесное поглощение может играть существенную роль при остаточной заселенности состояний акцептора. Раздел 4.2 посвящен генерации ТГц излучения на примесных переходах акцепторов III-й группы. Межподзonné переходы (V на Рис. 12, 13) являются характерной чертой всех ТГц p -Ge лазеров. Инверсия на примесных состояниях является следствием фотоионизации основного состояния водородоподобного акцептора излучением, развивающимся на межподзонных переходах, которое приводит к оголению основного состояния в Ge:Ga (Рис. 11), но не влияет на населенность основного состояния в Ge:Be (Рис. 12) с большей энергией фотоионизации. Участие носителей заряда, захваченных на состояния примесных центров, в поглощении ТГц излучения в p -Ge:Ga лазерах доказывается существованием примесных линий

генерации в спектрах излучения лазера, а также фотоионизационной составляющей тока.

Результаты измерений усиления ТГц излучения на межподзонных переходах (раздел 4.3, Табл. 1) показывают ограничения усиления, накладываемых примесным поглощением в *p*-Ge:Ga лазерах. Дополнительное примесное поглощение, вызванное фотоионизацией акцепторных состояний – цена существования излучательных примесных переходов в *p*-Ge:Ga лазерах.

Таблица 1. Усиление ТГц излучения на межподзонных переходах для ТГц *p*-Ge лазеров, легированных элементами III-й и II-й групп. Магнитное поле вдоль [110] (длинной) оси германиевого кристалла.

Активный элемент	длина усилителя, мм	$N_A - N_D$, см ⁻³	дырки, <i>p</i> , % от $N_A - N_D$	ТГц усиление, см ⁻¹	сечение ТГц усиления, см ²
Ge:Ga ГДГ40Д5	50,2	$7,0 \cdot 10^{13}$	90-95	0,012-0,015	$(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-16}$
Ge:Be #854	19,4	$1,5 \cdot 10^{14}$	40-50	0,021-0,027	$(3,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-16}$

В разделе 4.4 приведены результаты исследования влияния одноосной деформации кристалла германия на перестройку частоты излучения *p*-Ge:Ga лазеров на примесных переходах. Показано изменение частоты G-перехода в диапазоне давлений до 1350 кг/см².

Пятая глава посвящена особенностям внутрицентральной релаксации носителей заряда в кремнии и германии, установленных экспериментальными методами.

В разделе 5.1 рассмотрены проблемы экспериментального измерения времен релаксации внутрицентрального оптического возбуждения в электронном кремнии. К настоящему времени удалось лишь ограничить диапазон возможных времен релаксации интервалом 50-200 пкс.

Раздел 5.2 посвящен анализу результатов спектральных исследований кремниевых лазеров ТГц излучения при их внутрицентральной оптической накачке (Si:As, Si:P). Спектры накачки и излучения, наблюдаемые пороги генерации, и оценки сечений поглощений примесных переходов и времен жизни нескольких возбужденных состояний дают возможность

восстановить картину внутрицентральной релаксации в системе нижних возбужденных состояний примесного центра на примере Si:As лазера (Рис. 13). Это позволяет произвести оценки скоростей различных каналов релаксации. Показано, что резонанс с междолинным акустическим фононом f -LA усиливает релаксацию на переходе $2s(E) \rightarrow 1s(A_1)$ в Si:As. Переходы между состояниями одинаковой четности преобладают, даже при сравнении с переходами в соседние близлежащие состояния центра. Это доказывает наличие нескольких различных лестниц/каналов внутрицентральной релаксации в электронном кремнии. Данный вывод показывает необходимость учета различных параллельных независимых каналов релаксации вместо классической каскадной модели захвата на примесный центр. В конечном счете, множественность каналов релаксации определяет достигаемую эффективность кремниевых лазеров при фотоионизации доноров.

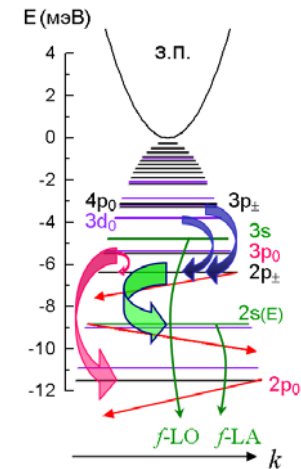


Рис. 14. Селективные каналы безызлучательной внутрицентральной релаксации в Si:As. Ширина стрелок пропорциональна рассчитанной скорости релаксационного процесса. Можно видеть, что отдельные шаги релаксации превышают предсказанные в каскадной модели.

В разделах 5.3-5.5 анализируются распределения носителей по локализованным возбужденным состояниям центра при оптической (для кремния) и электронной (для кремния и германия) накачке. Данный анализ приводится с сопоставлением экспериментально

наблюдаемым схемам лазерной генерации в электронном кремнии и дырочном германии. Обсуждается, в частности, влияние электрического поля на делокализацию верхних возбужденных состояний примесных центров, а также связанное с этим подавление оптически возбуждаемой инверсии в кремниевых лазерах. Для *p*-Ge лазеров совместное действие электронного и оптического возбуждения приводит при определенных условиях к инверсной населенности на уровнях акцепторов, достаточной для поддержания эффектов стимулированного внутрицентрового излучения.

Шестая глава обсуждает обнаруженное ТГц излучение и его усиление в легированных мелкими донорами кремний-германиевых соединениях: $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ монокристаллах (раздел 6.1) и неоднородных $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ структурах (раздел 6.2), при их оптическом возбуждении. Специальное внимание (раздел 6.3) уделено технике низкотемпературной внутрирезонаторной спектроскопии низкоразмерных полупроводниковых структур на основе ТГц *p*-Ge лазера с составной конструкцией резонатора. Показано, что сравнительно слабые, вплоть до 10^{-3} , модуляции ТГц поглощения в полупроводниковых структурах с небольшим числом квантовых слоев могут быть зафиксированы данной техникой.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы, выражаются благодарности соавторам, приводится список литературы автора и цитируемой литературы. В качестве главных **научных результатов** работы выносятся:

Основные научные результаты

1. Обнаружен и экспериментально исследован эффект стимулированного излучения терагерцового диапазона (4,5-6,4 ТГц) при вынужденном комбинационном рассеянии (стоксов процесс) инфракрасного излучения на локализованных состояниях доноров V-й группы (Sb, P, As, Bi) в кремнии. Показано, что стоксов сдвиг частоты определяется энергией внутрицентрового $1s(A_1)$ - $1s(E)$ перехода между основным $1s(A_1)$ и возбужденным состояниями $1s$ мультиплета. Этот параметр, также как и энергия основного состояния $1s(A_1)$, зависит от элемента легирования.

2. Получен и экспериментально исследован эффект стимулированного излучения оптически возбуждаемых доноров V-й группы в кремнии при охлаждении кристалла до температур $T < 15-30$ К. Наблюдаемое излучение лежит в терагерцовом диапазоне частот и развивается при фотоионизирующей накачке доноров на внутрицентровых $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$ переходах в Si:Sb, на $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$, $1s(E)$ переходах в Si:As и на $2p_{\pm} \rightarrow 1s(E)$, $1s(T_2:\Gamma_8)$, $1s(T_2:\Gamma_8)$ переходах в Si:Bi благодаря инверсной заселенности указанных электронных состояний. Определены оптимальный уровень легирования, пороговые значения интенсивности накачивающего излучения и температурный режим данных лазеров.
3. Исследовано ТГц стимулированное излучение донорных центров V-й группы (P, Sb, As, Bi) в кремнии при внутрицентровом оптическом возбуждении их состояний. Обнаружено, что при таком способе создания инверсной заселенности рабочая схема и соответствующая частота стимулированного излучения зависит от накачиваемого донорного возбужденного состояния, т. е. от энергии кванта оптической накачки, и отличается для разных центров.
4. Экспериментально установлено, что для доноров в кремнии при низкотемпературной релаксации на акустических фононах (внутридолинные переходы) состояния $3p_{\pm}$ и $3p_0$ с большей вероятностью релаксируют соответственно в $2p_{\pm}$ и $2p_0$ состояния, минуя промежуточные. В случае прямого возбуждения континуума зоны проводимости или более близких к нему связанных состояний доминирующий маршрут релаксации проходит через состояние $2p_{\pm}$. Такой вывод получен на основе данных о переключении рабочих переходов стимулированного излучения доноров мышьяка при изменении энергии кванта внутрицентральной оптической накачки.
5. Экспериментально показано, что внешнее магнитное поле перестраивает частоту стимулированного излучения в Si:Bi, рабочие переходы $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$, $1s(E)$. Дана количественная оценка такой перестройки. Магнитное поле вплоть до 2 Т не меняет частоты стимулированного излучения в Si:P, рабочий переход $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$.

6. Экспериментально показано, что внешнее электрическое поле при значениях ниже примесного пробоя в Si:P уменьшает инверсию населенностей между рабочими уровнями лазера, т.е. на переходе $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$, а в полях выше пробоя донорных центров полностью подавляет стимулированное излучение.
7. Экспериментально определена энергия связи четных возбужденных состояний $1s(E)$, $1s(T_2:\Gamma_8)$, $1s(T_2:\Gamma_7)$, $2s(E)$ доноров V-й группы в кремнии. Это сделано на основе анализа спектральных характеристик стимулированного излучения при резонансном внутрицентровом возбуждении этих центров с точностью определения энергии до 0,01 мэВ и уточняет существующие данные спектроскопии донорных центров.
8. Установлено, что поглощение на примесно-зонных переходах значительно уменьшает коэффициент усиления в лазерах на межподзонных переходах дырок валентной зоны германия в Фарадеевской конфигурации приложенных скрещенных электрического и магнитного полей. Измерения показали, что максимум коэффициента усиления для германия, легированного галлием, близок к $0,012 \text{ см}^{-1}$, но может быть увеличен в германии с бериллием до $0,02 \text{ см}^{-1}$. Различие связано с примесно-зонным поглощением межподзонного (10-13 мэВ) излучения в Ge:Ga, имеющего энергию связи основного состояния 11,32 мэВ в отличие от Ge:Be (энергия связи 24,22 мэВ), где данный механизм потерь ТГц излучения отсутствует.

Цитируемая литература:

1. Sensing with terahertz radiation. Ed. by Mittleman D.// Springer Series in Optical Sciences. Berlin. Springer. 2003. – Vol. 85. – 337 P.
2. Williams, B. S. Terahertz quantum-cascade lasers / Nature Photonics. – 2007. – Vol. 1. – P. 517-523.
3. Ramdas, A. K. Spectroscopy of the solid-state analogues of the hydrogen atom: donors and acceptors in semiconductors / A. K. Ramdas and S. Rodriguez // Rep. Prog. Phys. – 1981. – Vol. 44. – P. 1297-1387.
4. Абакумов, В. Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках / В. Н. Абакумов, В. И. Перель, И. Н. Ясиевич // Изд. «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН», СПб. 1997. – 376 С.

5. Borak, A. Towards bridging the terahertz gap with silicon-based lasers / *Science: Perspectives*. – 2005. – Vol. 308, No. 5722. – P. 638-639.
6. Девярых, Г. Г. Получение высокочистого моноизотопного кремния-28 / Г. Г. Девярых, А. Д. Буланов, А. В. Гусев, П. Г. Сенников, А. М. Прохоров, Е. М. Дианов, Х.-Й. Поль // Доклады РАН. Химия. – 2001. – Том 376, № 4-6. – С. 492-493.
7. Kane, B. E. A silicon-based nuclear spin quantum computer / *Nature*. – 1994. – Vol 393. – P. 133-137.

Список работ, в которых опубликованы основные результаты:

- A1. Муравьев, А. В. Стимулированное излучение на переходах между возбужденными и основным состояниями акцепторной примеси в германии / А. В. Муравьев, С. Г. Павлов, В. Н. Шагин // Письма в ЖЭФТ. – 1990. – Т. 52, вып. 6. – С. 959-964.
- A2. Демиховский, С. В. Перестройка спектра излучения лазера на р-Ge при одноосной деформации / С. В. Демиховский, А. В. Муравьев, С. Г. Павлов, В. Н. Шагин // ФТП. – 1990. – Т. 24, вып. 12. – С. 2151-2154.
- A3. Demihovsky, S. V. Stimulated emission using shallow acceptor states transitions in germanium / S. V. Demihovsky, A. V. Murav'ev, S. G. Pavlov, and V. N. Shastin // *Semicond. Sci. Technol.* – 1992. – Vol. 7, Issue 3B. – P. B622-B625.
- A4. Муравьев, А. В. Перестраиваемый узкополосный лазер на межподзонных переходах горячих дырок германия / А. В. Муравьев, И. М. Нефедов, С. Г. Павлов, В. Н. Шагин // *Квант. электроника*. – 1993. – Том 20, вып. 2. – С. 142-148.
- A5. Муравьев, А. В. Эффекты мелких акцепторов в лазере на горячих дырках германия / А. В. Муравьев, С. Г. Павлов, Е. Е. Орлова, В. Н. Шагин // Письма в ЖЭФТ. – 1994. – Том 59, вып. 2. – С. 86-90.
- A6. Муравьев, А. В. Конденсация спектра вблизи линии примесного поглощения в лазере на горячих дырках германия / А. В. Муравьев, С. Г. Павлов, Е. Е. Орлова, В. Н. Шагин, Б. А. Андреев // Письма в ЖЭФТ. – 1995. – Том 61, вып. 3. – С. 182-185.

- A7. Shastin, V. N. Influence of shallow acceptor states on the operation of the FIR hot hole p-Ge laser / V. N. Shastin, E. E. Orlova, A. V. Murav'ev, S. G. Pavlov, and R. Kh. Zhukavin // *Int. J. Infrared Milli. Waves.* – 1996. – Vol. 17, No. 2. – P. 359-361.
- A8. Shastin, V. N. Far-infrared hole absorption in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW heterostructures with δ -doped barriers / V. N. Shastin, S. G. Pavlov, A. V. Muravjov, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, and B. N. Zvonkov // *phys. stat. sol. (b).* – 1997. – Vol. 204, Issue 1. – P. 174-177.
- A9. Жукавин, Р. Х. Использование квантоворазмерных $\text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ гетероструктур для синхронизации мод в лазере дальнего инфракрасного излучения на p-Ge / Р. Х. Жукавин, А. В. Муравьев, С. Г. Павлов, А. Х. Ситдииков, В. . Шастин, О. А. Кузнецов // *Изв. АН, сер. физ.* – 1999. – Том 63, вып. 2. – С. 364-368.
- A10. Шастин, В. Н. Внутррезонаторная спектроскопия $\text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ гетероструктур в лазере дальнем ИК диапазоне длин волн / В. Н. Шастин, Н. А. Бекин, Р. Х. Жукавин, С. Г. Павлов, О. А. Кузнецов // *Изв. АН, серия физ.* – 1999. – Том 63, вып. 2. – С. 374-378.
- A11. Orlova, E. E. Far infrared active media based on the shallow impurity states transitions in silicon / E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, S. G. Pavlov and V. N. Shastin // *physica status solidi (b).* – 1998. – Vol. 210, Issue 2. – P. 859-863.
- A12. Hübers, H.-W. Population inversion and far-infrared emission from optically pumped silicon / H.-W. Hübers, K. Auen, S. G. Pavlov, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, and V. N. Shastin // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – Vol. 74, Issue 18. – P. 2655-2657.
- A13. Muravjov, A. V. Broad band p-Ge optical amplifier of terahertz radiation / A. V. Muravjov, S. H. Withers, S. G. Pavlov, V. N. Shastin, and R. E. Peale // *J. Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 86, Issue 7. – P. 3512-3515.
- A14. Pavlov, S. G. Stimulated emission from donor transitions in silicon / S. G. Pavlov, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, V. N. Shastin, A. V. Kirsanov, H.-W. Hübers, K. Auen, and H. Riemann // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 84, Issue 22. – P. 5220-5223.
- A15. Шастин, В. Н. Инверсия населенностей и усиление ТГц излучения при оптическом возбуждении кулоновских центров в гетероструктурах с квантовыми ямами / В. Н. Шастин, Р. Х.

- Жукавин, Е. Е. Орлова, С. Г. Павлов // Изв. АН, сер. физ. – 2001. – Том 65, Вып. 2. – С. 246-248.
- A16. Auen, K. Influence of group II and III shallow acceptors on the gain of p-Ge lasers / K. Auen, H.-W. Hübers, A. V. Muravjov, E. E. Orlova, S. G. Pavlov, V. N. Shastin and R. Kh. Zhukavin // *Physica B*. – 2001. – Vols. 302-303. – P. 334-341.
- A17. Hübers, H.-W. Terahertz emission from silicon doped by shallow impurities / H.-W. Hübers, S. G. Pavlov, M. H. Rümmeli, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, H. Riemann and V. N. Shastin // *Physica B*. – 2001. – Vols. 308-310. – P. 232-235.
- A18. Orlova, E. E. FIR lasing based on group V donor transitions in silicon / E. E. Orlova, S. G. Pavlov, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, A. V. Kirsanov, H.-W. Hübers, K. Auen, M. Rümmeli, H. P. Röser and H. Riemann // *Physica B*. – 2001. – Vols. 302-303. – P. 342-348.
- A19. Pavlov, S. G. Physics of optically pumped semiconductor bulk lasers for the 5-15 THz frequency range / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. H. Rümmeli, V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, and H. Nakata // 2001 Symposium of IEEE/LEOS Benelux Chapter: Symp. Proc., Ed. by H. Trienpont et al. Brussels, Belgium, 3 Dec. 2001. – Brussels: Vrije Universiteit Brussel Press. 2001. – P. 49-52.
- A20. Hübers, H.-W. Terahertz emission spectra of optically pumped silicon lasers / H.-W. Hübers, S. G. Pavlov, M. Greiner-Bär, M. F. Kimmitt, M. H. Rümmeli, R. Kh. Zhukavin, H. Riemann, and V. N. Shastin // *physica status solidi (b)*. – 2002. – Vol. 233, Issue 2. – P. 191-196.
- A21. Pavlov, S. G. Far-infrared stimulated emission from optically excited bismuth donors in silicon / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. H. Rümmeli, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, V. N. Shastin, and H. Riemann // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80, Issue 25. – P. 4717-4719.
- A22. Pavlov, S. G. Terahertz optically pumped Si:Sb laser / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, H. Riemann, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, and V. N. Shastin // *J. Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 92, Issue 10. – P. 5632-5634.
- A23. Shastin, V. N. Stimulated THz emission from group-V donors in silicon under intracenter photoexcitation / V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, S. G. Pavlov, M. H. Rümmeli, H.-W.

- Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, H. Riemann, I. V. Bradley, and A. F. G. van der Meer // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80, Issue 19. – P. 3512-3514.
- A24. Pavlov, S. G. Optically pumped terahertz semiconductor bulk lasers / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, H. Riemann, H. Nakata, and V. N. Shastin // *physica status solidi (b)*. – 2003. – Vol. 235, Issue 1. – P. 126-134.
- A25. Pavlov, S. G. Electrically pumped far-infrared population inversion in heterostructures doped by shallow impurity centers // *phys. stat. sol. (c)*. – 2003. – Vol. 0, Issue 2. – P. 726-729.
- A26. Pavlov, S. G. Terahertz silicon lasers: Intracenter optical pumping / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. H. Rummeli, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, R. Kh. Zhukavin, A. V. Muravjov, and V. N. Shastin // “Towards the First Silicon Laser”, Eds. L. Pavesi et al., NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Kluwer Academic Publishers. – 2003. – Vol. 93. – P. 331-340.
- A27. Zhukavin, R. Kh. Laser transitions under resonant optical pumping of donor centres in Si:P / R. Kh. Zhukavin, D. M. Gaponova, A. V. Muravjov, E. E. Orlova, V. N. Shastin, S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, H. Riemann, A. F. G. van der Meer // *Appl. Phys. B*. – 2003. – Vol. 76, No. 5. – P. 613-616.
- A28. Hübers, H.-W. Stimulated terahertz emission from arsenic donors in silicon / H.-W. Hübers, S. G. Pavlov, R. Kh. Zhukavin, H. Riemann, N. V. Abrosimov, and V. N. Shastin // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 84, Issue 18. – P. 3600-3602.
- A29. Nakata, H. Excitation spectroscopy of Si:P THz laser and infrared photoconductivity in Ge:Te / H. Nakata, A. Yokoyama, T. Hatou, T. Ohyama, N. Tsubouchi, S. G. Pavlov, H.-W. Hübers // *Joint 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics: Conf. Digest, 27 Sept. - 1 Oct. 2004. Karlsruhe, Germany. Eds. M. Thumm, W. Wiesbeck. IEEE Cat. No. 04EX857, 2004. – P. 507-508.*
- A30. Pavlov, S. G. Nonequilibrium electron distribution in terahertz intracenter silicon lasers / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin and V. N. Shastin // *Semicond. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 19, No. 4. – S465-S468.
- A31. Шастин, В. Н. Стимулированное излучение, вынужденное комбинационное рассеяние и инверсия населенности на внутрицентровых переходах доноров в кремнии / В. Н. Шастин,

- С. Г. Павлов, Р. Х. Жукавин, H.-W. Hübers, H. Riemann, Т. О. Klaassen, J. N. Hovenier, P. J. Phillips // "Полупроводники-2005": Тезисы докладов VII Российской конференции по физике полупроводников, Москва, 18-23 сент. 2005. – Москва: ФИ РАН им. П. Н. Лебедева. 2005. – С. 97.
- A32. Hübers, H.-W. Terahertz lasers based on germanium and silicon / H.-W. Hübers, S. G. Pavlov and V. N. Shastin // *Semicond. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 20, Special Issue 7: Photonic Terahertz Technology. – P. S211-S221.
- A33. Hübers H.-W. Spectroscopy of excited states in p-type germanium with coherent terahertz synchrotron radiation / H.-W. Hübers, S. G. Pavlov, K. Holldack, P. Kuske, U. Schade, G. Wüstefeld // *Int. Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources: Abstracts Book*, Rathen, Germany. 26-30 June 2005. – P.135.
- A34. Zhukavin R. Kh. D⁰ centers in intracenter Si:P lasers / R. Kh. Zhukavin, S. G. Pavlov, K. A. Kovalevsky, H.-W. Hübers, H. Riemann, and V. N. Shastin // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 97. Issue 11. – P. 113708.
- A35. Pavlov, S. G. Stimulated terahertz Stokes emission of silicon crystals doped with antimony donors / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, D. A. Carder, P. J. Phillips, B. Redlich, H. Riemann, R. Kh. Zhukavin, and V. N. Shastin // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96, Issue 3. – P. 037404.
- A36. Pavlov, S. G. Frequency tunability of the terahertz silicon laser by a magnetic field / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. F. Kimmitt, H. Riemann, and V. N. Shastin // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89, Issue 2. – P. 021108.
- A37. Pavlov, S. G. Silicon donor and Stokes terahertz lasers / S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, H. Riemann, N. V. Abrosimov, N. Nötzel, R. Kh. Zhukavin and V. N. Shastin // *J. of Luminescence.* – 2006. – Vol. 121, Issue 2. – P. 304-310.
- A38. Pavlov, S. G. Impurity-based infrared emitters in silicon // «Si-based Optoelectronics»: Abstracts of the Rank-Prize Funds Mini-Symposium, Storrs Hall Hotel, Windermere, Cumbria, UK. 3-6 April 2006. – P. 37.
- A39. Павлов, С. Г. Определение энергии ионизации возбужденных состояний донорных центров в кремнии из спектров накачки и излучения терагерцовых кремниевых лазеров //

- «Полупроводники-2007»: Тезисы VIII Российской конференции по физике полупроводников, Екатеринбург, 30 сент. – 5 окт. 2007 – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. 2007. – С. 342.
- A40. Pavlov, S. G. Intracenter Raman silicon lasers // *Laser Physics*. – 2007. – Vol. 17, No. 8. – P. 1037-1040.
- A41. Zhukavin, R. Kh. Influence of uniaxial stress on stimulated terahertz emission from phosphor and antimony donors in silicon / R. Kh. Zhukavin, V. V. Tsyplenkov, K. A. Kovalevsky, V. N. Shastin, S. G. Pavlov, U. Böttger, H.-W. Hübers, H. Riemann, N. V. Abrosimov, and N. Nötzel // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 90, Issue 5. – P. 051101.
- A42. Pavlov, S. G. Low-threshold terahertz Si:As laser / S. G. Pavlov, U. Böttger, H.-W. Hübers, R. Kh. Zhukavin, K. A. Kovalevsky, V. V. Tsyplenkov, V. N. Shastin, N. V. Abrosimov and H. Riemann // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 90, Issue 14. – P. 141109.
- A43. Zhukavin, R. Kh. Terahertz gain on shallow donor transitions in silicon / R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, and A. F. G. van der Meer // *J. Appl. Phys.* – 2007. – Vol. 102, Issue 9. – P. 093104.
- A44. Шастин, В. Н. Времена жизни локализованных состояний мелких доноров в кремнии / В. Н. Шастин, Р. Х. Жукавин, В. В. Цыпленков, С. Г. Павлов, H.-W. Hübers, P. J. Phillips // «Нанозфизика и нанозлектроника»: Материалы XII ежегодного симпозиума, 10-14 марта 2008, Нижний Новгород. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2008. – Том 1. – С. 182-185.
- A45. Pavlov, S. G. Mono- and polycrystalline silicon for terahertz intracenter lasers / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, N. V. Abrosimov, and H. Riemann // *Solid State Phenomena*. – 2008. – Vols. 131-133. – P. 579-582.
- A46. Abrosimov, N. V. Silicon doped with lithium and magnesium from the melt for terahertz laser application / N. V. Abrosimov, N. Nötzel, H. Riemann, K. Irmscher, S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, U. Böttger, P. M. Haas, N. Drichko, and M. Dressel // *Solid State Phenomena*. – 2008. – Vols. 131-133. – P. 589-593.
- A47. Pavlov, S. G. Terahertz emission from phosphor centers in SiGe and SiGe/Si semiconductors / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, N. V. Abrosimov, H. Riemann, H. H. Radamson, N. A. Bekin, A. N. Yablonsky, R. Kh. Zhukavin, Yu. N. Drozdov and V. N. Shastin // *Solid State Phenomena*. – 2008. – Vols. 131-133. – P. 613-618.

- A48. Pavlov, S. G. Multi-crystalline silicon as active medium for terahertz intracenter lasers / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, N. V. Abrosimov, H. Riemann, L. V. Gavrilenko and A. V. Antonov // *Physica B.* – 2008. – Vol. 403, Issue 4. – P. 535-538.
- A49. Pavlov, S. G. Terahertz Raman laser based on silicon doped with phosphorus / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, U. Böttger, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, J. N. Hovenier, B. Redlich, N. V. Abrosimov, and H. Riemann // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92, Issue 9. – P. 091111.
- A50. Pavlov, S. G. Evidence of noncascade intracenter electron relaxation in shallow donor centers in silicon / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, P. M. Haas, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, D. A. Carder and B. Redlich // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 78, Issue 16. – P. 165201.
- A51. Pavlov, S. G. Relaxation of upper laser levels in terahertz silicon lasers / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, R. Kh. Zhukavin, P. J. Phillips, D. A. Carder, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen and V. N. Shastin // *IEEE Int. Conf. on Group IV Photonics 2008: Conf. Abstracts, Sorrento, Italy, 17-19 Sept. 2008.* – P. 27-28.
- A52. Pavlov, S. G. Stimulated terahertz emission due to nonlinear frequency conversion in silicon / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, U. Böttger, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, J. N. Hovenier and B. Redlich // "THz Radiation: Basic Research and Applications": *Proc. of the Int. Workshop, Alushta, Crimea, Ukraine, 2-4 Oct. 2008.* – IEEE Catalog No # CFP0893E-CDR. 2008. – P. 13-15.
- A53. Pavlov, S. G. Raman lasers due to scattering on donor electronic resonances in silicon / S. G. Pavlov, U. Böttger, N. V. Abrosimov, H. Riemann, V. N. Shastin, B. Redlich, A. F. G. van der Meer and H.-W. Hübers // *Physica B.* – 2009. – Vol. 404, Issues 23-24. – P. 4661-4663.
- A54. Bekin N. A. Quantum cascade laser design based on impurity-band transitions of donors in Si/GeSi(111) heterostructures / N. A. Bekin and S. G. Pavlov // *Physica B.* – 2009. – Vol. 404, Issues 23-24. – P. 4716-4718.
- A55. Pavlov, S. G. Stimulated terahertz emission due to electronic Raman scattering in silicon / S. G. Pavlov, U. Böttger, J. N. Hovenier, N. V. Abrosimov, H. Riemann, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, B. Redlich, A. F. G. van der Meer, and H.-W. Hübers // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94, Issue 17. – P. 171112.

- A56. Pavlov, S. G. Optimizing the operation of terahertz silicon lasers / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, U. Böttger, R. Kh. Zhukavin, V. V. Tsyplenkov, K. A. Kovalevsky, V. N. Shastin // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. – 2009. – Vol. 15, Issue 3. – P. 925–932.
- A57. Pavlov, S. G. Terahertz lasing from silicon by infrared Raman scattering on bismuth centers / S. G. Pavlov, U. Böttger, N. V. Abrosimov, H. Riemann, V. N. Shastin, B. Redlich, and H.-W. Hübers // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95, Issue 20. – P. 201110.
- A58. Shastin, V. N. Advanced THz laser performance of shallow donors in axially stressed silicon crystal / V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, K. A. Kovalevsky, V. V. Tsyplenkov, S. G. Pavlov and H.-W. Hübers // J. Phys.: Conf. Ser. – 2009. – Vol. 193. – P. 012086.
- A59. Pavlov, S. Stress-controlled phonon-impurity resonances in terahertz silicon lasers // Phonon Engineering – Theory and Applications: Proceedings of the Material Research Society Fall Meeting, Symposium EE, Boston, MA, USA. 30 Nov. – 4 Dec. 2009. – Vol. 1221E. – Abstract ID # 659941.
- A60. Pavlov, S. G. Influence of electric field on operation of terahertz intracenter silicon lasers / S. G. Pavlov, U. Böttger, H.-W. Hübers, N. V. Abrosimov, K. Irmscher and H. Riemann // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 107, Issue 3. – P. 033114.

Павлов Сергей Геннадьевич

**ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ
НА ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРАХ
В КРЕМНИИ И ГЕРМАНИИ**

Автореферат

Подписано к печати . . . 2010 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105

